



“Caracterización del taladrado a partir del análisis de señales de emisión acústica emitidas durante la acción de brocas en diferentes condiciones de corte”

Tesista: **Mag. Guido Claudio Ferrari**

Director: **Dr. Martín Pedro Gómez**

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Delta

Campana

... A la enseñanza pública, deber de los estados y derecho de todos...

Dedicatoria

A mi papá Lucio y a mi abuela Yolanda que a pesar de que ya no están, los siento más presentes que nunca.

A mi familia y amigos/as que me acompañaron en este camino.

A Martín Pedro Gómez por ser constantemente un invaluable maestro, amigo y consejero.

A Carlos Garcia Ebbens por haber sido un gran tutor.

A la UTN por la formación técnica que me brindó.

Agradecimientos

A la UTN por la oportunidad de realizar esta investigación y a la FRD por la posibilidad de llevarla a cabo en sus instalaciones.

A la empresa CARSOL S.R.L y a su director *Domingo Enrique Vidal* por su colaboración desinteresada en el presente proyecto aportando su conocimiento técnico y experiencia en construcción y montaje mecánico, así como componentes fundamentales del equipo, como la caja de reducción de rpm, el carro de avance, y partes de otras piezas metálicas como anclajes, soportes y lumbrera para conexión motor-caja de reducción.

Al Departamento ICES de CNEA, y a su grupo de trabajo por los consejos brindados y por el préstamo de la unidad hidráulica que permitió brindar el movimiento de avance del sistema de perforación.

Resumen

En la presente tesis se busca ampliar el conocimiento existente sobre la utilización de métodos basados en el estudio de la generación y propagación de ondas elásticas para la caracterización de materiales y procesos mediante monitoreo continuo, en este caso aplicado al corte de geomateriales en procesos de perforación. De esta manera, se busca tomar información que permita relacionar las condiciones dinámicas del corte, con el estado de la herramienta y del material que se está cortando. Las ondas elásticas producidas durante el corte de los materiales y medidas en este trabajo tienen un rango de frecuencia que las ubica dentro del alcance del método de END denominado emisión acústica (EA). Para concretar este estudio se construyó una máquina perforadora a escala intermedia, en la cual se pueda realizar un proceso de perforado, tratando de emular a aquellos realizados en las industrias de extracción como la minera o la del petróleo. La máquina fue diseñada para poder medir de manera directa las ondas elásticas procedentes de la zona de corte a través de la herramienta de corte rotante, la cual actúa como guía de ondas, y fue comprobada su efectividad. El diseño del equipo también permitió incorporar la medición y el control de variables mecánicas como las presiones de trabajo y el avance y la velocidad de rotación de la broca. Además, se diseñaron y construyeron las herramientas de corte (de acero y de carburo de tungsteno (WC)) con distintas geometrías y condiciones de filo. Complementariamente, para utilizarlas como casos de estudio, se ensamblaron probetas de sustratos multicapa compuestos por rocas sedimentarias y metamórficas con diferentes propiedades geomecánicas, las cuales fueron dispuestas en sucesivas capas consolidadas con cemento. Se realizaron las perforaciones adquiriéndose la información de múltiples parámetros para cada caso combinando variaciones de materiales, herramientas, condiciones de corte y otras variables adicionales. Se relacionaron los parámetros medidos y las características del sistema de corte en función del tiempo a través de técnicas de análisis como la autocorrelación, la correlación cruzada y la de Pearson. Se incorporó la clasificación mediante redes neuronales de Kohonen para reconocer patrones vinculados con la condición de corte de diferentes geomateriales, con diferentes herramientas. El análisis de la información mostró que los parámetros rms, cuentas, energía MARSE y duración de EA pueden ser utilizados en la identificación de la fractura de los filos de la herramienta de corte, del proceso de corte con filo fracturado respecto de filo nuevo, de la inestabilidad del proceso relacionada con el descentrado de la broca y de los cambios de interfaces entre materiales de corte. Las cuentas de EA mostraron ser el mejor descriptor para la aplicación de la

autocorrelación y la correlación cruzada sobre la serie de hits paramétricos de EA. Se identificaron los periodos de tiempo en los que coinciden los procesos de corte con características similares, se pudo distinguir entre el corte de rocas y el del cemento de consolidación. La correlación de Pearson identifico los parámetros de EA que menos se correlacionan entre sí, siendo estos el *rise time*, *la amplitud*, *el número de cuentas*, *el RMS* y *la frecuencia promedio*. Estos se utilizaron para entrenar y simular las redes neuronales de Kohonen con la información de EA correlacionada no linealmente. Estas redes identificaron las señales del proceso establecidas por el corte con una broca con filo nuevo respecto de un filo fracturado y el corte de las rocas arenisca, caliza, pizarra y cemento de consolidación entre sí, siendo estos resultados alentadores para intentar una posible aplicación a casos en campo.

Proyectos de I + D y publicaciones a congresos

G. Ferrari, M. Gómez, “Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación” Revista Tecnura, (2020) DOI: doi.org/10.14483/22487638.16193 –

A. Basgall, G. Ferrari, M. Gómez “Neural Networks applied to the monitoring of drilling processes in geological material samples”, Journal Of Acoustic Emission - Vol 37, (2020).

G. Ferrari, A. Basgall, M. Gómez, “Emisión acústica aplicada al monitoreo de procesos de perforación en probetas de material geológico”, E-GLEA 10, Décimo encuentro Internacional del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, Facultad de Ingeniería - UNCo –Neuquén, (2019) ISBN 978-987-1323-65-4.

Basgall A., Ferrari, G., Gómez, M “Redes neuronales aplicadas al monitoreo de procesos de perforación en probetas de material geológico”, E-GLEA 10, Décimo encuentro Internacional del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, Facultad de Ingeniería - UNCo –Neuquén, (2019), ISBN 978-987-1323-65-4

G. Ferrari, M. Gómez, “Caracterización de las etapas del perforado de probetas multicapas de geomateriales por análisis de la emisión acústica generada durante el proceso de taladrado”, Decimotercer Encuentro Científico del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra, CNEA E-ICES, (2019), ISBN 978-987-1323-63-0

G. Ferrari, M. Gómez, “Análisis de la emisión acústica en perforado de materiales geológicos con diferente granulometría”, Libro de resúmenes extendidos del 18º Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM-CONAMET 2018, 1275-1277, 1ra Edición, CNEA (2018),

G. Ferrari, D. Colella, M. Gómez, “Característica de la propagación de ondas de EA en tubos metálicos con y sin agua en su interior” CORENDE XI, Neuquén (2017).

Proyecto de investigación y desarrollo PID-UTN, “Construcción de un sistema de perforación de suelos a escala y evaluación de la Emisión Acústica producida durante su utilización”, UTN-FRD, 2017-2019, Cód. ASUTIDE0004576TC.

Presentaciones a congresos

*E-GLEA 10, 2019 **Exposición Oral:*** “Emisión acústica aplicada al monitoreo de procesos de perforación en probetas de material geológico”, Ferrari, G., Basgall A., Gómez, M., 10° Encuentro del GRUPO LATINOAMERICANO DE EMISIÓN ACÚSTICA (E-GLEA 10), 14 al 16 de agosto de 2019, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Neuquén, ARGENTINA.

E-ICES 13, 2018: **Exposición Oral:** “Caracterización de las etapas del perforado de probetas multicapas de geomateriales por análisis de la Emisión Acústica generada durante el proceso de taladrado”.

18° SAM – CONAMET, 2018: **Presentación de Póster:** “Análisis de la Emisión Acústica en perforado de materiales geológicos con diferente granulometría”.

CORENDE XI 2017: **Exposición Oral** “Característica de la propagación de ondas de EA en tubos metálicos con y sin agua en su interior”

Trabajos adicionales relacionados con la presente tesis dentro del marco de crecimiento institucional de la UTN-FRD

Diseño y construcción de sistemas de sujeción de celda de carga para máquina de tracción Amsler 60 Tn en el laboratorio de la UTN-FRD.

Coordinación general, compra de herramental y puesta en valor de **sector de mecanizado** dentro del laboratorio de mecánica de la UTN-FRD lo que permitió crear una unidad que actualmente provee servicios de mecanizado a diferentes laboratorios de la facultad.

Coordinación general, compra de insumos es instalación del **laboratorio de impresión 3D** dentro del departamento de mecánica de la UTN-FRD entrenando becarios y brindando servicios de impresión 3D para diferentes sectores y laboratorios de la facultad.

Colaboración con el **taller de soldadura** de la UTN-FRD para puesta en valor de las instalaciones y reorganización de las estaciones de soldadura.

Realización de trabajos de transferencia tecnológica al sector privado mediante la aplicación de la técnica de EA brindando soluciones para el monitoreo de procesos, creación de procedimiento de control y revisión de equipos y evaluación de vida de productos. Estos

trabajos permitieron comprar herramental y entrenar becarios para hacer crecer el GEA (Grupo de Emisión Acústica) dentro de la UTN:

EPE - Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe. Marzo 2019. “Análisis de fijación de barra de PRFV sometidas a flexión mediante EA – Análisis de par de apriete y diseño de protocolo de ajuste.”,

SIDERCA – TENARIS. Desde 2019 hasta 2020. “Ensayos de Emisión Acústica “Análisis de la Emisión Acústica durante ensayo de fatiga resonante de tubos de 5 ½ y 4 ½ pulg. a plena escala.”.

EPE - Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe. Marzo 2019. “Estudio de factibilidad de la utilización del método de Emisión Acústica en barras de PRFV sometidas a flexión”,

PAPEL PRENSA S.A. 2016 - 2018, “Monitoreo mediante EA de refinador de pasta de papel – instalación de equipo de monitoreo de EA”,

SIDERCA – TENARIS. Desde 2016 hasta 2017. “Estudio de la factibilidad de Implementación de un sistema de Emisión Acústica para detectar fisuras en tubos causadas en la fatiga de los mismos”. Etapa 1 FASE 2.

SIDERCA –TENARIS 2015 “Estudio de la factibilidad de Implementación de un sistema de Emisión Acústica para detectar fisuras en tubos causadas

INDICE GENERAL

RESUMEN

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE EMISIÓN ACÚSTICA Y HERRAMIENTAS DE ANALISIS

1.1.	Definición de Emisión Acústica como proceso físico	2
1.2.	EA como método de ensayo no destructivo	3
1.3.	Parámetros característicos de las señales de EA	4
1.4.	EA en fractura de roca	7
1.4.1.	Análisis de parámetros de EA	9
1.4.2.	Ubicación de los hipocentros de la fuente de EA	9
1.4.3.	Análisis en función de la forma de onda completa	10
1.4.4.	Análisis de la evolución de la anisotropía de las velocidades	10
1.4.5.	Cuentas de EA, deformación inelástica y ley de Omori	12
1.4.6.	Relación amplitud y magnitud frecuencia	13
1.4.7.	Clasificación de fracturas en función de la emisividad, energía, Factor RA y frecuencias pico	15

1.4.8.	Análisis de Efecto Kaiser en rocas	17
1.4.9.	Localización de hipocentros de EA a partir del tiempo de llegada	18
1.5.	Estado del arte del conocimiento de la EA relacionado con los procesos de perforado en geomateriales	20
1.5.1.	Trabajos que relacionan la EA con las propiedades geomecánicas del material	21
1.5.2.	Trabajos que relacionan la EA con el monitoreo del proceso de corte	25
1.6.	Sistemas de EA	30
1.6.1.	Sensores de EA	30
1.6.2.	Preamplificadores	34
1.6.3.	Equipo de EA: Amplificador-Parametrizador y Digitalizador	35
1.6.4.	Modo de adquisición Paramétrico – Parametrización	36
1.6.7.	Modo de adquisición de Formas de onda (Waveforms)	36
1.6.8.	Modo de adquisición Streaming	37
1.7.	Herramientas Aplicadas al análisis de las señales de EA	37

1.7.1. Información estacionaria y no estacionaria	37
1.7.1.1. Clasificación de Información aleatoria estacionaria	37
1.7.1.2. Información aleatoria ergódica	40
1.7.1.3. Información aleatoria no estacionaria	41
1.7.1.4. Registro de muestras estacionarias	41
1.7.1.5. Análisis de información aleatoria	42
1.7.1.6. Conceptos básicos aplicados a procesos aleatorios estacionarios	43
1.7.1.7. Funciones de correlación (covariancias)	45
1.7.1.8. Coeficiente de las funciones de correlación	47
1.7.1.9. Información de carácter no estacionario	48
1.7.1.10. Estructura de probabilidad de información no estacionaria	50
1.7.1.11. Funciones de probabilidad de mayor orden	51
1.7.2. Redes Neuronales	52

1.7.2.1.	Introducción	52
1.7.2.2.	Arquitectura y funcionamiento básico de una neurona	53
1.7.2.3.	Acondicionamiento de los datos de entrada a la red	58
1.7.2.4.	Descripción del proceso de entrenamiento y predicción	59
1.7.2.5.	Descripción de reglas de aprendizaje y red elemental Perceptrón	61
1.7.2.6.	Red neuronal tipo Mapas Topológicos Auto Organizados – Kohonen	65

Capítulo 2 INTRODUCCION AL PROCESO DE CORTE, MECANICA Y HERRAMIENTAS DE PERFORADO Y CLASIFICACION DE LOS GEOMATERIALES ROCOSOS

2.1.	Construcción de los modelos de falla y mecánica de corte de roca	64
2.1.1.	Análisis de relaciones básicas	71
2.1.2.	Modelos de Evans	86
2.1.3.	Modelo de E. Nishimatsu	89
2.1.4.	Modelo de flujo basado en el modelo de Merchant	93
2.1.5.	Mecanismo de corte por cuña	96

2.2.	Tipos de cortadores para perforado de rocas	104
2.2.1.	Brocas con diamantes PDC	108
2.2.2.	Brocas de diamante natural y brocas térmicamente estables	109
2.2.3.	Brocas de diamante impregnado	110
2.2.4.	Partes generales de un cortador	111
2.3.	Parámetros de cálculo para el proceso de taladrado	114
2.4.	Clasificación de geomateriales rocosos sedimentarios y metamórficos	121
2.4.1.	Rocas sedimentarias	121
2.4.2.	Rocas Metamórficas	124

Capítulo 3 METODOLOGÍA

3.1.	Cálculos para el diseño de la máquina perforadora, verificación de tensiones máximas y parámetros de diseño preliminares	129
3.2.	Construcción de las diferentes piezas del modelo de la perforadora e instrumentación de monitoreo	131
3.2.1.	Carro de avance y estructura de soporte	131

3.2.2.	Montaje del soporte de rodamientos y anclajes de la lumbrera, la caja reductora y el motor	134
3.2.3.	Caja de reducción rpm y multiplicadora de torque	135
3.2.4.	Construcción de la broca de perforación	135
3.2.5.	Sistema de accionamiento de empuje hidráulico, soporte de fuerzas de corte e inyección de agua de perforación	150
3.2.6.	Guía de onda hidráulica para instrumentación de una herramienta rotante	152
3.2.7.	Ensamble del sistema y primeras pruebas	154
3.3.	Construcción de las probetas de ensayo	155
3.3.1.	Clasificación Empírica del material geológico seleccionado para perforación	157
3.3.2.	Caracterización adicional de las rocas Arenisca, Caliza y Cemento de consolidación	165
3.3.3.	Modelo de semejanza	168
3.3.4.	Disposición de las capas de roca para las probetas de ensayo, conformación de los casos para calibración, ensayo y distribución de perforaciones	171
3.4.	Sistema de EA utilizado para los ensayos	173
3.5.	Ensamble final del prototipo y condiciones de ensayo	174

3.6.	Parámetros mecánicos perforación y ajuste de equipo de EA	175
3.6.1.	Parámetros de perforación	175
3.6.2.	Configuración del equipo de EA	175
3.7.	Forma de procesamiento y análisis de la información	177
3.7.1.	Análisis de las presiones de Avance (PA) y de Retención (PR)	177
3.7.2.	Medición de la posición de la broca y correlación con la presión de retención (PR)	177
3.7.3.	Análisis de correlación de Pearson	182
3.7.4.	Análisis de auto correlación y correlación cruzada para los Hits de EA	183
3.7.5.	Pre-procesamiento de datos y configuración general de las RN Kohonen	188

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Resultados de la caracterización de la cadena de medición de EA	194
4.1.1.	Resultado de calibraciones primarias	195
4.1.2.	Resultados de validación de la guía de ondas hidráulica respecto de la guía de onda cementada dentro de la probeta	199

4.2.	Resultados del monitoreo de las perforaciones mediante Emisión Acústica, Presión de Retención (PR) y Registro de Video (RV)	202
4.2.1.	Resultados de perforación en probeta Caliza (C1), agujeros a2-a3-a4	203
4.2.2.	Resultados de perforación en probeta Arenisca (A1), agujeros a1, a2, a3	208
4.2.3.	Resultados de perforación en la probeta Arenisca Caliza AC2, agujeros a1-a2-a3-a4	213
4.2.4.	Resultados de perforación en la probeta Caliza Pizarra CP1, agujeros a1-a2-a3	219
4.3.	Discusión de los resultados extraídos a partir de la información obtenida mediante la EA, la PR y el registro visual	224
4.3.1.	Caída de amplitud en función de la profundidad	224
4.3.2.	Aumento de amplitud en zonas de interfase	227
4.3.3.	Relevamiento fotográfico y cambio de centro de perforación	230
4.3.4.	Comparación de tendencias de amplitud y rms en función del material perforado	231
4.3.5.	Evaluación del cortador de cuatro filos (SAE O2)	235
4.3.6.	Análisis durante la fractura del cortador de CW	237
4.4.	Resultados y discusión del análisis de correlación de señales aplicado a la información paramétrica obtenida mediante EA	244

4.4.1. Resultados de auto correlación de parámetros de EA para ensayos A1a1, A1a2, A1a3	244
4.4.2. Resultados de auto correlación de parámetros de EA para ensayos CP1a1, CP1a2, CP1a3	248
4.4.3. Resultados de correlación cruzada para ensayos A1a1/A1a2, A1a1/A1a3, A1a2/A1a3	250
4.4.4. Resultado del posicionamiento grafico – temporal en función de la auto correlación para ensayos A1a1, A1a2, A1a2, CP1a1, CP1a2, CP1a3	255
4.4.5. Resultado del posicionamiento grafico – temporal en función de correlación cruzada para las series de ensayos A1a1/ A1a2, A1a1/ A1a3, A1a2/ A1a3 y CP1a1/ CP1a2, CP1a1/ CP1a3, CP1a2/ CP1a3	259
4.5. Resultados y discusión de la aplicación de las RNK en la clasificación de la información paramétrica de EA	265
4.5.1. Resultados de la selección de parámetros de EA para entrenamiento de la RNK mediante el análisis de la correlación de Pearson	265
4.5.2. Resultados para el entrenamiento y predicción de las Redes Neuronales de Kohonen (RNK).	269
Capítulo 5. CONCLUSIONES FINALES	278
Trabajos a futuro	285
Anexo A	296

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE EMISIÓN ACÚSTICA Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

En este capítulo se realiza una breve introducción a los fundamentos de la Emisión Acústica como Ensayo No Destructivo (END) y como técnica para la caracterización de procesos, describiendo la instrumentación, los equipos necesarios para aplicar la técnica y los parámetros característicos. También se presenta una introducción a la aplicación y análisis de la EA en la fractura de rocas y se presenta una revisión del estado del arte de la EA en los procesos de perforación aplicados a geomateriales. Finalmente se realiza una introducción teórica de herramientas como correlación de series numéricas estacionarias, no estacionarias y redes neuronales utilizadas para el análisis de la información de EA.

1.1 Definición de Emisión Acústica como proceso físico

Se entiende por Emisión Acústica (EA) a la energía elástica liberada de un material de manera espontánea cuando se ejercen ciertas acciones sobre él, como deformaciones o sollicitaciones mecánicas [Miller y otros (2005)]. Ejemplos de este fenómeno son las ondas elásticas que se generan en el interior de un material debido al avance de una fisura, y que se propagan por todo el cuerpo hasta su superficie. Durante el maclado del estaño, o cuando se procede a la curación de alguna vasija de barro o cerámica, estas ondas elásticas se encuentran en el espectro audible y pueden ser detectadas por el oído humano. Sin embargo, estos casos son los menos frecuentes, ya que, en casos de interés como el estudio de los materiales, el espectro de frecuencia de estas ondas elásticas está situado por encima del audible pudiendo llegar hasta los MHz, haciendo que sea imposible escucharlas por nuestro oído. Por lo tanto, a estas frecuencias es necesario contar con un dispositivo que permita captar, procesar y almacenar la información de estas ondas elásticas. De manera más general la EA puede generarse por cualquier mecanismo que convierta alguna forma de energía en energía elástica que se propagará por el medio, por lo tanto, la energía transformada por la fuente puede ser de origen mecánico, electromagnético, químico, térmica etc. Esta liberación de energía ocurre de manera estocástica [Grabec (1980)] en un proceso que se denomina *evento de EA*. Estas fuentes de ondas elásticas van desde dislocaciones y avalanchas de dislocaciones en escala microscópica hasta eventos sísmicos a nivel macroscópico [Pollock (1973)]. En los materiales metálicos existen fuentes emisoras de varios tipos, algunas llamadas reversibles como las transformaciones de fase, fusión, solidificación, movimiento de dominios magnéticos o ferroeléctricos, y otras fuentes no reversibles que son las deformaciones plásticas, crecimiento de fisuras, avalanchas de dislocaciones, fractura de inclusiones y precipitados, corrosión, etc. Estos procesos por lo general involucran una degradación del material.

En no metales se puede detectar EA en procesos como roturas de fibras en madera, fracturas de piedras, ruptura y fractura de fibras y matriz en materiales compuestos y otros muchos. Si tenemos en cuenta además que también procesos como soldadura, forjado, maquinado, pérdida en válvulas y tuberías, flujo de partículas, cavitación y otros fenómenos producen EA, la cantidad de fuentes emisoras que se pueden caracterizar son de muy amplio espectro.

1.2 EA como método de ensayo no destructivo

La EA se utiliza como técnica de END para el control de tanques a presión y de almacenamiento de sustancias, control de estructuras, análisis de fallas en materiales de construcción, control de procesos de desgaste y rozamiento, detección de xilófagos en madera, lubricación de máquinas, etc. Se la denomina una técnica pasiva debido a que no se efectúa ninguna excitación en el elemento a estudiar como ocurre con el ultrasonido o los rayos X, pero debemos tener en cuenta que para que haya EA debe existir una sollicitación de cualquier origen (mecánica, química, electromagnética, etc.) sobre el material. Los sensores de EA no detectan deformaciones cuasi estacionarias o estáticas, así como tampoco de muy alta frecuencia. La EA difiere fundamentalmente en dos aspectos con otros métodos END. El primero es que la señal (onda elástica) se origina en el material examinado y el segundo es que la EA detecta movimiento y no discontinuidades geométricas [Pollock (2003)], razón por la cual la EA es un buen método para ser complementado con otras técnicas de END.

1.3 Parámetros característicos de las señales de EA

En los procesos de EA puede suponerse la existencia de ambos tipos de señales (explosión y continuas) en el mismo proceso. Más aún, las señales *continuas* pueden ser consideradas como una sumatoria de señales tipo explosión que se superponen una sobre otra creando un espectro continuo. Una vez que la señal ha sido clasificada temporalmente se pueden comenzar a definir el resto de los parámetros.

Para comenzar nuestro estudio se debe explicitar que los parámetros están definidos en principio para señales transitorias tipo explosión (Fig. 1.1) y luego algunos de ellos podrán extrapolarse a señales tipo continuas.

El primer parámetro que se debe fijar es el valor *umbral*, que es el nivel de tensión que debe superarse para que una señal de EA sea detectada y procesada. Este umbral puede ser fijo, ajustable o flotante. Para continuar con la determinación de los parámetros se debe aclarar un término utilizado en la EA el cual es “HIT” y que se define como la señal de EA que es registrada por el equipo y por lo tanto que ha superado el valor umbral.

Tiempo de ocurrencia (hit time): se define como el tiempo de llegada o de ocurrencia de la señal. Es el tiempo al cual se considera que comienza el hit y esto ocurre cuando supera el umbral, por lo tanto, es dependiente de este valor.

Amplitud máxima o Amplitud: es el valor máximo de amplitud que alcanza la señal y está relacionado con la magnitud de la fuente y las propiedades del material. Se expresa en dB_{EA} y es uno de los parámetros que pueden servir para describir señales continuas. No depende del umbral, siempre y cuando lo supere. Los dB_{EA} se definen como:

$$dB_{EA} = 20 \cdot \frac{V_s}{1\mu V}$$

Donde V_s es el voltaje medido a la salida del sensor piezoeléctrico, por lo que, despejando de la ecuación, si el resultado en dB es 0, entonces el voltaje de salida del sensor es de 1 mV, si es de 20 dB, serán 10 mV y si la señal tiene una intensidad de 40 dB a la salida del sensor será producto de una amplitud en tensión de 100 mV.

Duración (Duration): es el tiempo que transcurre desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la fuente emisora, tipo y forma del espécimen, así como de las características del sensor y del valor del umbral.

Tiempo de subida (Rise Time): es el tiempo desde que la señal cruza el umbral por primera vez hasta que llega a la amplitud máxima. Depende del umbral y está relacionada con el periodo de actividad de la fuente.

Número de Cuentas (Ring Down Counting) es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral, depende del umbral y está relacionada con la amplitud.

Energía MARSE: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (*Measured Area under Rectified Signal Envelope*). Depende del tiempo y por lo tanto del umbral además de la amplitud.

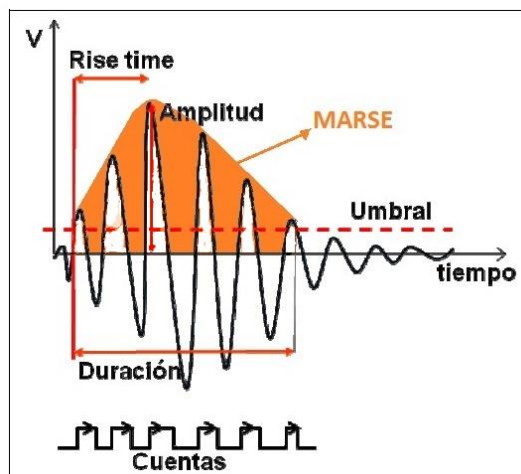


Fig. 1.1. Detalle de los parámetros de EA. [Modificado de Gómez (2012)]

Valor Cuadrático Medio o RMS (Root Mean Square): Este parámetro se define matemáticamente como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt}$$

Donde V es el voltaje medido. Este parámetro sirve para caracterizar señales continuas. Por definición del RMS, la energía contenida en la señal puede estimarse como proporcional al cuadrado de este parámetro en el intervalo de tiempo considerado:

$$\Delta E \propto (RMS)^2 \Delta t$$

Energía Absoluta (Absolute Energy), se define matemáticamente como:

$$E_e = \frac{1}{R} \int [V(t)]^2 dt$$

Donde V es el voltaje de salida del sensor y R una resistencia de referencia.

Frecuencia Media (FM): Es un parámetro secundario y se define como el cociente entre el número de cuentas y la duración del Hit.

Potencia Media (PM): Este parámetro secundario se crea a partir del cociente entre la Energía MARSE y la duración del hit. Debido a que es independiente del tiempo este parámetro puede ser utilizado en señales de tipo continuo.

Existen además otros parámetros secundarios pueden ser encontrados en la bibliografía [Philippidis y otros (1998)] como ángulo de decaimiento o DAN (Decay Angle) que es el resultado dividir la Amplitud sobre la duración de la señal, o el área Subida – Decaimiento o RDA (Rise-Decay Area) el cual es producto de dividir el tiempo de subida sobre la Duración. De similar otros parámetros son calculados como las cuentas hasta el pico máximo de la señal sobre las cuentas totales o el número de cuentas de decaimiento de la señal respecto del número de cuentas de hasta el pico máximo. Todos estos parámetros serán útiles o no en la medida que sean descriptores característicos del proceso que se está estudiando, lo que demarcará el beneficio de su utilización. La tabla 1.1 muestra un resumen de las unidades y los rangos de medición de los parámetros de EA.

El equipo de EA puede ser configurado para que muestre estos parámetros en tiempo real, es decir a medida que se realiza el ensayo. En la Fig. 1.2 se puede observar la captura de la pantalla de uno de los ensayos realizados para esta tesis donde se muestran algunos parámetros de EA, además de la entrada de parámetros externos y en la parte inferior una lista de registro de cada uno de los hits obtenidos durante el ensayo.

Tabla 1.1. Comparación de parámetros de EA con su resolución, unidades y rango [Modificado de manual PAC-AEWin. (2011)].

CARACTERÍSTICA	RESOLUCIÓN	UNIDADES	RANGO
Tiempo del Hit	0,250	Microsegundos	0-407 días
Amplitud	1 dB	1 dB	10-100 dB
Energía (PAC)	1 cuenta	10 μ V.s/cuenta	0-65535
Numero de cuentas	1 cuenta	cuentas	0-65535 cuentas
Tiempo de subida	1 μ s	μ s	0-65.5 ms
Duracion	1 μ s	μ s	0-1000 ms
Energía absoluta	1 cuenta	9.31x10 ⁻²² Joules	2.61x10 ⁻⁸ J
Fuerza de la señal	1 cuenta	3.05 pV.s	0 - 1,31.108 pV.s
Cuentas hasta el pico	1 cuenta	cuentas	0-32768
Potencia parcial	1 cuenta	% de la potencia total	0-100 %
RMS	0,0002V	V	0-6 V
ASL	1 dB	1 dB	0-100 dB
Umbral	1 dB	1 dB	14-99 dB

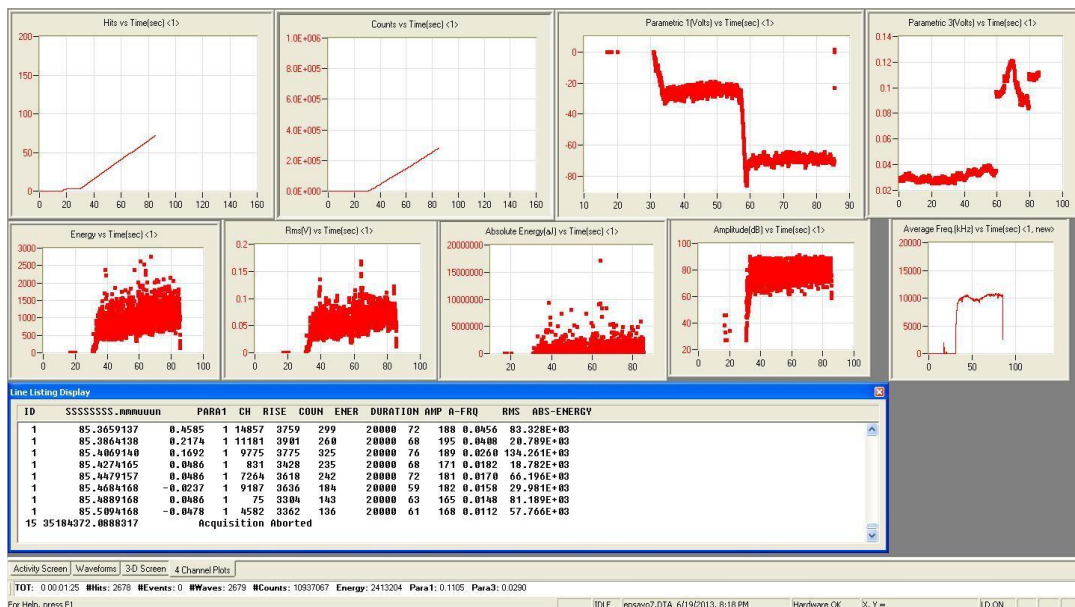


Fig. 1.2. Detalle de la visualización de los parámetros de EA en el equipo tomado de un ensayo real.

Además de los parámetros de EA, la placa de EA cuenta con entradas analógicas para parámetros externos, es decir parámetros independientes que pueden sincronizarse con la EA, ya que se reciben de manera paralela. En el presente trabajo como parámetro externo se registró la Fuerza de Avance (FA) en todos los ensayos de taladrado y cuyas unidades son en [kg].

Los parámetros anteriormente mencionados son los que el equipo registra y almacena. Una vez finalizado el ensayo se procede a la descarga de estas listas de información para su posterior procesamiento y estudio.

1.4. EA en fractura de roca

La EA es utilizada para el estudio de la generación y propagación de fracturas en rocas. Esta tecnología permite realizar un seguimiento del proceso de fractura en tiempo real ubicando las fuentes y su evolución temporal en función de la sollicitación mecánica y tiempo. Adicionalmente, el registro de la forma de onda trae en sí, toda la información de la fuente emisora (tipo de fractura, carga de sollicitación, características del medio por el cual se propaga, etc.). Esto permite aplicar múltiples técnicas de análisis para caracterizar el proceso de fractura, en comparación con otras técnicas de END. Una de las formas para producir EA es la aplicación de algún tipo de excitación sobre el sólido de estudio, que provoque una modificación del campo de tensiones del material, y eventualmente libere rápidamente cierta parte de esa energía en forma de ondas elásticas. Esto se realiza por la activación de algún mecanismo como la fractura, el maclado, el corte de fibras etc. Es útil entonces realizar el monitoreo de la EA en paralelo a ensayos mecánicos normalizados donde las condiciones puedan ser claramente controladas. La Tabla 1.2 y la Fig. 1.3 se muestran varios tipos de ensayos que se pueden aplicar en rocas para calcular parámetros mecánicos fundamentales que describen el comportamiento mecánico del material. En general estos ensayos son hasta el colapso de la muestra, y las fuerzas aplicadas promueven la nucleación y propagación de diferentes fisuras hasta la falla de la pieza.

El proceso de falla por fractura frágil de la roca comprende la iniciación, propagación y coalescencia de fracturas naturales o artificiales nucleadas a partir de concentradores de tensión como huecos, inclusiones o puntos de contacto entre granos disímiles (propiedades elásticas diferentes) dentro del material. Finalmente, este proceso resulta en una deformación inelástica con daño irreversible y liberación de EA asociada. Observaciones mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) realizadas sobre roca caliza (Fig. 1.4) permiten identificar la existencia de estos concentradores de tensiones que muestran a la roca como un material heterogéneo con fases e inclusiones, poros, micro cavidades y micro fisuras.

En este marco de ensayos mecánicos monitoreados mediante EA, muchos de los estudios de laboratorio que utilizan la EA pueden clasificarse en diferentes categorías [D. Lockner 1993] según el tipo y nivel de análisis. Se debe aclarar, que dichas categorías básicas suelen combinarse y ampliarse para aumentar el grado de detalle durante el análisis de la mecánica de fractura.

Tabla 1.2. Ensayos y parámetros mecánicos aplicados al análisis de rocas.

ENSAYO MECÁNICO	
BITT	Ensayo indirecto de tensión Barileño (Brazilian Indirect Tension Test)
DST	Ensayo de corte directo (Direct Shear Test)
MTS	Ensayo de corte modificado (Modified Shear Test)
VAST	Ensayo de corte de ángulo variable (Variable Angle Shear Test)
CTT	Ensayo de compresión triaxial convencional (Compressive Triaxial Test)
PLT	Ensayo de carga puntual (Point Loading test)
UCT	Ensayo de compresión uniaxial (Uniaxial Compression Test)
PTS/CP	Ensayo de corte interior en tres apoyos con presión de confinamiento (Punch Through Shear with Confining pressure Test)
SCBT	Ensayo de flexión semi circular (Semi-Circular bending test)
TPBT	Ensayo de flexión en tres puntos (Three point bending test)
DTT	Ensayo de tracción uniaxial (Direct Tensile Test)

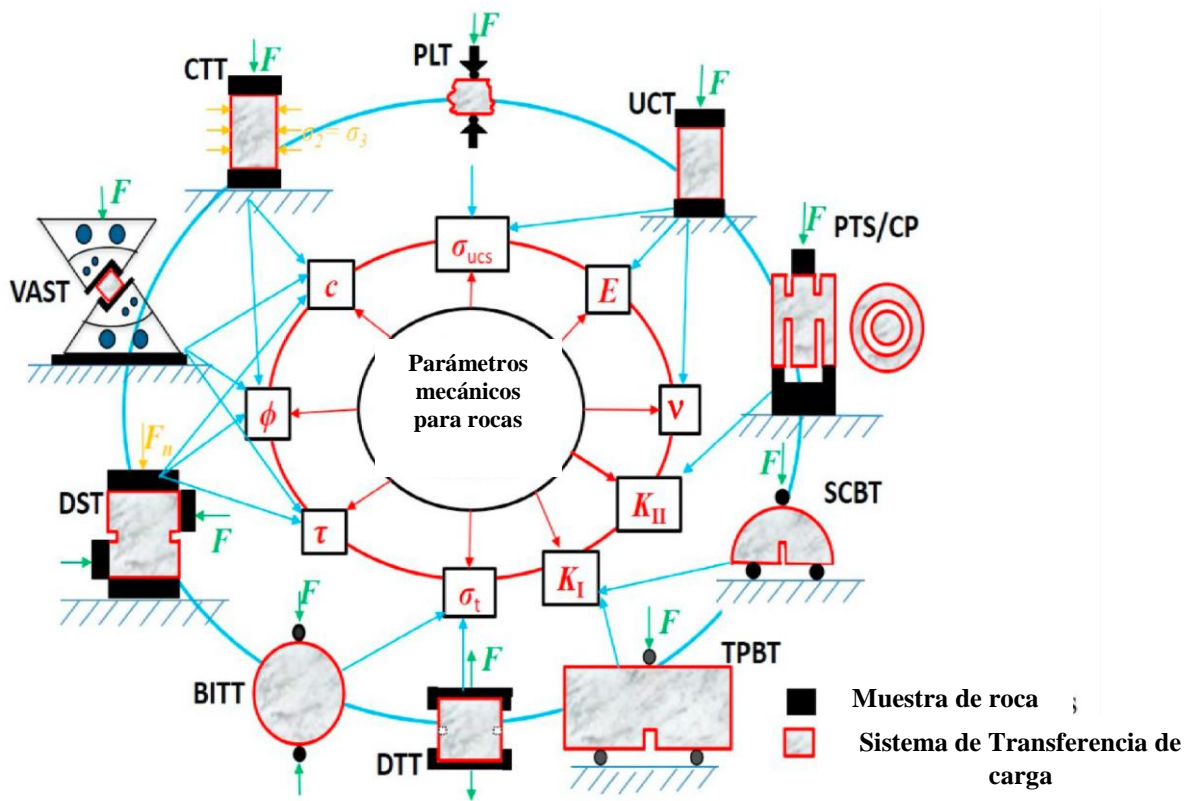


Fig. 1.3. Tipos de ensayos aplicados a la determinación de parámetros mecánicos fundamentales en roca (Modificado de K. Du et al 2020).

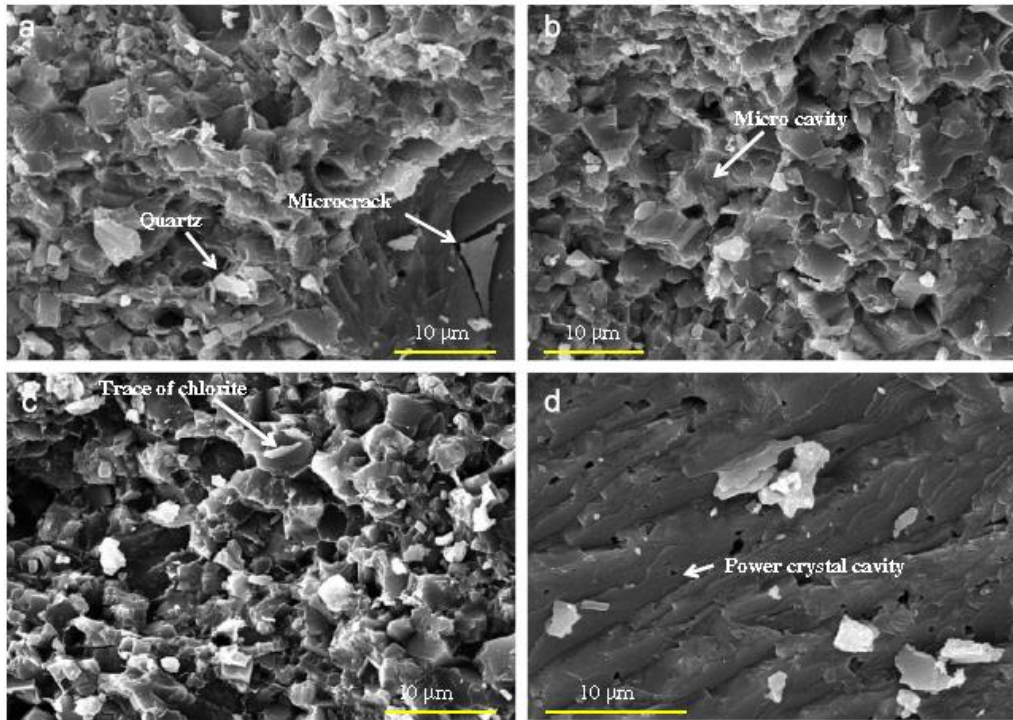


Fig. 1.4. Micrograffías SEM de roca caliza mostrando posibles puntos que actúan de concentradores de tensión como microcavidades, segundas fases, y microfisuras. [M. He et al. 2009].

1.4.1. Análisis de parámetros de EA. Usualmente se utilizan los parámetros amplitud, número de cuentas, energía, rise time, frecuencia promedio y duración. Muchos análisis están relacionados con el conteo del número de eventos y la aplicación de técnicas estadísticas de análisis de los Hits antes del fallo de la muestra. Se observa una correlación entre la tasa de AE y la deformación inelástica del material [J. Zhang 2018]. También se realiza la clasificación de eventos de EA por amplitud donde se observa que la distribución de sucesos obedece una ley de potencia, en frecuencia-magnitud, similar a la observada para terremotos. Estas técnicas de recuento acumulativo de eventos se utilizan junto con modelos mecánicos de daño para determinar cómo éste se acumula durante la carga y eventualmente produce falla del material.

1.4.2. Ubicación de los hipocentros de la fuente de EA. Esta técnica requiere datos precisos del tiempo de llegada de las señales AE registradas a través de varios sensores que son esencialmente una red sísmica en miniatura. Esto permite realizar análisis de la distribución espacial y temporal de los hipocentros de eventos. Luego esto puede ser relacionado con la progresión del crecimiento de las microfisuras y la agrupación de las mismas que conduce a la rotura de la roca.

1.4.3. Análisis en función de la forma de onda completa Estas técnicas básicamente apuntan al estudio en frecuencia de la EA para caracterización de la fuente. Se utilizan herramientas como SFFT y onditas para caracterizar las fuentes y su evolución temporal.

1.4.4. Análisis de la evolución de la anisotropía de las velocidades de las ondas P, S y estudio de la atenuación ya que estas propiedades están relacionadas con el estado de integridad del material.

Los parámetros de la EA son fáciles de calcular y las operaciones se realizan rápido con baja potencia de cálculo, pero existen limitaciones a su utilización, ya que simplemente son descriptores de la forma de onda que no pueden de manera precisa representar la característica compleja de la emisión. Debido a esto, el análisis paramétrico de las señales de la fractura de la roca contiene gran aleatoriedad del proceso y de las características de los parámetros. Desde este punto de vista, el análisis de la forma de onda temporal en base a su espectro de frecuencia podría llegar a ser más útil. La forma de onda es portadora de toda la información del proceso, como el tipo de fuente, el tipo de sollicitación mecánica, las propiedades físicas y mecánicas del medio, etc. Eventualmente mediante el análisis de información de las formas de onda, pueden ser entendidos de mejor manera los mecanismos de falla y sus precursores de [Zhang et al 2018]. Existen también, parámetros descriptores de la frecuencia de la onda que pueden ser utilizados para la clasificación de los tipos de fractura como B-Value o AF/RA donde este último analiza el parámetro frecuencia promedio de EA, respecto del valor RA el cual es el producto de la división de rise time respecto de la amplitud.

1.4.5. Etapas del proceso de compresión uniaxial para rocas y EA

En la Fig. 1.5 se exponen curvas tensión-deformación pertenecientes a ensayos de compresión uniaxial sobre rocas limolitas (roca sedimentaria) con diferentes niveles de saturación de agua [L. Chen 2017]. En general se pueden describir cuatro etapas características durante el proceso de fractura de este material frágil.

Etapa 1 de compactación de fisuras in situ: Las micro fisuras naturales que existen de intrínsecamente en los bloques del material comienzan a cerrarse, producto de la compresión axial, aumentando la compactación de la roca y disminuyendo la deformación lo que hace que la curva tensión-deformación tome una concavidad hacia arriba.

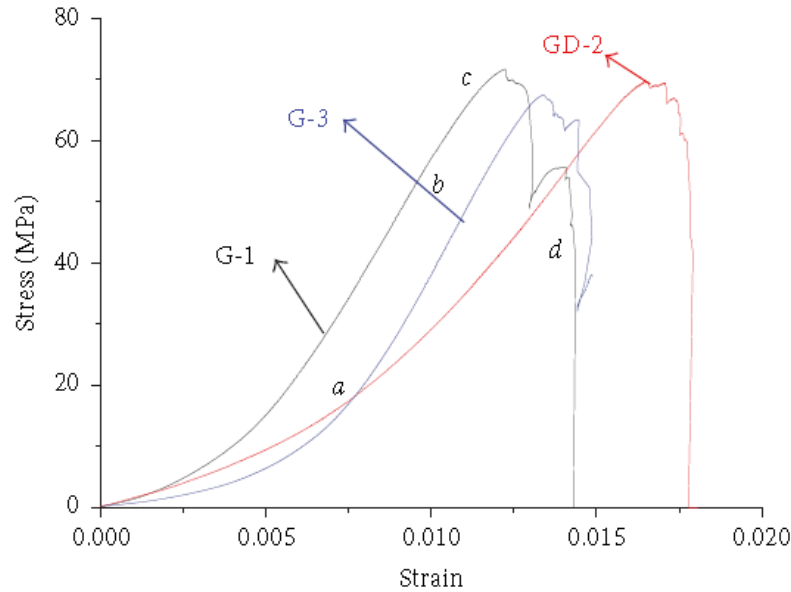


Fig. 1.5. Curva tensión –deformación para roca sedimentaria (L. Cheng et al 2017).

Etapa 2 de deformación lineal-elástica: En esta fase la curva de tensión-deformación presenta un comportamiento lineal ascendente, las microfisuras y micro uniones dentro de la roca fueron cerradas, y la deformación de la roca cambió a una deformación lineal-elástica que se ajustaba a Ley de Hooke de elasticidad.

Etapa 3 de deformación elástica plástica: En esta fase, la curva exhibió una tendencia ascendente con perfil cóncavo hacia abajo, es decir que se produce un ascenso de la tensión con disminución gradual de la pendiente hasta alcanzar el valor máximo. A medida que la tensión axial aumenta, se crean áreas de concentración de tensiones en los extremos de las microfisuras, poros, fases inhomogéneas, etc. Estas áreas de concentración de tensión acelerarán el desarrollo de micro fisuras, que se expandieron continuamente hasta lograr la conformación superficial como macro fisuras, resultando así en la falla de las muestras.

Fase 4 de fractura: En esta fase, la carga presenta un fuerte descenso después de alcanzar el valor máximo, que indicó que el espécimen de roca se fracturó a lo largo de las macro fisuras internas, resultando en la carencia de la capacidad portante de la roca.

Los parámetros cuentas acumuladas y energía acumulada suelen mostrar un aumento creciente con el incremento de la carga y la deformación, llegando generalmente al máximo cuando la probeta alcanza el máximo de carga, [A. Voznesenskii et al 2006, V. L. Shkuratnik et al 2005]. En la Fig. 1.6 se exhiben los resultados para los ensayos UCT en roca de limonita monitoreada mediante EA.

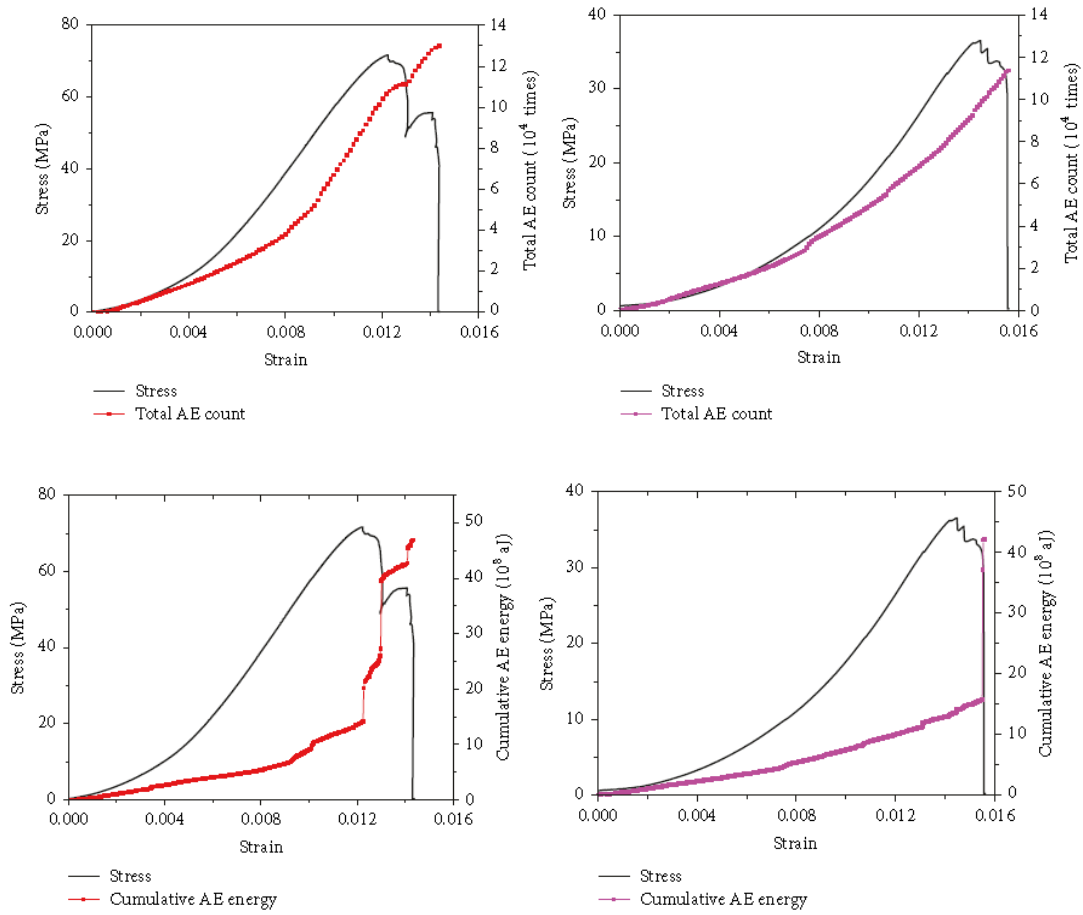


Fig. 1.6. Tensión aplicada, cuentas acumuladas de EA y energía de EA en función de la deformación para limolita con distinta saturación de agua. (Extraído L. Chen 2017)

En base a la sollicitación mecánica puede relacionarse el comportamiento de la EA durante las cuatro fases de compresión, donde en la etapa 1, la EA proviene de la compactación del material por el cierre de las fisuras naturales. En la etapa 2 de deformación lineal-elástica, la EA proviene de la expansión marginal de las fisuras internas, mostrando una tasa de conteo de AE relativamente estable. En la etapa 3 de fluencia con deformación plástica, la tasa de recuento de AE aumenta rápidamente a una tasa de 3 a 6 veces mayor que la de la fase lineal-elástica, lo que se relaciona con la propagación interna de las microfisuras de las rocas. Finalmente, en la etapa 4 de falla, comienzan la macro fracturación y el colapso de la muestra, donde la tasa de recuento de AE muestra comportamientos variados, pudiendo reducirse o crecer de manera rápida hasta el colapso final.

1.4.6. Cuentas de EA, deformación inelástica y ley de Omori

El conteo de la EA mediante el registro de hits, eventos o cuentas permite cuantificar la tasa de emisión y describir de manera cuantitativa el daño acumulado durante la deformación. La

correlación entre la deformación inelástica y la EA puede ser utilizada de manera homóloga al modelo de secuencias de réplicas de un terremoto respecto del comportamiento mediante fluencia lenta (creep) de la roca. La ley de Omori ha sido utilizada para estimar la probabilidad de réplicas destructivas posterior al temblor principal y establece que la secuencia de réplicas decae en función del tiempo según la relación empírica:

$$v(t) = K/(t + c)^p$$

Donde K, c y p son constantes y v es la tasa de la emisión acústica. En laboratorio Hiarata 1987; analiza la EA de una muestra sometida a una carga constante. Los eventos de EA registrados fueron tratados como una secuencia de sismo principal y réplica durante el creep del material. Se encontró que la secuencia de réplicas pasa por una transición regida por un decaimiento exponencial (Ec. 1.1) que a obedecer la ley de Omori.

$$v(t) = K_a e^{-pat} \quad \text{Ec. 1.1}$$

La interpretación física de la aparición de la EA secundaria se entiende en función de que el evento principal de fractura aumenta el nivel de tensión de la región alrededor de su perímetro (producto de la concentración de tensiones asociado a la propagación de la fisura). Luego estas réplicas son producto de la fluencia de la región perteneciente a entorno de la fractura, que se están acomodando al nuevo estado de tensiones impuesto, produciendo EA.

1.4.7. Relación entre la amplitud y la frecuencia de ocurrencia

La magnitud y aparición de los eventos de EA se pueden relacionar mediante la ley de potencia entre la magnitud de la emisión y la frecuencia de aparición utilizada en terremotos, llamada ley Gutenberg-Richter 1949 o B-Value.

$$\text{Log } N(M) = a - bM$$

Donde N es el número de terremotos mayores que el valor M, y a y b son constantes. Diferentes autores Knill et al 1968, Scholz 1968, Suzuki 1953 observaron que esta ley se puede aplicar a probetas de material geológico solicitadas mecánicamente donde se establecen relaciones como:

$$N(A)dA = KA - mA$$

Donde N(A) es la frecuencia de aparición de una amplitud determinada en el rango de A+da, luego K y m son constantes. En base a esto se puede establecer una relación entre b y m que permite establecer el valor de una pendiente “b” asociada a la distribución de las amplitudes

de eventos. Experimentalmente está pendiente puede variar con la composición de la roca y las condiciones de sollicitación mecánica de las muestras [Hardy 2003], por lo tanto, es difícil establecer una relación inequívoca como se aprecia en la Fig. 1.7.

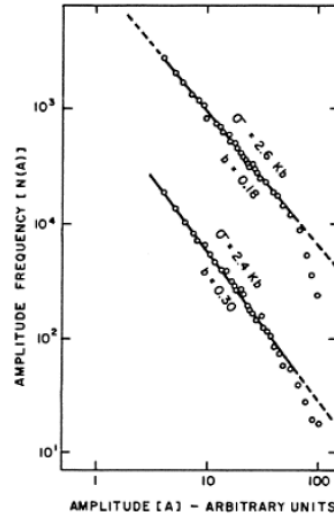


Fig. 1.7. Variación de la pendiente “b” respecto de dos ensayos a diferente presión de sollicitación [Hardy 2003].

También se puede establecer una relación entre la distribución de longitud de las fisuras y la distribución de amplitudes de la muestra, que cumplen ecuaciones de la forma [Evans 1978]:

$$\Phi(v) = 1 - e^{-\alpha \left(\frac{\sigma_{zz}^i}{v}\right)^\beta}$$

Donde $\Phi(v)$ la probabilidad de un evento de amplitud determinada, α es una constante y

$\beta = k/3$, donde para $v \gg \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{\beta}} \sigma_{zz}^i$, la expresión puede ser reducida a

$$\log \log \Phi(v) = \alpha - \beta \log \log V$$

Donde $a = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_{zz}^i}{v}\right)^\beta$ que es equivalente en la forma de la ecuación Gutenberg-Richter.

Mogi 1962 observó este comportamiento en la distribución de amplitudes de la EA.

1.4.8. Clasificación de fracturas en función de la emisividad, energía, Factor RA y frecuencia pico

Típicamente pueden nombrarse dos tipos diferentes de fracturas frágiles en rocas. Una es la fractura por tracción (tensión tensil) y la otra es fractura por cizallamiento (corte), estos mecanismos también pueden aparecer de manera mixta según el tipo de material y la

solicitud mecánica aplicada a la roca. K. Du et al 2020, realizó múltiples ensayos mecánicos BITT, TPBT, MST, UCT sobre rocas de granito, mármol y arenisca, pudiendo producir fracturas por tracción, corte y mixtas, y clasificando la emisividad, la energía y la frecuencia pico de los hits. Para el análisis utiliza el factor RA que el cual se define como el Rise time dividido la amplitud máxima respecto de la frecuencia pico. Esto le permitió clasificar el tipo de fractura por corte o tracción, en función de las señales de EA como muestra la Fig. 1.8. Esta metodología también se aplica al análisis de fracturas del hormigón. Se pudo establecer que cuando el valor RA es grande, el proceso de fractura es dominado por microfisuras de escala relativamente pequeña y cuando el valor RA es pequeño, el proceso de fractura es de escala grande ocupa una mayor proporción de la emisión. También se observa que hay cierta correlación entre la escala del proceso de fractura y las frecuencias de la EA donde a mayor escala de la fractura, la frecuencia de la onda generada es menor. [Zhang 2018]. La distribución y características de las frecuencias pico pueden estar determinadas por la velocidad de propagación y la extensión de la fractura, el número y tamaño de las microfisuras.

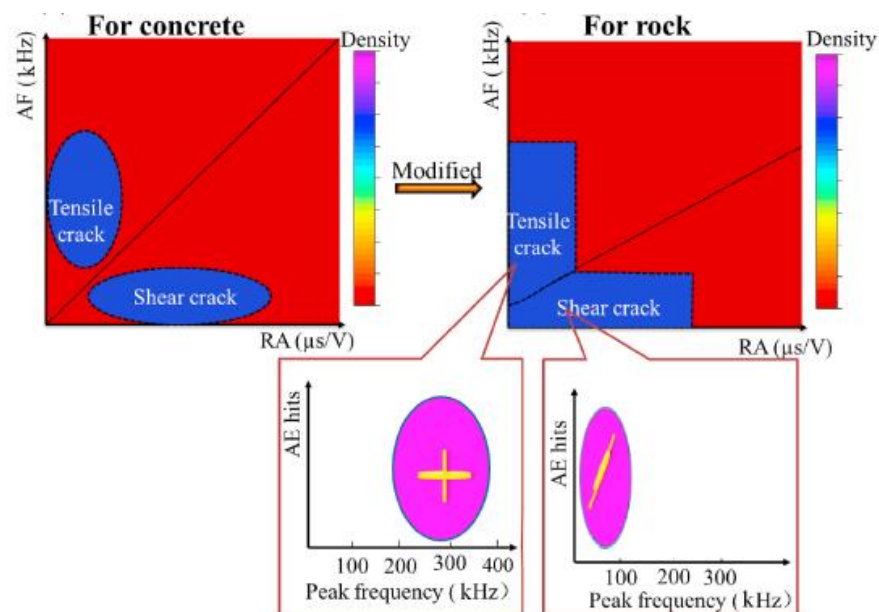


Fig. 1.8. Clasificación de los tipos de fractura en función de los parámetros RA y frecuencia promedio (AF) [Modificado de K. Du et al 2020].

Fisuras por tracción de corta extensión y rápida propagación inducen señales con EA que contiene altas frecuencias pico en una banda de 100 a 400 KHz. En las fracturas por corte se puede establecer que las frecuencias pico predominantes son por debajo de 100 kHz. Por lo tanto, las frecuencias pico asociadas a los ensayos BITT y TPBT son comúnmente mayores que las señales de los ensayos MST y UCT. De esta manera se establece que la escala de la

fractura es una de las variables más importantes que afecta la frecuencia dominante y la energía de la EA. Una disminución de la frecuencia pico y un aumento de la energía indicarían que el mecanismo de fractura cambio de escala, donde eventualmente estos cambios podrían ser utilizados como precursores para analizar el cambio de comportamiento o rotura explosiva de la roca. [M. Ohnaka y Mogui 1981 y 1982, J. Zhang 2018].

Las fallas dominadas por corte emiten más que las fallas dominadas por tracción y los tipos de ensayos donde la sollicitación produce múltiples tipos de fisuras son más emisivos respecto de aquellos en los que se producen fisuras de un solo tipo. Las microfracturas durante la falla por tracción se propagan principalmente a lo largo de la superficie externa de la microestructura, es decir que las fisuras por tracción son principalmente intergranulares mientras que durante la falla por corte son producidas por microfracturas intergranulares y transgranulares, donde la energía de deformación elástica liberada por la fractura transgranular es mayor que la liberada por fractura intergranular. En la tabla 1.4 se muestra una clasificación de éstas en relación a la sollicitación y la frecuencia.

Tabla 1.4. Comparación de las características de la EA respecto los tipos de micro-fisuras [Modificado de K. Du et al 2020]

Tipo de microfisura	Tipo de fractura	AF/RA	Frecuencia pico de EA	Intensidad de la propagación de la fractura
Fractura por tracción	Fracturas intergranulares	Principalmente distribuido a lo largo de dirección de cambio de AF	Principalmente distribuido en el rango de los 200 a 400 kHz	Muy moderada
Fractura por corte	Fracturas intergranulares y transgranulares	Principalmente distribuido a lo largo de la dirección de cambio de RA	Principalmente distribuido en valores inferiores a 100 KHz	Intensa
Fractura predominantemente por tracción con componentes de corte y fractura mixta.	Fracturas intergranulares y transgranulares	Principalmente distribuido a lo largo de dirección de cambio de AF	Principalmente distribuido en el rango de los 100 a 400 kHz	Moderada
Fractura predominantemente por corte con componentes de tracción y fractura mixta.	Fracturas intergranulares y transgranulares	Principalmente distribuido a lo largo de dirección de cambio de AF	Principalmente distribuido en valores inferiores a 100 KHz	Muy Intensa

Finalmente, la energía de deformación elástica liberada por las microfisuras por cizallamiento es mayor que la liberada por las fisuras de tracción en la misma condición. Y es debido a esto que la energía de la EA producida por la falla por cizallamiento es más que la generada por la fractura de tracción en las mismas condiciones. Este comportamiento de las fracturas permite clasificar las características de la EA en función de la emisividad y rango de frecuencia.

1.4.9. Análisis de Efecto Káiser en rocas

El análisis del efecto Káiser en las rocas tiene la potencialidad de ser utilizado como indicador de las condiciones de tensión a las que estuvo sometida la roca respecto de las condiciones actuales. El efecto Káiser no está siempre presente y es dependiente del tipo y nivel de sollicitación mecánica, la presión de confinamiento, umbral de detección, tamaño de grano, porosidad, mineralogía de la roca etc. [M. Hayashi et al 1979, D. Holcomb 1983, C. Sondergeld et al 1981, E. Nordlund et al 1990)]. Esto hace que no siempre se pueda evaluar correctamente la ocurrencia del fenómeno como está ampliamente documentado en los materiales metálicos [M. Gómez 2012]. *Si en una roca en particular se verifica la existencia del efecto Káiser, entonces, se puede estimar un grado de daño irreversible en función de la tensión aplicada.* D. Blanksma 2011 aplicó al análisis del efecto Káiser un software dedicado a encontrar el cambio de pendiente de la emisión de EA para calcular así el nivel de carga al que había estado sometida la roca en un ensayo de compresión uniaxial con dos rampas de carga. La Fig. 1.9 muestra la EA acumulada en función de dos ciclos de carga, donde el análisis de la inflexión de la pendiente en el gráfico de emisión en función de la tensión puede relacionarse con la tensión máxima previa a la que estuvo sometida la muestra. Potencialmente la aplicación del efecto Káiser en roca debe ser analizada en función de la roca en cuestión y de los ensayos pertinentes que demuestren la aplicabilidad de esta forma de análisis.

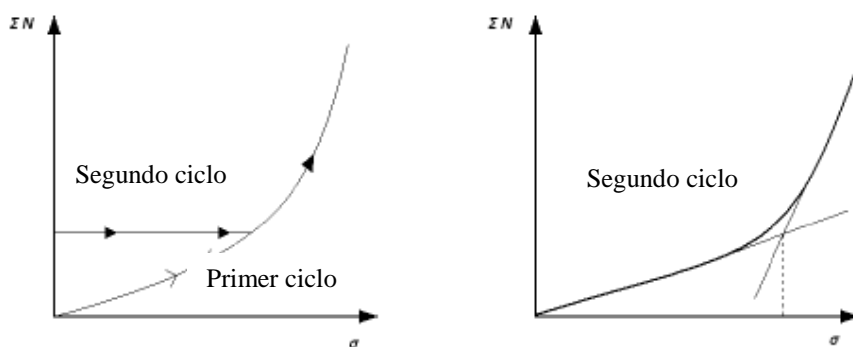


Fig. 1.9. Utilización del efecto Káiser para determinar la carga previa del material rocoso, [Modificado de D. Blanksma 2011].

1.4.10. Localización de hipocentros de EA a partir del tiempo de llegada de los datos

La técnica de EA permite evaluar en tiempo real la aparición y propagación de las fracturas mediante la localización de la fuente, midiendo los tiempos de llegada de las ondas elásticas a los diferentes sensores. Existen consideraciones a tener en cuenta como la cantidad de sensores, las variaciones en la velocidad de propagación en función de la fractura del material etc. Se ha comprobado que con altas tensiones deviatorias, se desarrolla una anisotropía en la velocidad de propagación que pueden afectar la propagación de las ondas p entre un 40 a 50 %, lo que hace importante considerar el cambio de las propiedades del material y realizar las correcciones correspondientes para el cálculo de posicionamiento [T. Yanagidani et al 1985, D. Lockner et al 1977]. En la Fig. 1.10 se muestra la curva tensión deformación y diferentes cortes de la ubicación de las fuentes de EA dentro de la probeta una probeta cilíndrica.

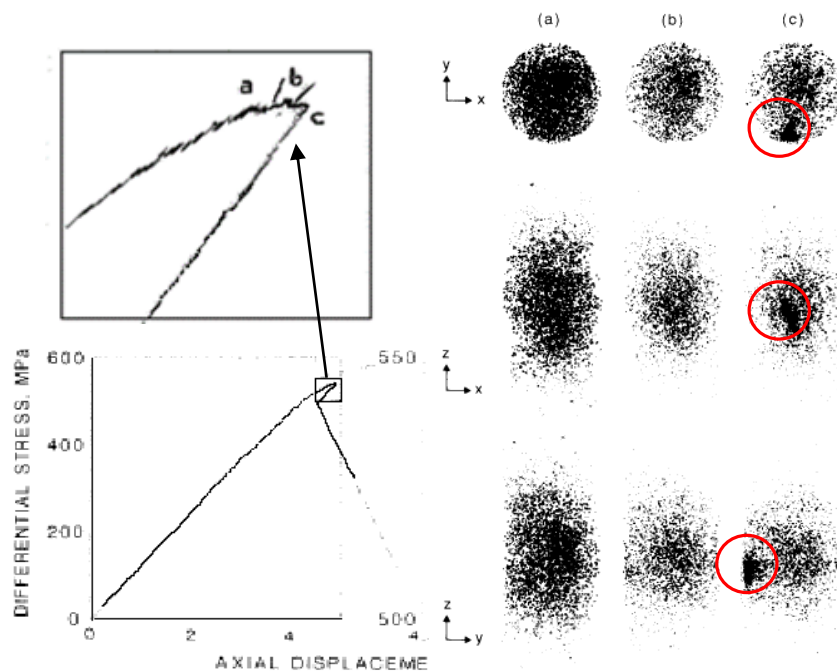


Fig. 1.10 Curva tensión deformación y distribución de eventos de EA en una muestra de granito confinada a 50 MPa. a. Pre-nucleación de eventos, b. periodos de pre-nucleación incluyendo pico máximo de tensiones en $t=900s$. c. Fase de nucleación de fisuras y colapso. [Modificado de Lockner 1993.]

El análisis en tiempos diferidos muestra la secuencia de señales de EA producto de la pre-nucleación y colapso final de la probeta. La zona a y b en la curva tensión–deformación hasta el pico de carga máxima muestra las fuentes de EA producto de la nucleación micro fisuras distribuidas de manera uniforme. La fase c muestra un abrupto cambio de agrupamiento,

donde las microfisuras se encuentran localizadas en regiones específicas de la probeta. El cambio de nucleación de micro fisuras homogéneamente distribuida con tamaños iguales o inferiores al tamaño de grano del material representa un cambio de escala y distribución espacial al converger en una macro fisura que produce la falla del material.

La muestra pasa por una transición de fase que ha llevado a la aplicación del concepto de criticidad autoorganizada para desencadenar un proceso principal como terremoto o fractura. Una microfisura aislada en un estado de tensional de compresión no puede crecer indefinidamente sin la continua aplicación de energía de deformación. Por lo tanto, la falla macroscópica parece ser la culminación de un proceso dominado por la interacción de microfracturas. Análisis más específicos de posicionamiento de eventos demostraron que las fracturas que ocurren en un radio determinado, cercano a la fractura inicial, tienen una probabilidad mucho más alta de aparición que las ocurridas a una distancia determinada las cuales parecen aparecer de manera más aleatoria. Debido a que la tensión producida por la perturbación alrededor de la punta de la fisura decrece con el cubo de la distancia, no es de sorprender que exista una correlación entre fisuras en función de la distancia, comparable con el tamaño de grano [L. Costin 1987, Ashby et al 1990, Horii et al 1985].

La posibilidad de posicionamiento y análisis temporal de la distribución de eventos de EA hacen que esta técnica sea una herramienta muy poderosa a la hora de caracterizar el proceso.

1.5 Estado del arte del conocimiento de la EA relacionado con los procesos de perforado en geomateriales

La información presente en esta sección busca mostrar el estado actual de los trabajos de investigación relacionados con los puntos troncales analizados en el presente trabajo. La Fig. 1.11 muestra como punto de partida la aplicación de la técnica de EA como metodología para el estudio del proceso de desintegración (perforación) de material geológico. Existe mucha información y trabajos de carácter científico – tecnológicos en cada uno de los puntos estudiados, por el contrario, no se encuentra mucha disponibilidad de trabajos que interrelacionan todos los campos estudiados. La aplicación de una exitosa metodología dedicada al monitoreo y caracterización de materiales, durante el proceso de corte de un geo material debe poder ser precisa, relativamente económica, de procesamiento rápido y de fácil implementación en varias condiciones de operación.

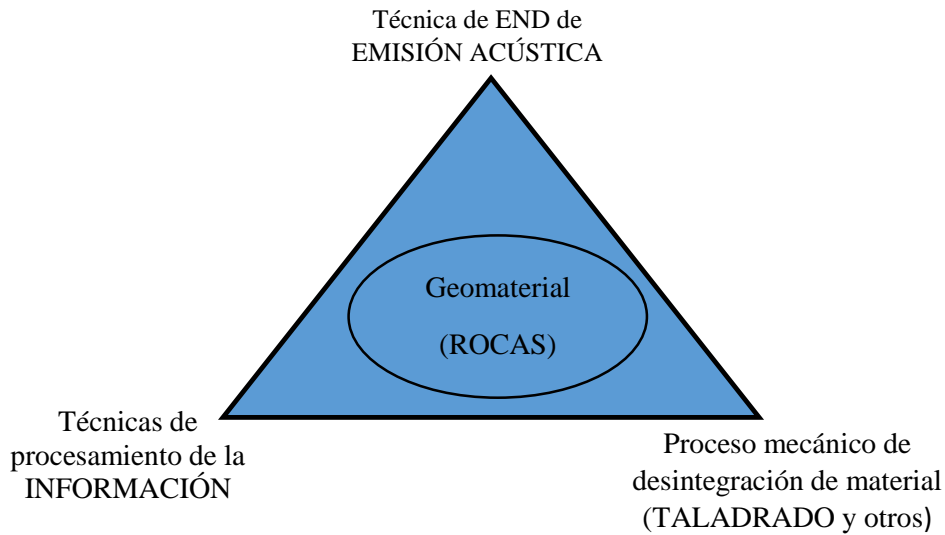


Fig. 1.11. Puntos básicos de estudio de la presente tesis y marco donde se realiza la búsqueda bibliográfica.

Estos sistemas o métodos pueden ser integrados en línea durante las operaciones y brindar una estimación de las propiedades geomecánicas de los materiales, asistencia de soporte en sistemas de monitoreo y navegación de herramientas, toma de decisión u optimización de las condiciones operación durante el corte en espacios confinados tipo minería, perforación de petróleo y gas, toma de muestras geológicas, perforaciones para aplicaciones geotérmicas, etc. En base a la bibliografía a continuación presentada, la EA se muestra como una metodología que puede cumplir con varios de los aspectos mencionados. Los trabajos seleccionados se agruparon según el foco de análisis donde se puede establecer aquellos que apuntan mayoritariamente a la evaluación de las propiedades geomecánicas del material perforado o al monitoreo de la condición de proceso

1.5.1. Trabajos que relacionan la EA con las propiedades geomecánicas del material

Muchos de los trabajos realizados en los primeros años y en adelante ubican al análisis de las ondas elásticas y a la EA en los rangos de frecuencias establecidos en la Fig.1.12, mientras que en la actualidad la EA está más acotada al rango de 30 kHz a 1 MHz.

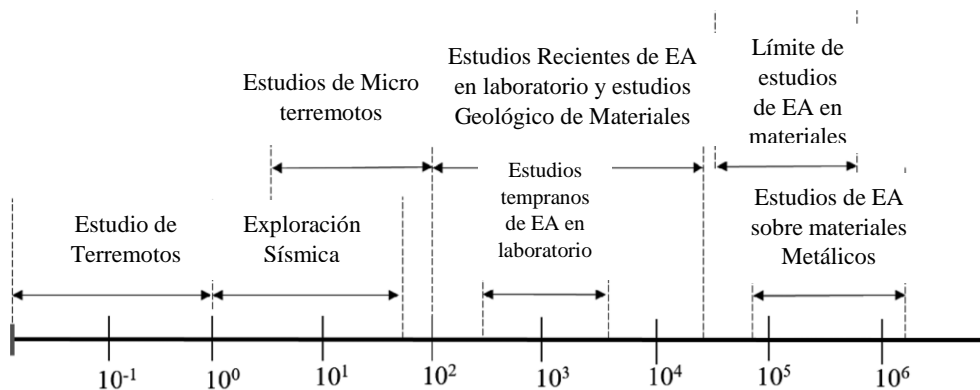


Fig. 1.12. Rango de frecuencias de ondas acústicas y su aplicación en diferentes campos [Modificado de Hopwood y McGogney 1987].

En función de estos rangos, se puede asociar la utilización de frecuencias inferiores a la microsísmica (utilizadas en la prospección del subsuelo, detección de fenómenos terrestres puntuales, etc.) y aplicaciones en frecuencias superiores están relacionadas a técnicas de END de ultrasonido utilizada para la detección discontinuidades estáticas en metales u otros materiales. Estas diferencias en la aplicación son debido a que la información que revelan las ondas elásticas, están asociadas con la longitud de onda en función del tamaño del objeto que produce la radiación de la EA. Históricamente se pueden encontrar trabajos que apliquen el estudio de ondas elásticas en pozos de perforación a cientos de metros de la fuente que las irradian o casos donde se evalúan procesos mecánicos mediante la aplicación de micrófonos que captan frecuencias audibles del proceso mecánico, como lo haría el oído humano, cuando en la actualidad (y por el límite de frecuencias actualmente definido para la EA) por tratarse de ondas ultrasónicas, no podríamos escuchar este tipo de emisiones.

Knill et al (1968) realizó una extensa recopilación de diferentes tipos de aplicaciones de la EA en la investigación de materiales geológicos, y realizó trabajos donde monitorea la EA durante ensayos UCT sobre muestras de rocas, midiendo parámetros de EA como cuentas, eventos y distribución de amplitud. Concluyó que es una técnica de amplia utilización en el campo de la mecánica de rocas, donde mostró que podría ser aplicada en el control de trabajos de ingeniería sobre rocas y excavaciones. También aclaró que la técnica podría ser malinterpretada y para obtener buenos resultados debería utilizarse de manera complementaria con otras mediciones. Uno de los primeros trabajos que relacionan el análisis de las ondas elásticas producidas durante el proceso de perforación en geo materiales fue realizado por Niitsuma y Chubachi (1986). En este trabajo se analizaron las ondas elásticas que llegaban desde una perforación realizada con una herramienta de tipo tricono a un pozo paralelo, adyacente a 150 m de distancia. Los resultados mostraron que el parámetro RMS de la señal recibida podía ser usado como parámetro para realizar una caracterización del suelo perforado y que los niveles de alto o bajo RMS (alta o baja energía) podrían ser asociados variaciones en la compactación del geo material y a zonas de unión en un mismo tipo de estrato. También pudieron extraer información en la caracterización de eventos propios del proceso de perforación relacionado el rozamiento de los collares de peso, escariado de la perforación y otros procesos. [Asanuma (1988), Niitsuma y et. al (1990)] realizan estudios con herramientas de tipo tricono donde establecen una correlación entre la amplitud media del RMS de las señales y la dureza de la formación taladrada. Relacionaron también la amplitud de los picos de la señal del RMS y su decaimiento con las propiedades de los materiales perforados (duros y blandos) debido a que se modifica la mecánica del

proceso de corte y por lo tanto la respuesta acústica del tricono modifica su emisión. Otro fenómeno que fue descrito es el aumento de emisión en altas frecuencias cuando la taladrabilidad de la roca disminuye.

S. Jung et al (1994) realizó un estudio de indentación sobre materiales rocosos clasificados en duros y blandos sobre muestras de 36 a 100 mm de diámetro las cuales son sometidas a un proceso de corte lineal y fractura con un indentador de 3 mm de diámetro. En estos ensayos se monitorizó la EA del proceso y la fuerza de corte aplicada sobre la herramienta en todo momento. Mediante la utilización de los parámetros amplitud de eventos y cuentas acumuladas de EA, se pudo establecer una relación con la fuerza y el desplazamiento del indentador. El parámetro de EA más prometedor para caracterizar el tipo de roca fue el RMS de la EA integrado durante el tiempo total del proceso de indentación. M. Zborovja et al (2003) estableció que en las perforadoras rotativas existen tres fuentes básicas de ruido pertenecientes a la motorización y cadena cinemática de la maquinaria, la interacción entre la herramienta de corte y la roca y por último el líquido de enfriamiento y remoción de material cortado. Ensayos previos establecieron un rango de 5000 a 8000 Hz donde se encuentra información relacionada con la firma acústica de la roca, a su vez, la mitad inferior de este espectro está altamente relacionado con la motorización del equipo y el fluido de refrigeración. Finalmente, luego de realizar perforaciones en diferentes materiales y monitorear el sonido en los rangos de frecuencias especificados, se procede al cálculo de los coeficientes del espectro de potencia, y transformación de estos a la escala de MEL. Posteriormente con los coeficientes de MEL se entrena un modelo de Inteligencia Artificial (HMM, modelo Markov oculto) con el cual logró clasificar el tipo de material perforado. Lesso et al (2007) utilizó el sonido producido durante la perforación de rocas tipo mármol, cuarzo y caliza para caracterizar la perforación. Observó que las señales producidas durante el perforado tenían característica periódica mezclada con características estocásticas. Asumió que la componente periódica estaba relacionada con el giro de las herramientas de perforación y la componente estocástica se relaciona con el carácter aleatorio del proceso de desintegración de la roca. Los análisis realizados sobre las señales incluyeron la descomposición del espectro en frecuencias dominantes y en base a esto construyó histogramas de las frecuencias y amplitudes asociadas. En su trabajo concluyó que estas variables se ven afectadas por las propiedades geomecánicas del material perforado.

B. Kumar et al 2010 utilizaron el sonido emitido durante la perforación de suelos con una perforadora para colocación de explosivos utilizada en las minas de extracción de recursos naturales. Realizaron perforaciones de 6 a 8 metros de profundidad con un diámetro de 150

mm y una broca carburo de tungsteno. En estos ensayos se utilizó un micrófono a una distancia de aproximadamente 1 metro del suelo y a una distancia variable de la perforación para adquirir las ondas elásticas provenientes del proceso. Conjuntamente durante la perforación, la señal fue registrada y procesada por un analizador de un octavo de banda y los resultados de la potencia de la amplitud en función de las frecuencias, fue relacionada con las diferentes estratigrafías que se iban atravesando durante la perforación. Finalmente, se pudo observar que las rocas de mayor dureza producían un nivel acústico mayor que aquellas de dureza inferior, por lo que propuso a este indicador como posible, para su utilización en el reconocimiento de las propiedades del material. B. Kumar et al (2011) realizó el monitoreo del nivel de sonido acústico (rango de sonido audible) de perforaciones realizadas con brocas de carburo de tungsteno en diámetros 6 a 20 mm, sobre una gama diferente de rocas las cuales estaban mecánicamente caracterizadas mediante ensayos de UCT, ensayos de Schimdt y cálculo del módulo de Young entre otras propiedades. Posteriormente aplicó métodos de regresión lineal para relacionar el nivel de sonoridad acústica respecto de las propiedades mecánicas de los materiales. En base a lo anterior pudo determinar fórmulas empíricas para predecir las propiedades mecánicas de las rocas perforadas en función del nivel del sonido digitalizado. Yari et al (2017) implementó un sistema de perforación que permite regular la fuerza de avance, las rpm y utilizar brocas intercambiables con el fin de evaluar la emisión sonora durante la perforación de diferentes rocas ígneas. Estas rocas fueron previamente caracterizadas mediante ensayo de compresión uniaxial, ensayo de Schmidt, medición de porosidad, medición de velocidad de propagación de ondas elásticas P y S y otras propiedades. Los análisis realizados consisten en aislar cinco componentes mayoritarios del espectro de frecuencias audibles y mediante métodos de regresión asociar estas frecuencias características a las propiedades mecánicas de cada roca. Los resultados muestran que utilizando entre dos y cuatro de estas frecuencias predominantes se puede hacer una satisfactoria predicción de las propiedades físico-mecánicas del material y por lo tanto del tipo de roca que se está taladrando. D. Crosland et al (2019) realizó ensayos de corte lineales sobre muestras compuestas por roca arenisca, carbón y yeso y realizó el monitoreo del proceso mediante EA. Los resultados expuestos muestran una modificación poco significativa de las frecuencias mayoritarias dominantes en el rango de la EA cuando se varían la velocidad y la profundidad de corte de la muestra. A su vez, estas frecuencias dominantes en la EA muestran una variación importante del espectro a medida que se cambia el material cortado. K. Wang et al (2020) realizó ensayos de laboratorio donde analizó secuencias de perforación con brocas de diamante policristalino

(PDC) de 75 mm de diámetro sobre muestras de roca arenisca, caliza, y otras. Las probetas se encontraban instrumentadas con micrófonos donde uno de los cuales contaba con un dispositivo de focalización acústica. Las señales acústicas adquiridas tienen una duración inferior a un minuto y sobre ellas se aplicaron técnicas de análisis de transformada corta de Fourier (STFT) y transformada rápida de Fourier (FFT), centralizando el estudio en la banda de 15 a 25 kHz. Posteriormente aplicaron técnicas de análisis del espectro de la densidad de potencia y análisis de coherencia entre las señales de los dos sensores involucrados. También aplica la metodología de componentes principales respecto a la información en frecuencia con el objetivo de clasificar la información perteneciente a las diferentes rocas. Los resultados muestran que utilizando las transformadas corta y rápida de Fourier se pueden discriminar las frecuencias correspondientes a la perforación de las diferentes rocas con ambos montajes de sensores, aunque el provisto con la cavidad acústica focalizadora muestra una relación señal ruido muy superior. La clasificación obtenida mediante la aplicación de componentes principales sobre la función de densidad de Kernel de las características de frecuencia de las perforaciones logró discriminar el tipo de material perforado. Finalmente M. Khoshouei et al 2020 experimentó con el taladrado de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas y la EA emitida por el proceso. Estas muestras fueron caracterizadas primeramente mediante medición de la velocidad de propagación de las ondas P, ensayos UCS, BTS y SNR. Sobre las señales recolectadas se les calculó el rms y se observó que los valores más altos de este parámetro se relacionan con las rocas ígneas (mayor dureza y límite de fractura), los niveles intermedios de rms están relacionados con las rocas metamórficas y las de menor rms con las rocas sedimentarias (menor dureza y límite de fractura).

1.5.2. Trabajos que relacionan la EA con el monitoreo del proceso de corte

X. Sun et al (1999) realizó ensayos con una herramienta rotativa de carburo de tungsteno durante la perforación de geomateriales, donde concluyó que los parámetros cuentas y eventos de EA aumentan linealmente en función del tiempo, por lo que las tasas de eventos y cuentas permanecen constantes. También observó que el número de cuentas total de EA obtenido con una herramienta nueva era mayor que con una herramienta gastada, pudiendo adicionalmente utilizar técnicas de reconocimiento de patrones para clasificar las diferentes condiciones del proceso. Williams y Hagan (2006) utilizaron brocas de carburo de tungsteno para realizar perforaciones sobre material de carbón y concluyeron que las señales de EA correspondientes a una herramienta gastada tienen un valor de RMS de EA inferior a las

herramientas nuevas. Futó et al (2003 y 2005) realizaron ensayos de perforación en roca andesita y granito con diferentes presiones de avance, rpm, tasas de penetración y desintegración de la roca. Midiendo el nivel de sonido durante el proceso, se pudieron establecer los patrones sonoros correspondientes a las condiciones más eficientes de perforación (mayor nivel de desintegración en función de la fuerza aplicada). Se determinó que es posible reconocer la mejor condición de perforación y su variación con el tipo de material perforado mediante el análisis de las frecuencias representativas del nivel del sonido equivalente. También relacionó la distribución de amplitud en función de la frecuencia, con los parámetros del proceso de perforación y los criterios de optimización para el perforado. Mostrando que el análisis de la emisión sonora puede ser eventualmente utilizado para controlar el proceso y conducirlo a trabajar en los parámetros óptimos de perforación. Milkusova et al (2006) presentó una perforadora de laboratorio para simular la desintegración de la roca durante la perforación con pequeñas brocas y mediante un análisis apropiado de los datos, la FFT de la emisión acústica obtenida durante la perforación puede ser utilizada para controlar el proceso de taladrado. H. Vardhan et al (2009) analizó la potencia sonora del taladrado sobre diferentes rocas mediante la utilización de un martillo neumático, pudiendo mediante análisis en frecuencia, discernir los sonidos mecánicos del martillo, el escape y las resonancias pertenecientes a las partes móviles del martillo que interactúan con la perforación. Durante los ensayos fue necesario modificar las presiones de trabajo para obtener tasas de penetración comparables en cada uno de los geomateriales estudiados. En sus estudios concluyó que los diferentes niveles de potencia de las señales adquiridas estaban relacionados con las propiedades mecánicas de la roca como dureza y abrasividad. En general, estableció que a mayor dureza de la roca, mayor intensidad sonora. C. Gradl et al (2011) analiza la relación entre las características acústicas de un cortador tipo tricono respecto de un cortador de PDC (diamante policristalino) y un cortador de diamante. En sus estudios utilizó la transformada rápida de Fourier (FFT) para reconocer el cortador analizando las frecuencias que componen la emisión. Adicionalmente, para el cortador de PDC y de diamante, pudo establecer que la frecuencia normalizada (frecuencia respecto de las rpm de la perforación) puede ser relacionada con la teoría de corte y el mecanismo de adhesión y deslizamiento en función de la geometría del cortador y el número de dientes del mismo. Posteriormente, M. Klaić et al. (2014) ensayó brocas helicoidales de 5 mm de diámetro con el fin de asociar los valores de corrientes consumidas por el giro y el avance del centro de mecanizado y la fuerza de corte en condiciones de broca nueva y broca gastada. Luego, mediante algoritmos de aprendizaje de máquina (tipo árbol de decisión) alimentado

con 8 parámetros calculados a partir de las mediciones de corriente, logra clasificar las diferentes condiciones de perforado con una eficiencia del 90%. Si bien el trabajo anterior no utiliza la EA para el análisis, es interesante evaluar la cantidad de parámetros que debieron ser utilizados para alimentar un sistema de IA para la tarea de clasificación en un proceso de perforado de geomaterial. P. Flegner et al (2014) realizaron ensayos en especímenes de roca tipo andesita, arenisca y limolita, sobre las cuales realizaron perforaciones y digitalizaron el sonido de durante el proceso. Utilizaron diferentes combinaciones de presiones de avance y rpm durante los ensayos. Una vez confirmada que la naturaleza de las señales es aleatoria, estacionaria y ergódica, aplicaron análisis en tiempo, frecuencia, y tiempo-frecuencia. Para el análisis temporal utilizaron análisis de distribución de probabilidad de amplitud el cual mostró una satisfactoria clasificación de los tipos de rocas taladradas, así como la configuración mecánica utilizada para los procesos (presión y avance). A su vez, los análisis en frecuencia y frecuencia-tiempo mostraron variaciones entre los tipos de roca lo que permitió, eventualmente, clasificar el material perforado. Karakus et al (2014) y Perez et al (2016), estudiaron el proceso de perforado con brocas de diamante sobre materiales rocosos de diferentes durezas mediante el análisis de la EA, el torque y la fuerza de avance del proceso. Estas perforaciones se realizaron a altas velocidades de corte (1600 rpm) con avances y torques variables. La instrumentación de EA del sistema fue realizada sobre la muestra a ser taladrada y sobre la estructura de la máquina de perforado debido a la imposibilidad de instrumentar la herramienta rotante. Mediante ensayos de correlación validaron las señales de ambos caminos sónicos (probeta y máquina) y concordaron que las mismas muestran similitud en su comportamiento. En ambos casos se debió realizar un proceso de filtrado, ya que las señales contienen información proveniente de los ruidos mecánicos propios del sistema de perforación. Los resultados muestran que la disminución de la profundidad de corte (menor grado de avance por revolución) produce una reducción de la amplitud de la EA. Un grado de avance grande (mayor a 80 μm) produce un proceso de desintegración más agresivo con la ocurrencia de microfisuras en la roca y en el diamante que aumentan la amplitud de la EA. Los grados de avances reducidos producen la desintegración de la roca mediante mecanismos arrastre y molienda con mayor fricción. Cuando se aumenta el torque y la fuerza de avance también se obtiene un aumento de la amplitud de la EA y se verifica una disminución de la amplitud EA a medida que la broca se desgasta, con un leve aumento de las frecuencias pico en función del aumento del desgaste. Posteriormente utilizaron el torque, la fuerza de avance y los parámetros de EA para entrenar sistemas supervisados y no supervisados de clasificación de información como

ST (*simple decision tree*), SVM (*support vector machine*), KNN (*k-nearest Network*), BT (*booted tree*), ANN (*artificial neural network*) a fin de evaluar el estado de la herramienta nueva y desgastada. Los resultados muestran que el rms de la EA y el torque son los parámetros más prometedores para utilizar en los procesos de monitoreo, marcando una remarcable similitud con el trabajo de M. Gómez et al (2010) realizado para el perforado de metales.

S. Tian et al (2017) realizó el monitoreo mediante EA de un proceso de perforación sobre roca mediante chorro de agua a alta presión, donde colocó al sensor de EA dentro de la cuba de agua sumergida junto a la probeta de roca sedimentaria. En este trabajo se utilizó el espectro de potencia y su integración en frecuencia para cuantizar la energía del proceso de desintegración en diferentes materiales sedimentarios. La experimentación mostró que existe una correlación positiva entre la energía de la EA y la eficiencia de perforación, y una correlación inversa entre la energía de la EA y la profundidad de perforación del chorro de agua. Y. Kawamura et al (2017) realizó ensayos de perforación con una broca de PDC de 45 mm de diámetro sobre material geológico en una mina, y utilizó una videocámara que graba imagen y sonido del proceso de perforación con el fin de identificar señales que puedan predecir la eventual rotura de alguno de los diamantes cortadores. La información de sonido adquirida fue sometida a análisis mediante FFT, onditas y media móvil. El análisis de onditas juntamente con la aplicación de la media móvil sobre la intensidad de la EA, mostraron sensibilidad al analizar la amplitud de la emisión en las bandas de frecuencia relacionadas con la fractura. El análisis de FFT no mostró capacidad de detectar estas alteraciones relacionadas con la fractura del cortador. M. Qin et al (2018) estudió el sonido de la perforación mediante un sistema construido en laboratorio para perforar diferentes tipos de rocas. Durante el trabajo comparó las señales de vibración del sistema de perforación respecto de las señales acústicas producidas durante el proceso de perforado de muestras geológicas cuando se utiliza una broca de PDC. La instrumentación para captar las señales acústicas constó de un sistema de focalización que contiene el micrófono en su interior. El estudio mostró que tanto el análisis de vibraciones como el sonido pueden ser utilizados para caracterizar el proceso y pueden ser relacionados con el tipo de roca que se está taladrando. También demostró que las señales acústicas recolectadas de los cuatro tipos diferentes de rocas ensayadas tienen una significativa diferencia en sus características espectrales, lo que puede ser utilizado como una técnica prometedora para las investigaciones petrológicas. Adicionalmente, mostró que el sistema de montaje con focalizador acústico tiene una relación señal–ruido superior respecto de las señales pertenecientes a las vibraciones

mecánicas. Xiao et al (2018) detalla los ensayos de perforación y EA realizados con una broca de diamante y vibración activa de la misma (oscilaciones durante la perforación). La instrumentación de EA fue montada sobre los especímenes a ser taladrados. Los resultados muestran que al aumentar la fuerza de penetración conocida por sus siglas en inglés “WOB” (*Weight Of the Bit*) se reducen las frecuencias máximas de la EA (reducción de los parámetros de frecuencia media y centroide de frecuencia de la EA) y aumenta la energía de EA detectada por el sistema. Un aumento de la fuerza de perforación provoca fracturas de mayor tamaño y por lo tanto de menor frecuencia. Este efecto se verifica también con el aumento de la vibración de la broca, lo que mejora la tasa de perforación y puede ser nuevamente asociado a un proceso de fractura de mayor escala, produciendo el mismo efecto en las frecuencias máximas de la EA.

En uno de los últimos trabajos evaluados a la fecha, S. Liu et al (2021) analizaron la EA y la fuerza de corte durante el proceso de corte lineal de muestras de carbón pertenecientes a diferentes tipos de minas y aplicaron varias técnicas de análisis de la información recolectada. La evolución de energía de la EA (intensidad y densidad de las señales de EA) está asociada a las diferentes etapas del mecanismo de corte. Muestran que la dimensión fractal del tiempo del parámetro de energía de la EA puede ser asociado a la intensidad del daño y utilizado como precursor de la aparición de la fuerza pico durante el proceso de corte (lo que está asociado a la fractura del instrumental). También analizaron la forma de onda y las frecuencias dominantes durante la aparición de las fuerzas pico de corte, concluyendo que ambas características permanecen semejantes para cada uno de los tipos rocas de carbón sometido a ensayo.

La información presentada muestra que el proceso de emisión de ondas elásticas tiene una estrecha relación con muchos de los factores intervinientes en el proceso de corte de un material. Luego en función del tipo de instrumentación utilizado, los rangos de frecuencia analizados, las técnicas de procesamiento de la información y otros factores se puede extraer información relacionada con el proceso de desintegración y las características geomecánicas del material. Muchas de las técnicas evaluadas analizan espectros de frecuencia inferior al ultrasonido, lo que hace que actualmente estén un poco más alejados del rango de la frecuencia de la EA. Adicionalmente, muchos trabajos analizan la energía o amplitud (rms) de la señal emitida, y en general dejan fuera del análisis otros parámetros de la EA que eventualmente podrían ser útiles. La amplitud de la emisión es muy dependiente de las condiciones del proceso, por lo que es posible que una descripción más completa del comportamiento del sistema sea mostrada por varios parámetros evaluados de manera

simultánea (evaluación multiparamétrica). Un presente desafío es el de poder utilizar esta información en línea para que asista a las operaciones de perforación de manera rápida y evitar o disminuir los problemas relacionados con el proceso de taladrado o predecir futuras acciones en función de los cambios de las propiedades mecánicas del material que se perfora.

1.6. Sistema de EA

1.6.1. Sensores de EA

Sensores de EA. Se denomina “sensor de EA” a aquel transductor que se utiliza para la detección de señales de EA en el campo de los END. Estos transductores convierten el movimiento (ondas elásticas), en una tensión eléctrica que es la señal de EA que será acondicionada, registrada y analizada. Los sensores se acoplan a la superficie de la pieza detectando la pequeña variación dinámica del desplazamiento de la superficie. Existe una gran variedad de sensores que dependen de diferentes principios físicos para la transducción, variando también en formas y tamaños. En EA los transductores más usados son piezoeléctricos, capacitivos e interferométricos.

Sensores piezoeléctricos

Los sensores de tipo piezoeléctrico son los más utilizados para la detección de las ondas elásticas en el rango de los ultrasonidos debido a su fácil implementación, muy alta sensibilidad y bajo costo. Estos se fabrican de diferentes materiales como ser circonato titanato de plomo (PZT) o también materiales poliméricos (PVDF).

Cuando se produce un evento de EA, la onda elástica se transmite por el cuerpo hasta la superficie de la pieza y al sensor, atravesándolo y produciendo una deformación que induce un reordenamiento de las cargas en la estructura del piezoeléctrico. Esto genera una diferencia de potencial eléctrico que es la señal de EA, esta salida eléctrica del transductor ($V(x,t)$), es la resultante de la convolución entre el desplazamiento de la superficie de la pieza ($Y(x,t)$) y la función respuesta del transductor ($T(t)$). Estos sensores tienen ciertas desventajas ya que son de un restringido ancho de banda lo cual condiciona el rango de aplicación de la EA en la industria (30 kHz a 2 MHz) y la pérdida de las características de piezoelectricidad por encima de la temperatura de Curie (200°C-300°C).

La geometría de los piezoeléctricos difiere en tamaños y formas, estas características geométricas definen la función de transferencia para un material dado. El espesor del

material piezoeléctrico está relacionado con la frecuencia fundamental de resonancia y sus sucesivos armónicos. El diámetro está ligado a la sensibilidad, que cuanto mayor sea, mayor será la sensibilidad. Sin embargo, se debe considerar el “efecto apertura”, que en el caso de ondas transversales cuya longitud de onda sea comparable al diámetro del sensor, pueden producir efectos espurios por la existencia de puntos dentro del sensor que se encuentren en distintas fases y sumen o cancelen sus efectos. Por lo general los sensores de EA están diseñados para responder a las componentes normales de movimiento. Aunque las ondas que se propaguen por el material sean compresivas o de corte, poseen por lo general una componente normal a la superficie que será detectada. Existen también sensores que pueden captar únicamente las componentes transversales de una onda elástica, estos se construyen por ejemplo con cristales de cuarzo cortados en direcciones cristalográficas específicas. En la Fig. 1.13 se puede apreciar un esquema detallando la conformación de un sensor piezoeléctrico.

Sensores piezoeléctricos de banda ancha

Su rango de respuesta en frecuencia es ancho, de 100 kHz a 1 MHz. Son de alta fidelidad y en general se utilizan para investigación en laboratorio, ya que permiten (por su ancho de banda) realizar análisis en frecuencia (Fourier u ondas), siendo los más apropiados para estudiar las fuentes de EA.

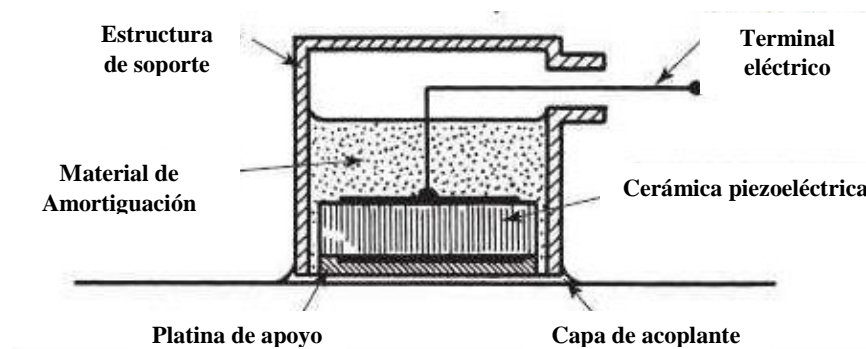


Fig. 1.13 Esquema de construcción de un transductor piezoeléctrico [modificado de Miller, Hill y Moore (2005)].

Sensores piezoeléctricos sintonizados

Estos sensores utilizan la máxima sensibilidad de los piezoeléctricos debido a que su rango de trabajo está situado en, o muy cerca, de las frecuencias de resonancia naturales del cristal. Los rangos de frecuencia son muy variados y tienen un pico de sensibilidad donde trabajan

en óptimo estado. En la Fig. 1.14 se puede observar un certificado de calibración donde se puede detectar que el pico máximo de sensibilidad se encuentra alrededor de los 150 kHz, este modelo de sensor sintonizado es ampliamente utilizado en control de tanques y estructuras.

Sensores piezoeléctricos diferenciales

Estos sensores están preparados para ser conectados de manera diferencial, con el objetivo de poder eliminar el ruido en común, los mismos son conectados a preamplificadores diferenciales especialmente diseñados y deben contar además con cables de tipo coaxial diferencial.

Sensores piezoeléctricos con preamplificador integrado

Estos sensores cuentan con un preamplificador incorporado dentro de la armadura del sensor siendo dimensionalmente algo mayor que los convencionales y se encuentran disponibles en una amplia gama de frecuencias donde los más comunes utilizan una ganancia de 40 dB.

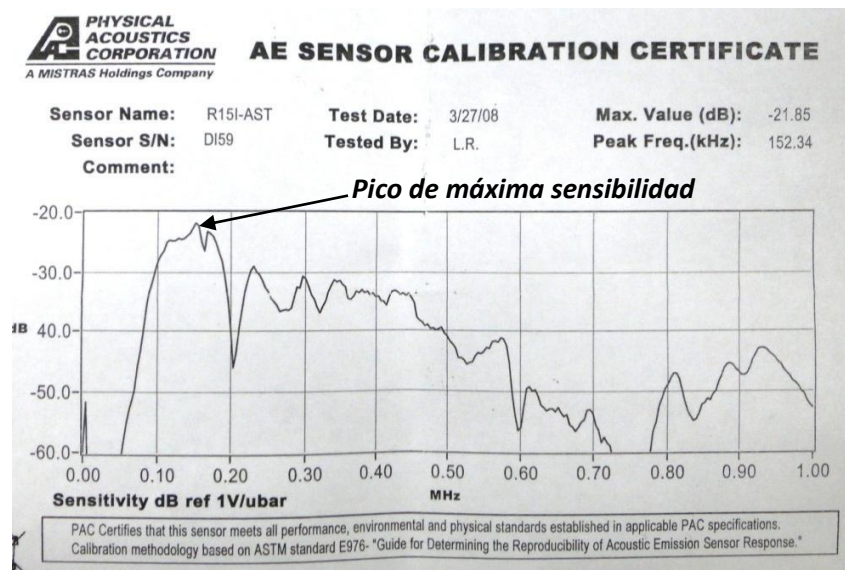


Fig. 1.14. Respuesta en dB del sensor de EA en función de la frecuencia.

La Fig. 1.15 muestra una comparación dimensional de tres tipos diferentes de sensores. Existen otros sensores con aplicaciones más específicas a los ya citados, por ejemplo, para condiciones de trabajo que superen las temperaturas de Curie. Se pueden hallar sensores que trabajen en rangos de temperatura de hasta 500°C y con amplios espectros de frecuencia. También existen sensores móviles que permiten hacer una inspección dinámica de la superficie, así como sensores sumergibles que pueden ser instalados en tanques de almacenamiento de líquido y plataformas off shore.



Fig. 1.15. De izquierda a derecha: Sensor miniatura banda ancha, sensor con preamplificador sintonizado, sensor de banda ancha con preamplificador incorporado.

En la Fig. 1.16 se puede apreciar un esquema que detalla una fuente emisora de EA generando la onda elástica que será captada por el sensor y convertida a señal eléctrica para luego ser preamplificada antes de ingresar al equipo de EA el cual procesa y almacena la señal.

Primeramente, se debe considerar que la onda elástica pasa desde la superficie del material hasta el sensor mediante un elemento acoplante, que tiene la función de equiparar la impedancia acústica. De esta manera, se logra que la energía de la onda elástica sea efectivamente transmitida entre las dos superficies. Según la fórmula $I = \rho \cdot V$, donde I =impedancia Acústica, ρ es densidad y V velocidad de propagación de la onda en el material considerado.

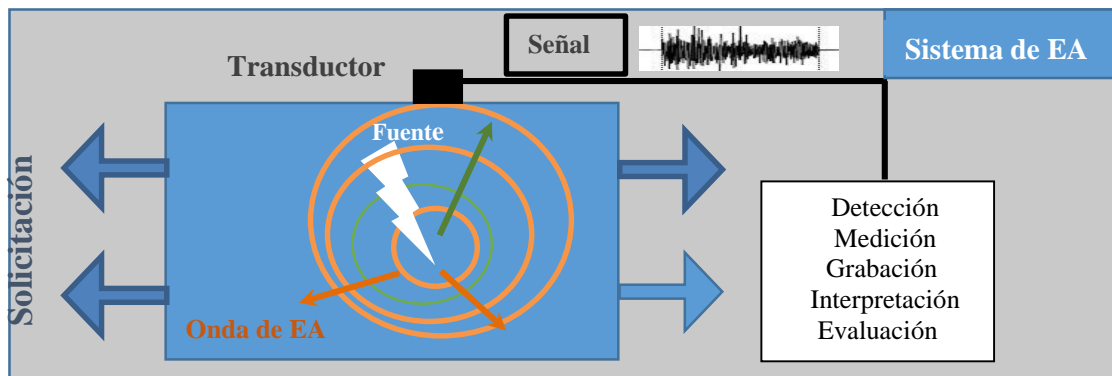


Fig. 1.16. Esquema de conjunto fuente y sistema EA.

De no existir este acoplante, en las interfaces material/sensor queda una la capa de aire remanente que produce un gran salto de impedancia haciendo que una importante parte de la energía de la onda no logre salir del material y sea reflejada. En la Tabla 1.5 figuran diferentes sustancias que pueden ser utilizadas como materiales acoplantes y sus impedancias respectivas.

Para el caso de que se quiera transmitir ondas transversales, existen acoplantes sólidos tipo epoxi, donde se debe observar que no produzcan EA debido a microfracturas cuando están adheridos a las piezas de estudio. Cada acoplante tendrá su rango de temperatura de operación y se deberá realizar antes de los ensayos, mediante algún método normalizado, la correcta verificación de la adhesión de los sensores y de la capa de acoplante.

Tabla 1.5 Comparación de propiedades de diferentes acoplantes [Gómez (2012)].

Sustancia	Densidad en 10 ³ Kg/m ³	Velocidad de ondas longitudinales en m/s	Velocidad de ondas transversales en m/s	Impedancia Acústica en 10 ⁶ Kg/m ² .s
Aceite (SAE 20 a 30)	0,89-0,961	1,74	-	1,5-1,7
Agua destizada (20° C)	1	1,483	-	1,48
Agua etílico (20° C)	0,79	1,17	-	0,92
Glicerina (20° C)	1,26	1,92	-	2,4
Aire (20° C)	0,0012	0,33	-	0,00043

1.6.2. Preamplificadores

La señal de EA producida por el piezoelectrico es de baja amplitud, entonces si la extensión del cable entre la fuente y el equipo es prolongada, la señal sufrirá una atenuación considerable con la consecuente pérdida de información debido al descenso de la relación señal-ruido. Para evitar este fenómeno, a una distancia no superior a 1,5 m, se debe colocar un preamplificador que además de amplificar la señal adapta las impedancias entre el sensor y la línea de transmisión, de allí la razón de los sensores con preamplificadores incorporados. Comercialmente existen diferentes niveles de ganancia (0, 20, 40 y 60 dB) siendo los de 40 dB los más comunes. En la Fig. 1.17 se muestran algunos modelos de estos preamplificadores. Se debe tener en cuenta que los preamplificadores son alimentados por el equipo de EA, el cual envía una corriente continua por el mismo cable coaxial por el cual recibe la señal proveniente del sensor.

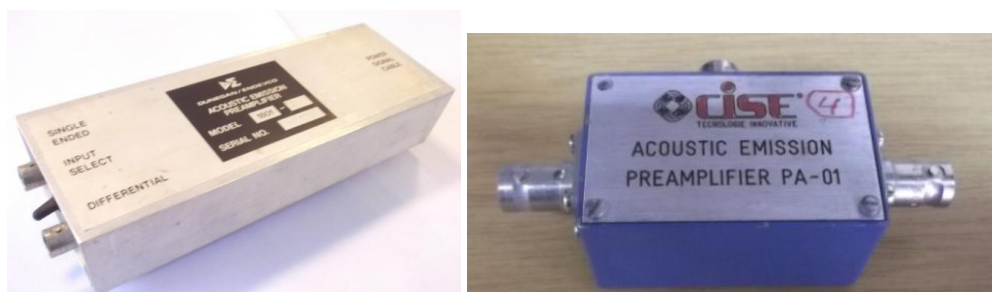


Fig. 1.17. Diferentes modelos de preamplificadores comerciales.

1.6.3. Equipo de EA: Amplificador-Parametrizador y Digitalizador

En la actualidad estos equipos suelen ser digitales y están embebidos o conectados a una PC. Los equipos de uso industrial se componen de plaquetas con varios canales los cuales se colocan en serie sobre racks para el armado de un equipo multicanal. Existen equipos de menor envergadura para uso de laboratorio como el de la Fig. 1.18 los cuales pueden ser colocados directamente en PC convencionales ya que están integrados en placas PCI. Los equipos de EA pueden tener varias decenas de canales dependiendo de las características del ensayo a realizar, el tamaño del componente, el material y sensibilidad requerida. Una vez que la señal llega al equipo vuelve a ser amplificada pero esta vez no para ser transmitida sino para ser procesada, estos amplificadores deben permitir el manejo de un amplio rango de frecuencias que puede ir desde los kHz hasta los MHz.

El primer paso en el procesamiento de la señal es el establecimiento de un valor umbral o filtrado por amplitud. Este umbral es un valor que establece el operador, donde se considera que todas las señales que lo sobrepasen serán consideradas como señales de EA y las que no lo hagan serán consideradas como ruido.



Fig. 1.18 Placa integrada PCI de EA de dos canales para PC.

Posteriormente las señales son filtradas analógicamente por un filtro pasa alto y pasa bajo que permite recortar en ancho de banda, esto se puede utilizar en el caso de que se deseen eliminar ruidos fuera de la frecuencia de interés de la señal. El paso siguiente es la digitalización de la señal en la cual se puede seleccionar la resolución en bits (desde 8 a 18 bits), así como la tasa de muestreo en función de las frecuencias a medir. Una vez digitalizada la señal, la información puede ser extraída de diferentes formas, mediante la determinación de ciertos parámetros representativos, formas de onda o señal completa (streaming).

1.6.4. Modo de adquisición Paramétrico - Parametrización

En los comienzos de la EA, los equipos trabajaban de forma analógica por lo que para caracterizar una onda era necesario crear de forma electrónica descriptores (parámetros) característicos que las definan. En la parametrización de la señal se pierde información, pero se gana en procesamiento y manejo de datos. Una de las primeras diferenciaciones que se pueden realizar es de acuerdo con el comportamiento temporal de la señal, según sea determinada o indeterminada temporalmente. Existen señales que en principio pueden no exhibir principio ni final determinado, llamadas señales continuas, y existen señales que exhiben un inicio y una finalización claramente definidos en el tiempo, las cuales suelen llamarse señales tipo explosión o “burst” y son pulsos transitorios. Ejemplos de estos tipos de ondas pueden verse en la Fig. 1.19. Otros parámetros evaluados son el RMS, Tiempo de subida, duración de la señal, Energía MARSE, Frecuencia Media, Energía Absoluta, etc. Estos parámetros están definidos en las normas internacionales como la ASTM 1316 [ASTM (1997b)] y NM 302 [IRAM (2005)]. Los mismos serán detallados con mayor profundidad, más adelante en el presente capítulo.

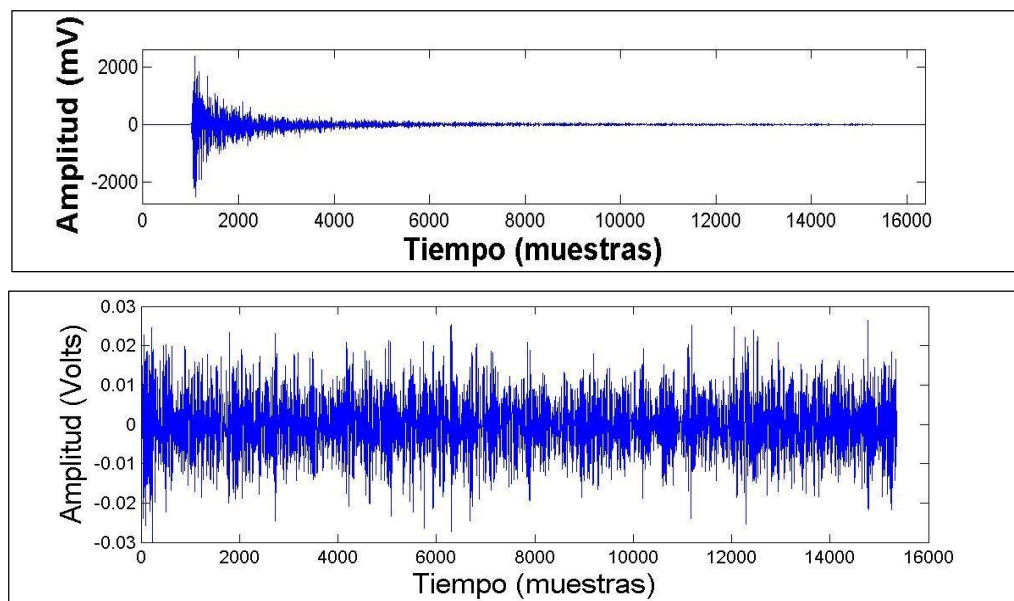


Fig. 1.19. Señal de EA tipo “Burst” (superior), continua (inferior) [Gómez (2012)].

1.6.7. Modo de adquisición de Formas de onda (Waveforms)

La adquisición de las formas de onda consiste en el registro digital de una pequeña porción de señal durante un período de tiempo que puede variar desde los milisegundos hasta los segundos, dependiendo de la tasa de muestreo. Este procedimiento utiliza más recursos de

hardware tanto para procesamiento como para el almacenamiento de los datos. La cantidad y calidad de los datos adquiridos es superior que en el modo paramétrico.

1.6.8. Modo de adquisición Streaming

Cuando la adquisición se realiza en este modo toda la señal es digitalizada y almacenada de manera completa a tiempo real enviándola directamente al disco rígido de la máquina. Estas señales guardan toda la información recibida de la EA perteneciente al ensayo, pero debido al gran volumen de información que debe ser procesado, existen serias limitaciones que involucran espacios de almacenamiento muy grandes y manejo de archivos de enorme tamaño que restringen la utilidad de este método de adquisición.

1.7 Herramientas aplicadas al análisis de las señales de EA

1.7.1. Información estacionaria y no estacionaria (Correlación de señales)

1.7.1.1. Clasificación de Información aleatoria estacionaria

La información aleatoria de un fenómeno físico no puede ser descrita de manera explícita por relaciones matemáticas debido a que cada observación del fenómeno es única. En otras palabras, para cualquier observación, esta representa solo uno de los muchos posibles resultados que eventualmente pueden ocurrir. Por ejemplo, si tomamos la salida en voltaje de un generador térmico, la cual es grabada en función del tiempo, se obtendrá un historial de voltaje en función del tiempo, como se muestra en la Fig. 1.20. Luego si otro generador térmico construido de idéntica forma es operado de manera simultánea, se obtendrá un historial diferente de voltaje en función del tiempo. De hecho, cada generador térmico de señal que pueda ser construido producirá un historial diferente de voltaje en función del tiempo. Por lo tanto, el voltaje en función del tiempo para cada generador es meramente un ejemplo de un número infinitamente largo de historiales que eventualmente pueden ocurrir. Un historial singular que representa un fenómeno aleatorio es llamado *función de muestra* (grabación de muestra cuando es observado sobre un intervalo de tiempo finito). La colección de todas las posibles funciones de muestra que el fenómeno puede producir es llamado *proceso aleatorio o proceso estocástico*. Entonces, una grabación de muestras de datos pertenecientes a un fenómeno físico puede ser pensado como una realización física de un proceso aleatorio.

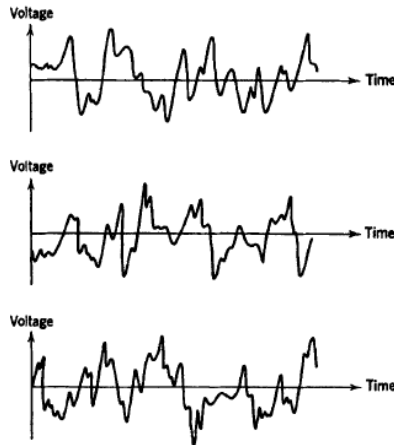


Fig. 1.20. Registro de muestras a la salida de un generador aleatorio de señales [Bendat y Piersol, 2010].

Los procesos aleatorios pueden ser categorizados en estacionarios o no estacionarios.

Los procesos estacionarios pueden ser posteriormente categorizados por ser ergódicos o no ergódicos. Los procesos no estacionarios también pueden ser subclasificados en términos de propiedades no estacionarias. Estas clasificaciones de procesos aleatorios son esquemáticamente ilustrados en la Fig. 1.21.

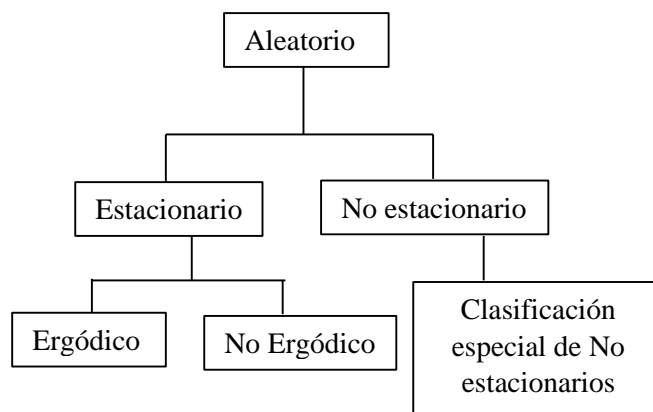


Fig. 1.21. Cuadro de clasificación de los diferentes tipos de datos registrados.

Cuando un fenómeno físico es considerado en términos de procesos aleatorios, las propiedades del fenómeno pueden ser hipotéticamente descritas en cualquier instante mediante el cálculo de valores promedios respecto de la colección de funciones de muestra que describen el proceso aleatorio. Por ejemplo, considere la *colección de las funciones de muestra (también llamada ensamble)* que forman el proceso aleatorio ilustrado en la Fig. 1.22.

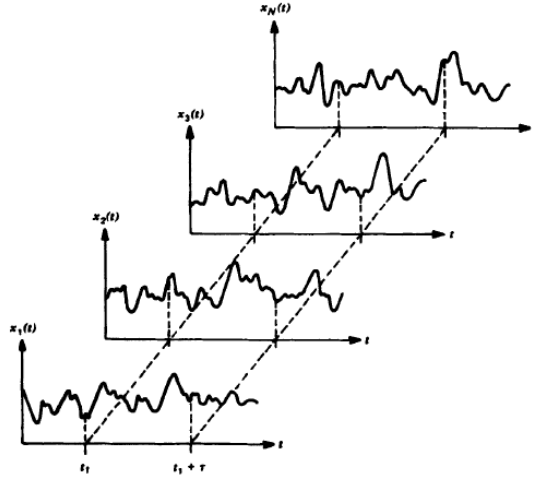


Fig. 1.22. Ensemble del registro histórico en función del tiempo que define un proceso aleatorio [Bendat y Piersol 2010].

El valor medio (primer momento de la serie de datos) de un proceso aleatorio en t_1 puede ser calculado tomando el valor instantáneo de cada función de muestra del ensemble en el tiempo t_1 , sumando estos valores, y dividiendo por el número de funciones de muestra. De manera similar, la correlación (momento conjunto) entre valores de un proceso aleatorio en dos tiempos diferentes (llamando función de autocorrelación) puede ser computado, tomando el promedio del ensemble del valor del producto instantáneo en dos tiempos diferentes, t_1 y $t_1 + \tau$. Para el proceso aleatorio $\{x(t)\}$, donde el símbolo $\{\}$ es usado para denotar el *ensemble* de las funciones de muestra, el valor medio $\mu_x(t_1)$ y la función de autocorrelación $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$ están dados por:

$$\mu_x(t_1) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N x_k(t_1) \quad \text{Ec. 1.2a}$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N x_k(t_1)x_k(t_1 + \tau) \quad \text{Ec. 1.2b}$$

Donde la sumatoria final asume que cada función de muestra es igualmente posible.

Para los casos generales donde $\mu_x(t_1)$ y $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$ definido en las ecuaciones 1.2 a y b varía en el tiempo a medida que t_1 varía, el proceso aleatorio $\{x(t)\}$ es definido como no estacionario. Para el caso especial donde $\mu_x(t_1)$ y $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$ no varía a medida que t_1 varía, el proceso aleatorio $\{x(t)\}$ es llamado débilmente estacionario o estacionario en sentido amplio. Para procesos aleatorios débilmente estacionarios, el valor medio es constante y la función de autocorrelación es dependiente únicamente del desplazamiento temporal τ . Esto es $\mu_x(t_1) = \mu_x$ y $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = R_{xx}(\tau)$.

Una infinita colección de momentos de orden superior y momentos conjuntos del proceso aleatorio $\{x(t)\}$ pueden ser calculados para establecer una familia completa de distribución de probabilidades que describen el proceso. Para el caso esencial donde todos los *posibles momentos y momentos conjuntos son invariantes en tiempo*, el proceso aleatorio $\{x(t)\}$ es llamado *fuertemente estacionario o estacionario en sentido estricto*.

1.7.1.2. Información aleatoria ergódica

En la sección anterior se mencionó como las propiedades de un proceso aleatorio pueden ser determinadas mediante el cómputo de los promedios de los ensambles en instantes específicos de tiempo. En la mayoría de los casos, sin embargo, es también posible describir las propiedades de un proceso estacionario aleatorio mediante el cálculo de promedios de tiempo sobre una función de muestra específica del ensamble. Por ejemplo, considere la función de muestra k_{th} sobre el proceso aleatorio ilustrado en la Fig. 1.20. El valor medio $\mu_x(k)$ y la función de autocorrelación $R_{xx}(\tau, k)$ de la función de muestra k_{th} están dados por

$$\mu_x(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad \text{Ec. 1.3a}$$

$$R_{xx}(\tau, k) = \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad \text{Ec. 1.3b}$$

Si el proceso aleatorio $\{x(t)\}$ es estacionario y $\mu_x(k)$ y $R_{xx}(\tau, k)$ es definido como en las ecuaciones 1.3a y b, no difiriendo cuando se calculan sobre una función de muestra diferente, el procesado es llamado ergódico. Para procesos aleatorios ergódicos, el valor medio promediado en el tiempo y la función de correlación (así como todas las otras propiedades temporales promediadas) son iguales a los valores promediados del ensamble correspondiente. Esto es $\mu_x(k) = \mu_x$ y $R_{xx}(\tau, k) = R_{xx}(\tau)$. Nótese que únicamente los procesos aleatorios estacionarios pueden ser ergódicos.

Los procesos aleatorios ergódicos son claramente una clase importante de procesos aleatorios debido a que todas las propiedades de un proceso aleatorio ergódico pueden ser determinadas mediante la realización de promedios de tiempo sobre una única función de muestra. Afortunadamente, en práctica, la información aleatoria que representa fenómenos físicos estacionarios es generalmente ergódica. Es por esta razón que las propiedades de los fenómenos físicos estacionarios pueden ser medidas de manera apropiada, en la mayoría de los casos, mediante la observación de un único registro histórico de tiempo.

1.7.1.3. Información aleatoria no estacionaria

Los procesos aleatorios no estacionarios incluyen procesos aleatorios que no cumplen los criterios estacionarios definidos anteriormente. Excepto restricciones posteriores, las propiedades de un proceso aleatorio no estacionario son generalmente funciones variables en el tiempo que únicamente pueden ser determinadas mediante la realización de promedio instantáneos sobre la función de muestra del ensamble del proceso. En la práctica, a menudo no es posible la obtención de un número suficiente de muestras que permitan medir de manera precisa las propiedades mediante el promedio del ensamble. Este hecho ha tendido a impedir el desarrollo de técnicas prácticas para medir y analizar información aleatoria no estacionaria. En muchos casos, la información aleatoria no estacionaria producida por un fenómeno físico actual puede ser clasificada en categorías especiales de no estacionaria que simplifican la medición y el análisis del problema. Por ejemplo, algunos tipos de información aleatoria puede ser descrita mediante procesos aleatorios no estacionarios $\{x(t)\}$, cuando cada función de muestra está dada por $x(t)=a(t)u(t)$. Aquí $u(t)$ es una función de muestra de un proceso aleatorio $\{u(t)\}$ y $a(t)$ es un factor multiplicador determinista. En otras palabras, la información que puede ser representada mediante procesos aleatorios no estacionarios consiste en funciones de muestra con una tendencia común determinista. Si la información de un proceso aleatorio no estacionario se ajusta a un modelo específico de este tipo, el promediado del ensamble no es siempre necesario para describir la información. Varias de estas propiedades deseadas pueden ser algunas veces estimadas a partir de una única muestra, como se demuestra para la información estacionaria ergódica

1.7.1.4. Registro de muestras estacionarias

El concepto de estacionario, como se definió anteriormente relaciona las propiedades del ensamble promediado de un proceso aleatorio.

En la práctica, sin embargo, la información en la forma individual de registros históricos de tiempo de un fenómeno aleatorio es frecuentemente referida como estacionario o no estacionario. Una leve diferencia de interpretación de estacionario está envuelta en esto.

Cuando un único registro histórico de tiempo es referido como que es estacionario, esto en general significa que las propiedades calculadas sobre algunos intervalos de tiempo no varían *significativamente* de un intervalo al siguiente. La palabra *significativamente* es usada aquí para simbolizar que las variaciones observadas son mayores que las que se esperarían debido a las variaciones estadísticas normales de la muestra.

Para ayudar a clarificar este punto considérese un único registro de muestras $x_k(t)$ obtenido de una función de muestra k_{th} de un proceso aleatorio $\{x(t)\}$. Asíumase un valor medio y una función de autocorrelación que son obtenidas mediante promediado temporal sobre un corto intervalo de tiempo T con un tiempo de inicio t_1 .

$$\mu_x(t_1, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) dt \quad \text{Ec. 1.4a}$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad \text{Ec. 1.4b}$$

Para el caso general donde las propiedades de la muestra están definidas en las ecuaciones 1.4 a y b, varían significativamente a medida que el tiempo de inicio t_1 varía, el registro de la muestra individual se conoce como no estacionario.

Para el caso especial donde las propiedades de las muestras definidas en la ecuación 4 no varían significativamente a medida que el tiempo de inicio cambia, el registro de la muestra será llamado estacionario. Nótese que el registro de muestra obtenido de un proceso aleatorio ergódico será estacionario. Más aún, registros de muestras de la mayoría de los procesos físicos aleatorios no estacionarios interesantes serán no estacionarios. Por lo tanto, si una asunción ergódica es justificada (como lo es para la actual mayoría de los fenómenos físicos) verificación de la estacionalidad para un registro de muestras justificara la asunción de estacionariedad y ergodicidad.

1.7.1.5. Análisis de información aleatoria

El análisis de información aleatoria involucra diferentes consideraciones a partir de la información determinista. En particular, debido a que no pueden ser escritas ecuaciones matemáticas explícitas para las historias temporales producidas por un fenómeno aleatorio. Los procedimientos estadísticos deben ser usados para definir las propiedades descriptivas de la información. Sin embargo, existen relaciones claramente definidas de entrada/salida para la información aleatoria, que es fundamental para un amplio rango de aplicaciones. En tales aplicaciones, un entendimiento y control de los errores estadísticos asociados al cálculo de las propiedades de la información y de las relaciones de entrada y salida es necesario. Las propiedades básicas de importancia para describir un registro de datos aleatorios estacionarios son:

Valor medio y valores cuadráticos medios.

Función de densidad de probabilidades

Funciones de autocorrelación

Funciones de densidad auto espectral.

1.7.1.6. Conceptos básicos aplicados a procesos aleatorios estacionarios

Un proceso aleatorio, también llamado estocástico o serie temporal $\{X_k(t)\}$, $-\infty < t < \infty$, es un ensamble de funciones de valores reales (o complejos) que pueden ser caracterizados por alguna estructura de probabilidad. Por conveniencia, la variable t será interpretada como tiempo para la presente sección.

Cada función particular $X_k(t)$, donde t es variable y k es fijo, es llamada función de muestra. En la práctica, una función de muestra (o parte de la historia temporal de una longitud finita de una función de muestra) puede ser pensada como el resultado de la observación de un único experimento. El número posible de experimentos representa el espacio muestral del índice k , el cual puede ser contable o incontable. Para cualquier número N y cualquier tiempo fijo t_1, t_2, \dots, t_n , las cantidades $X_k(t_1), \dots, X_k(t_n)$ representan N variables aleatorias sobre el índice K . Es requerido que exista una distribución de probabilidad N -dimensional bien definida para cada N .

Una función de muestra particular $X_k(t)$, en general no será apropiada para representar completamente el proceso aleatorio $\{X_k(t)\}$ al que pertenece. Bajo ciertas condiciones que serán descritas luego, sin embargo, resulta que, para una clase especial de procesos aleatorios ergódicos, es posible extraer información estadística sobre el proceso aleatorio completo, a partir de un apropiado análisis de una arbitraria función de muestra. Para la situación de un par procesos aleatorios $\{X_k(t)\}$ y $\{Y_k(t)\}$, el problema correspondiente es estimar las propiedades de probabilidad conjunta de estos dos procesos aleatorios a partir del apropiado análisis de un par arbitrario de funciones de muestra $X_k(t)$ y $Y_k(t)$

Considérense dos procesos aleatorios arbitrarios $\{X_k(t)\}$ y $\{Y_k(t)\}$, la primera cantidad estadística de interés del ensamble es el valor medio a un valor arbitrario fijo de t , donde $X_k(t)$ y $Y_k(t)$ son variables aleatorias sobre el índice k . Estas son definidas como las ecuaciones:

$$[x(k)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx = \mu_x \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$\mu_x(t) = E[x_k(t)]$$

$$\mu_y(t) = E[y_k(t)]$$

En general, estos valores medios son diferentes en diferentes tiempos, y deben ser calculados de manera separada para cada t de interés, esto es:

$$\mu_x(t_1) \neq \mu_x(t_2) \text{ Si } t_1 \neq t_2$$

$$\mu_y(t_1) \neq \mu_y(t_2) \text{ Si } t_1 \neq t_2$$

La siguiente cantidad estadística de interés es la función covarianza en algún valor fijo arbitrario de $t_1=t$ y $t_2=t+\tau$. Estas son definidas como:

$$C_{xx}(t, t + \tau) = E[(x_k(t) - \mu_x(t))(x_k(t + \tau) - \mu_x(t + \tau))]$$

$$C_{yy}(t, t + \tau) = E[(y_k(t) - \mu_y(t))(y_k(t + \tau) - \mu_y(t + \tau))]$$

$$C_{xy}(t, t + \tau) = E[(x_k(t) - \mu_x(t))(y_k(t + \tau) - \mu_y(t + \tau))]$$

En general, estas cantidades son diferentes para diferentes combinaciones de t_1 y t_2 , Obsérvese que cuando $t=0$ ($t_1=t_2=t$).

$$C_{xx}(t, t) = E[(x_k(t) - \mu_x(t))^2] = \sigma_x^2(t)$$

$$C_{yy}(t, t) = E[(y_k(t) - \mu_y(t))^2] = \sigma_y^2(t)$$

$$C_{xy}(t, t) = E[(x_k(t) - \mu_x(t))(y_k(t) - \mu_y(t))] = C_{xy}(t)$$

Entonces la covarianza de funciones $C_{xx}(t, t)$ y $C_{yy}(t, t)$ representa las varianzas ordinarias de $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$ respecto un valor fijo de t mientras que $C_{xy}(t, t)$ representa la covarianza entre $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$. Como antes, diferentes resultados serán generalmente obtenidos para diferentes valores de t .

Otras cantidades estadísticas pueden ser definidas sobre el ensamble que implica fijar tres o más tiempos. La estructura de probabilidad de un proceso aleatorio es entonces descrita en más y más fino nivel. Si $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$ forman una distribución gaussiana bidimensional en un valor fijo de t , $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$ deben ser separadamente gaussianas. La función de valor medio y covarianza anteriormente listadas proveen una completa descripción de la estructura subyacente de probabilidad.

Si los valores medios $\mu_x(t)$ y $\mu_y(t)$ juntamente con la función de covarianza $C_{xx}(t, t + \tau)$, $C_{yy}(t, t + \tau)$ y $C_{xy}(t, t + \tau)$ llevan a los mismos resultados para todos los valores fijos de t (esto es que son independientes de la traslación temporal), entonces el proceso aleatorio $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$, son débilmente estacionarios. Si toda la distribución de probabilidad que involucran $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$, son independientes de las traslaciones temporales, entonces el proceso estacionario es llamado fuertemente estacionario. Debido a que las funciones de valor medio y covarianza son consecuencias solamente del primer y segundo orden de la distribución de probabilidad, se deduce que los procesos aleatorios

fuertemente estacionarios son una subclase de un proceso aleatorio débilmente estacionario. Sin embargo, para un proceso aleatorio gaussiano, débilmente estacionario significa fuertemente estacionario debido a que todas las distribuciones de probabilidad posibles pueden derivarse de las funciones de valor medio y covarianza. Por lo tanto, en los procesos aleatorios gaussianos estos dos conceptos coinciden.

1.7.1.7. Funciones de correlación (covarianzas)

Para procesos aleatorios estacionarios $\{X_k(t)\}$ y $\{Y_k(t)\}$ los que puede ser considerado en adelante en este capítulo. El valor medio se transforma en un valor constante independiente de t . Esto es para todo t .

$$\mu_x(t) = E[x_k(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx$$

$$\mu_y(t) = E[y_k(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} yp(y)dy$$

Donde $p(x)$ y $p(y)$ son las funciones de densidad de probabilidad asociadas con las variables aleatorias $x_k(t)$ y $y_k(t)$ respectivamente. La función de covarianza de un proceso aleatorio estacionario es también independiente de t .

Para cualquier valor fijo de t y τ , se define

$$R_{xx}(\tau) = E[(x_k(t)x_k(t + \tau))]$$

$$R_{yy}(\tau) = E[(y_k(t)y_k(t + \tau))]$$

$$R_{xy}(\tau) = E[(x_k(t)y_k(t + \tau))]$$

Donde R es introducido en vez de C para distinguir esta expresión de las funciones de covarianza. Para valores no nulos, R es diferente de C . Las cantidades $R_{xx}(\tau)$ y $R_{yy}(\tau)$ son llamadas funciones de autocorrelación de $\{Xx(t)\}$ y $\{Yk(t)\}$ respectivamente, mientras que $R_{xy}(\tau)$ es llamado función correlación cruzada entre $\{Xx(t)\}$ y $\{Yk(t)\}$.

Una condición suficiente y necesaria que $R_{xx}(\tau)$ sea la función de autocorrelación de un proceso aleatorio débilmente estacionario $\{Xx(t)\}$ es que $R_{xx}(\tau)=R_{xx}(-\tau)$, y que $R_{xx}(\tau)$ sea una función definida no negativa. También se puede probar que $R_{xx}(\tau)$ sea una función continua de τ si es continua en el origen.

Para un par de procesos aleatorios estacionarios $\{Xx(t)\}$ y $\{Yk(t)\}$, la función de probabilidad conjunta $p(x_1, x_2)$ del par de variable aleatorias $x_1=x_k(t)$ y $x_2 = x_k(t+\tau)$ es independiente de t , y la función de densidad de probabilidad conjunta $p(y_1,y_2)$ asociada con el par de variable aleatorias $y_1=y_k(t)$ e $y_2=y_k(t+\tau)$ es independiente de t . Esto es también verdad para la función

de densidad de probabilidad conjunta $p(x_1, y_2)$ asociada con el par de variables aleatorias $y_1=y_k(t)$ e $y_2=y_k(t+\tau)$ que son independientes de t . Esto también se cumple para la función de densidad conjunta $p(x_1, y_2)$ asociada con el par de variable a aleatorias $x_1=x_k(t)$ e $y_2=(t+\tau)$. En términos de función de densidad de probabilidad:

$$R_{xx}(\tau) = \iint_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

$$R_{yy}(\tau) = \iint_{-\infty}^{\infty} y_1 y_2 p(y_1, y_2) dy_1 dy_2$$

$$R_{xy}(\tau) = \iint_{-\infty}^{\infty} x_1 y_2 p(x_1, y_2) dx_1 dy_2$$

Para valores arbitrarios de μ_x y μ_y la función de covarianza está relacionado con las funciones de correlación mediante las ecuaciones:

$$C_{xx}(\tau) = R_{xx}(\tau) - \mu_x^2$$

$$C_{yy}(\tau) = R_{yy}(\tau) - \mu_y^2$$

$$C_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y$$

Por lo tanto, la función de correlación es idéntica con las funciones de covarianza cuando el valor de la media es cero. Nótese que, por definición, dos procesos aleatorios estacionarios con no correlacionados cuando $C_{xy}(\tau) = 0$ para todo τ . Esto ocurre cuando $R_{yy}(\tau) = \mu_x \mu_y$ para todo τ . Entonces, dos procesos son no correlacionados cuando $R_{yy}(\tau)=0$ para todo τ solo si μ_x o μ_y son iguales a cero.

A partir de la hipótesis estacionaria, se concluye que la función de autocorrelación $R_{xx}(\tau)$ y $R_{yy}(\tau)$ son funciones pares de τ . esto es:

$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau) \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$R_{yy}(-\tau) = R_{yy}(\tau)$$

Mientras que la función de correlación cruzada puede ser par o impar, pero satisface la relación

$$R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau) \quad \text{Ec. 1.6}$$

Ecuación 2.6 puede ser probada de la siguiente manera por definición.

$$R_{xy}(-\tau) = E[x(t)y(t - \tau)]$$

Donde la dependencia de k es omitida para simplificar la notación. Debido a que los resultados son invariantes respecto a la traslación en tiempo, se puede reemplazar t por $t + \tau$ cuando aparece t antes de calcular el valor esperado, entonces:

$$R_{xy}(-\tau) = E[x(t + \tau)y(t - \tau)]$$

$$= E[y(t)x(t - \tau)] = R_{xy}(\tau)$$

Lo que completa la prueba. Cuando $x=y$ se obtiene:

$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau) \quad R_{yy}(-\tau) = R_{yy}(\tau)$$

Mostrando que la ecuación 2.5 es un caso especial de la ecuación 2.6

Las propiedades de la correlación de procesos estacionarios aleatorios $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$, que son descrito por las cuatro funciones $R_{xx}(\tau)$, $R_{yy}(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$ y $R_{yx}(\tau)$ deben ser calculadas solo para valores de $\tau > 0$ debido a la relación de la ecuación 1.5 y 1.6 resulta para $\tau < 0$.

1.7.1.8. Coeficiente de las funciones de correlación

Las funciones de correlación cruzada están ligadas por la desigualdad de la correlación cruzada.

$$|R_{xy}(\tau)|^2 \leq R_{xx}(0)R_{yy}(0)$$

Considerando $x(t) - \mu_x$ y $y(t+\tau) - \mu_y$ en vez de $x(t)$ y $y(t+\tau)$, se llega a la desigualdad de la covarianza cruzada.

$$|C_{xy}(\tau)|^2 \leq C_{xx}(0)C_{yy}(0)$$

Haciendo notar que

$$|R_{xx}(\tau)| \leq R_{xx}(0) \quad |C_{xx}(\tau)| \leq C_{xx}(0)$$

Entonces el máximo valor posible de $R_{xx}(\tau)$ y $C_{xx}(\tau)$ ocurre cuando $\tau = 0$ y corresponde al valor medio cuadrático y a la varianza de los datos, esto es:

$$\begin{aligned} R_{xx}(0) &= E[x_k^2(t)] = \psi_x^2 & C_{xx}(0) &= \sigma_x^2 \\ R_{yy}(0) &= E[y_k^2(t)] = \psi_y^2 & C_{yy}(0) &= \sigma_y^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la ecuación 2.7 toma la forma

$$|C_{xy}(\tau)|^2 \leq \sigma_x^2 \sigma_y^2$$

La función de coeficientes de correlación (función de coeficientes de covarianza cruzada) puede ser definida de la siguiente manera.

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y}$$

y satisface que para todo τ

$$-1 \leq \rho_{xy}(\tau) \leq 1$$

y si μ_x o μ_y es igual a cero, entonces $\rho_{xy}(\tau)$ se transforma en

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Debido a que $C_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau)$ en estos casos. La función $\rho_{xy}(\tau)$ mide el grado de dependencia lineal entre $\{x_k(t)\}$ y $\{y_k(t)\}$ para desplazamiento de τ en $\{y_k(t)\}$ respecto $\{x_k(t)\}$. Es en esencia una generalización de los coeficientes de correlación usados en estadística clásica.

1.7.1.9. Información de carácter no estacionario

Mucha de la información aleatoria de interés en práctica es no estacionaria si se mira como un todo. Sin embargo, a menudo es posible forzar a estos datos a ser al menos estacionario por partes para los propósitos de medición y análisis. Esto se puede realizar colectando periodos de información estacionarios en condiciones de proceso fijas que describan de forma completa un proceso complejo variable. Esta fragmentación del proceso se puede llevar a cabo hasta que la información estacionaria por partes represente el proceso con un adecuado nivel de detalle. Dicho procedimiento para generar información de carácter estacionario y representar fenómenos no estacionarios es altamente recomendado a fin de evitar la necesidad de realizar análisis de información no estacionaria.

Existen un número de situaciones donde la aproximación anteriormente explicada para la colección de datos y análisis no es posible y las muestras individuales de la información deben ser analizadas como información no estacionaria. Desde un punto de vista puramente computacional, la situación más deseable es aquella en la que un experimento que produce información de interés no estacionaria puede ser repetido bajo condiciones estadísticas similares. Esto permite que un ensamble de muestras sea medido en una base de tiempo común como ilustra la Fig. 1.22. Una situación más común sin embargo es aquella en cual el fenómeno no estacionario de interés es único y no puede ser reproducido bajo similares condiciones estadísticas. Ejemplos de estos fenómenos son las olas oceánicas no estacionarias, la turbulencia y las series de datos económicos. El factor básico que produce este tipo de información es muy complejo para permitir la realización de experimentos repetidos bajo condiciones similares. El análisis de estos tipos de casos debe ser logrado mediante el cálculo respecto de muestras únicas de datos.

En principio no existe una metodología para analizar las propiedades de todos los tipos de información no estacionaria a partir de muestras de datos individuales. Eso se debe parcialmente al hecho que una conclusión de no estacionario es una afirmación negativa

especificando solamente la falta de propiedades estacionarias, más que una afirmación positiva definiendo la naturaleza precisa de la no estacionariedad. En base a lo anterior, se deben desarrollar técnicas especiales que solamente aplican a cada clase de información no estacionaria. La aproximación usual es hipotetizar un modelo específico para cada clase de información no estacionaria de interés que consiste en operar con factores deterministas de otra manera respecto de los procesos estacionarios. La Fig. 1.23 y 1.24 muestran ejemplos de registros de datos no estacionarios compuesto por tramos de información con diferentes características. Donde $u(t)$ es un registro de datos de un proceso aleatorio estacionaria $\{u(t)\}$ y $a(t)$ es una función determinista repetida exactamente en cada registro. Este modelo estacionario básico puede ser combinado para extender y generar modelos más complejos que ajusten de manera precisa muchas situaciones físicas.

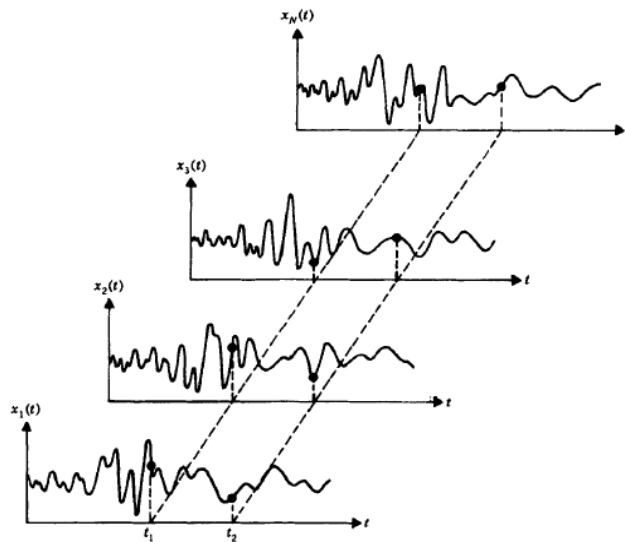


Fig. 1.23 Muestras de registros de procesos aleatorios no estacionarios [Bendat y Piersol 2010].

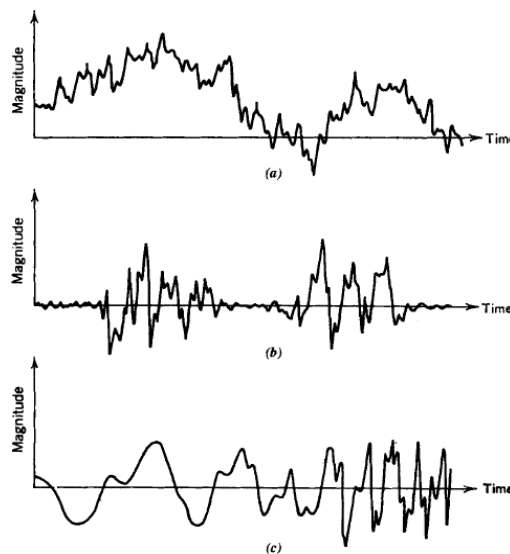


Fig. 1.24 Ejemplos de información no estacionaria [Bendat y Piersol 2010]. a. Valor medio variable en el tiempo. b. Valor cuadrático medio variable en el tiempo. c. Estructura de frecuencia variable en el tiempo.

$$(a) x(t) = a(t) + u(t)$$

$$(b) x(t) = a(t) u(t)$$

$$(c) x(t) = u(t^n)$$

1.7.1.10. Estructura de probabilidad de información no estacionaria

Para un proceso aleatorio no estacionario $\{x(t)\}$ como el ilustrado en la Fig. 1.23, las propiedades estadísticas sobre el ensamble en cualquier tiempo t es no invariante respecto a la traslación en t . Entonces, para cualquier valor de $t=t_1$, la estructura de probabilidad de una variable aleatoria $x(t_1)$ será función de t_1 . Para ser preciso, la función de densidad de probabilidad no estacionaria $p(x, t_1)$ de $\{x(t_1)\}$ está definido por

$$p(x, t_1) = \frac{\text{Prob} [x < x(t_1) \leq x + \Delta x]}{\Delta x}$$

y las siguientes propiedades básicas en cualquier t .

$$1 = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx$$

$$\mu_x(t) = E[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x, t) dx$$

$$\psi_x^2(t) = E[x^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2p(x, t) dx$$

$$\sigma_x^2(t) = E[\{x(t) - \mu_x(t)\}^2] = \psi_x^2(t) - \mu_x^2(t)$$

Estas fórmulas aplican también a los casos estacionario donde $p(x,t)=p(x)$, independiente de t .

La función de distribución de probabilidad no estacionaria $P(x, t_1)$ es definido por:

$$p(x, t_1) = \text{Prob} [-\infty < x(t_1) \leq x]$$

Si el proceso aleatorio no estacionario $\{x(t)\}$ es Gaussiano en $t=t_1$, entonces $p(x,t_1)$ toma la forma especial

$$p(x, t_1) = [\sigma_x(t_1)\sqrt{2\pi}]^{-1} \exp\left\{\frac{-[x - \mu_x(t_1)]^2}{2\sigma_x^2(t_1)}\right\}$$

Que es completamente determinado por los valores no estacionarios de las medias y la media cuadrática $x(t)$ a $t=t_1$. Este resultado indica que, para procesos no estacionarios, la medición

de estas dos cantidades puede ser muy significativa como lo es para las aplicaciones que son estacionarias.

1.7.1.11. Funciones de probabilidad de mayor orden

Para un par de tiempos t_1 y t_2 , la función de densidad de probabilidad no estacionaria de segundo orden de $x(t_1)$ y de $x(t_2)$ está definida por:

$$p(x_1, t_1; x_2, t_2) = \frac{\text{Prob} [x_1 < x(t_1) \leq x_1 + \Delta x_2 \text{ y } x_2 < x(t_2) \leq x_2 + \Delta x_2]}{(\Delta x_1)(\Delta x_2)}$$

Y tiene las siguientes propiedades básicas para cualquier t_1 y t_2

$$1 = \iint_{-\infty}^{\infty} p(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2$$

$$p(x_1, t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_2$$

$$p(x_2, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1$$

$$R_{xx}(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] = \iint_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2$$

Para los casos estacionarios $p(x_1, t_1; x_2, t_2) = p(x_1, 0; x_2, t_2 - t_1)$. La función de distribución no estacionaria de segundo orden puede ser definida de manera análoga a la ecuación 12.4 por la cantidad

$$p(x_1, t_1; x_2, t_2) = \text{Prob} [-\infty < x(t_1) \leq x_1 \text{ y } -\infty < x(t_2) \leq x_2]$$

Posteriormente las funciones de distribución y de densidad de probabilidades no estacionarias de mayor orden pueden ser definidas de manera de describir el proceso aleatorio $\{x(t)\}$ en mayor grado de detalle. Este procedimiento provee una rigurosa caracterización del proceso aleatorio no estacionario $\{x(t)\}$.

Considérese dos procesos aleatorios no estacionarios diferentes $\{x(t)\}$ y $\{y(t)\}$. Para $x(t_1)$ y $y(t_2)$, la función de densidad de probabilidad conjunta no estacionaria se define como:

$$p(x, t_1; y, t_2) = \frac{\text{Prob} [x < x(t_1) \leq x_1 + \Delta x \text{ e } y < y(t_2) \leq y + \Delta y]}{(\Delta x)(\Delta y)}$$

Y tiene las propiedades básicas similares a $p(x_1, t_1)$ y $p(x_2, t_2)$. En particular la función de correlación cruzada no estacionaria evaluada posteriormente satisface la siguiente relación:

$$R_{xy}(t_1, t_2) = E[x(t_1)y(t_2)] = \iint_{-\infty}^{\infty} x y p(x, t_1; y, t_2) dx dy$$

Para el caso estacionario $p(x, t_1; y, t_2) = p(x, 0; y, t_2 - t_1)$.

La medición de la función de densidad de probabilidad no estacionaria puede ser una tarea formidable. Inclusive para la función de densidad de primer orden, todas las posibles combinaciones de x y t_1 deben ser consideradas. Esto requiere la colección y análisis de una gran cantidad de registros de muestras. Si el modelo puede asumirse como gaussiano, se puede resumir el problema de medir $p(x, t_1)$, midiendo $\mu_1(t_1)$ y $\sigma_x^2(t_1)$, lo que es una tarea mucho más sencilla de llevar a cabo, aunque también en este caso será necesario disponer de un ensamble promediado de registro de muestras.

1.7.2 Redes Neuronales

En la presente subsección se busca realizar una mínima introducción a la temática de las redes neuronales. La información y bibliografía existente es muy extensa, así como la cantidad de redes con diferentes propósitos y arquitecturas. Para comprender su funcionamiento básico se explicarán lineamientos generales del cálculo que pueden ser extrapolados a redes con diferentes peculiaridades. Por último, se realizará una explicación más detallada de las características de un tipo de red neuronal en particular, denominada Mapa Auto Organizado (Self Organized Map), la cual es utilizada en el presente trabajo para realizar una tarea de clasificación de las señales obtenidas en los ensayos.

1.7.2.1. Introducción

Las redes neuronales artificiales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático que surgió a partir del avance en el conocimiento del funcionamiento de las neuronas biológicas. Las neuronas son células que reciben, procesan y envían estímulos eléctricos, por ejemplo, a otras neuronas. Las interconexiones entre neuronas hacen que se cree una red con la capacidad de realizar tareas de alta complejidad, como por ejemplo el procesamiento de señales. Cuando el árbol dendrítico (Fig. 1.25 a) recibe una señal eléctrica que sobrepasa un umbral determinado, manda otra señal a través del axón (Fig. 1.25 b) a los terminales axónicos. Estos se conectan a través de la sinapsis a los terminales de otras neuronas induciendo potenciales negativos o positivos según el neurotransmisor utilizado. De esta manera se puede estimular o no cierto tipo de comportamiento. La Fig. 1.25 b resume en forma muy esquemática el proceso de sinapsis (unión funcional entre neuronas) donde se observa una señal eléctrica que excita al axón el cual desprende neurotransmisores que son captados por la dendrita, está en respuesta produce una salida eléctrica que de alguna manera es proporcional a la cantidad de neurotransmisores detectados.

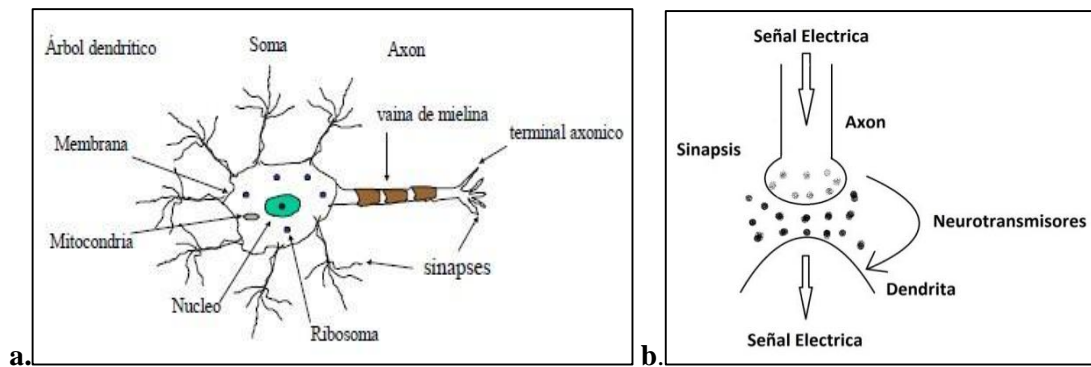


Fig. 1.25 a. Representación esquemática de un árbol dendrítico. **b.** Esquematación de la sinapsis [Extraído y modificado de internet].

Las neuronas artificiales pueden procesar gran cantidad de información, pudiendo llegar a tener entre 10^3 a 10^4 señales de entrada en una sola neurona. Estas acceden en forma paralela al núcleo de la neurona y no en serie como ocurre con el ingreso de información en una computadora, causando una mayor eficiencia en el procesamiento. La información se reúne en un núcleo y tras un cierto procesamiento sale una única señal por el axón que en cierta forma reúne las características de todas las señales de entrada y es transmitida hacia la dendrita.

El poder de cálculo de una neurona se puede incrementar colocando más cantidad de neuronas y conformando una red. Comparando estos modelos y conceptos con el caso del cuerpo humano (10^{11} neuronas aproximadamente) aún se está lejos de lograr un sistema con la misma performance. En la actualidad se pueden realizar redes de muchas neuronas artificiales, con muchas capas que permiten, por ejemplo, clasificar información, aprender y encontrar patrones dentro de listados de datos, guiar vectores aeroespaciales, mejorar imágenes y construir sistemas de reconocimiento de voz entre otras aplicaciones.

1.7.2.2. Arquitectura y funcionamiento básico de una neurona

Se comenzará con la descripción del funcionamiento de una neurona que luego será extrapolado a sistemas más grandes y complejos. En la Fig. 1.26a se observa la arquitectura más simple de una neurona con una sola entrada escalar. La entrada escalar p (dato de entrada) es transmitida a través de una conexión que multiplica este argumento por otro término escalar w que se denomina “peso” para formar el producto wp , nuevamente escalar.

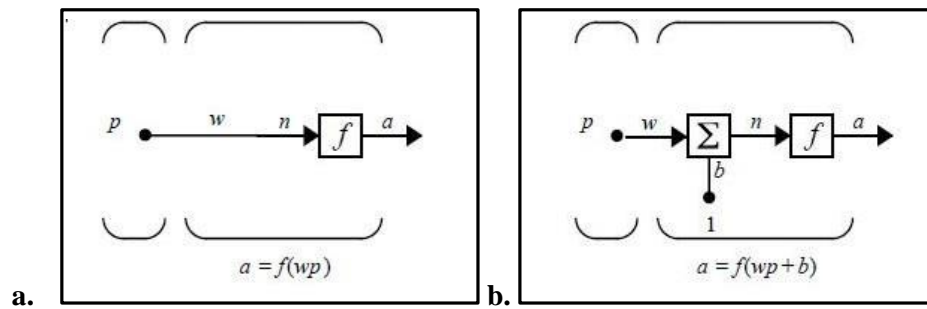


Fig. 1.26. Esquema de arquitectura de una neurona. **a.** Sin bias. **b.** Con bias. [Demuth y Beale (2002)].

El producto wp es el argumento n de entrada a la función f . Luego f es la función de transferencia que toma el argumento n y produce una salida a . La neurona representada en la Fig. 1.26 b cuenta con un parámetro adicional que es un escalar b (bias) que se suma al producto wp , agregando un grado más de libertad al modelo, siendo entonces $w.p + b$ el argumento de entrada a la función de transferencia que da una salida a . En general se usa $b = 1$.

La variedad de formas que puede tener la función f (por ej. escalón, lineales y sigmoideas entre otras), hace que la red pueda resolver problemas cuya relación entre variables sea no lineal, superando a métodos tales como componentes principales (CP), análisis de factores, y otros que solamente estudian problemas lineales o parcialmente lineales.

El modelado de la red consiste en ajustar los parámetros neuronales w y b de manera de exhibir un comportamiento deseado. De esta forma la red puede entrenarse para hacer un trabajo en particular (en este caso la clasificación de diferentes casos de desgaste de herramientas). Durante el entrenamiento la red por si sola ajusta estos parámetros hasta alcanzar un determinado resultado.

En la Fig. 1.27 se presentan algunas de las funciones de transferencia que pueden ser utilizadas. La función tipo *escalón* (*Heaviside*) (Fig. 1.27 a), hace que la salida de la neurona se limite a 0 si el argumento n es menor que 0, y a 1 si es mayor o igual que 0. Esta función se utiliza por ejemplo en Perceptrones (redes elementales) para trabajos de clasificación. La función de transferencia lineal (Fig. 1.27 b) puede utilizarse para hacer aproximaciones lineales, o aplicada a la última capa de una red multicapa amplía su rango de salida cuando de la capa anterior proviene una salida 0-1 de una función *sigmoidea*.

La tercera función de transferencia, de tipo sigmoidea (Fig. 1.27 c) puede tener valores de entrada que oscilen entre más y menos infinito, dando como resultado salidas con valores entre 0 y 1. Estas funciones son muy utilizadas en redes de tipo retro propagación, por ser

diferenciables y porque pueden tratar problemas lineales si el argumento n coincide con el rango de lineal de la función y también problemas no lineales si se trabaja en la zona no lineal (en la que cambia su pendiente) como se detalla en la Fig. 1.28.

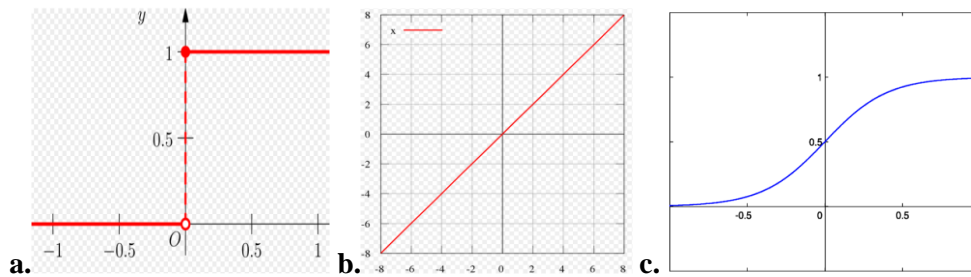


Fig. 1.27. Funciones de transferencia. **a.** Escalón, **b.** Lineal, **c.** Sigmoidea [Modificado de Wikipedia].

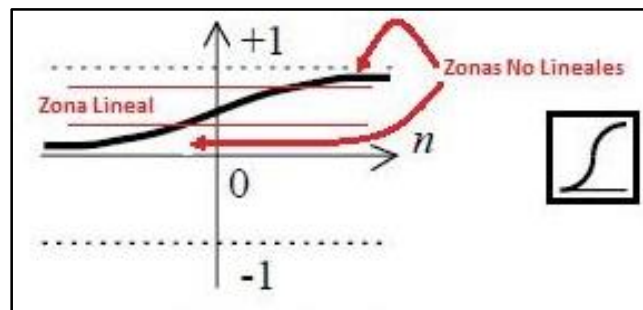


Fig. 1.28. Esquema de las partes lineales y no lineales de la función de transferencia Sigmoidea [Modificado de Demuth y Beale (2002)].

Luego se extiende el modelo de una neurona para un vector de entrada p compuesto por R elementos p_1, p_2, \dots, p_R , que son multiplicados por los correspondientes pesos $w_{1,1}; w_{1,2}; \dots, w_{1,R}$. El primer dígito indica a que neurona pertenece el peso (en este caso es única) y el segundo al elemento del vector p que está afectando desde 1 hasta R . Los valores así *ponderados* ingresan a un operador que los suma haciendo el producto escalar de una sola fila de la matriz W y el vector p , como se observa en la Fig. 1.279. A las entradas ponderadas se les suma un bias para obtener el argumento n que ingresará a la función de transferencia dando como resultado la salida a .

Si

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b,$$

Entonces la salida a se puede describir como: $a = f(w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b)$

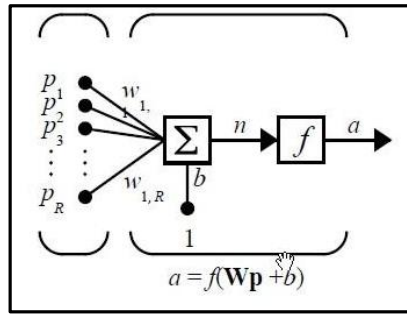


Fig. 1.29. Neurona con vector de entrada de múltiples valores [Demuth y Beale (2002)].

Colocando dos o más neuronas (Fig. 1.30), estas pueden combinarse en una capa, que puede estar interconectada con otras.

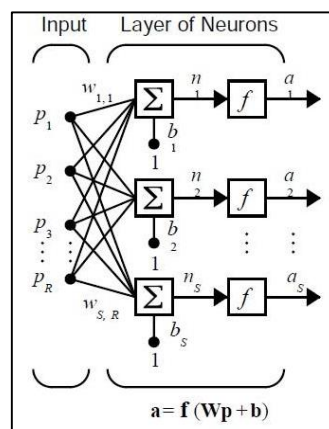


Fig. 1.30. Esquema de una red de neuronas de una capa [Demuth y Beale (2002)].

Sea una red con una capa de neuronas, con un vector de entrada p con R elementos y S número de neuronas. Cada elemento del vector de entrada p está conectado a cada neurona a través de una matriz de pesos W de dimensiones $S \times R$ (Fig. 1.31). En cada neurona se produce la suma del vector de entrada ponderado más el bias que dará como resultado su propio argumento escalar n_i . Luego todos los n_i tomados de las S neuronas producen un vector n de S elementos de entrada a la función de transferencia seleccionada. Esto da como salida un vector columna denominado a , también de S elementos.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \cdots & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

Fig. 1.31. Matriz de pesos que multiplica a al vector de datos p [Demuth y Beale (2002)].

Una característica para enfatizar es que los vectores de información son evaluados por todas las neuronas de manera simultánea (toda la información es compartida por todas las neuronas), este tipo de conexión se llama *conexión total* o *full connection*.

Si se extiende la multiplicación de la red colocando varias capas, cada una tendrá su matriz de pesos W , su bias b , y su vector de salida a como se muestra en la Fig. 1.32.

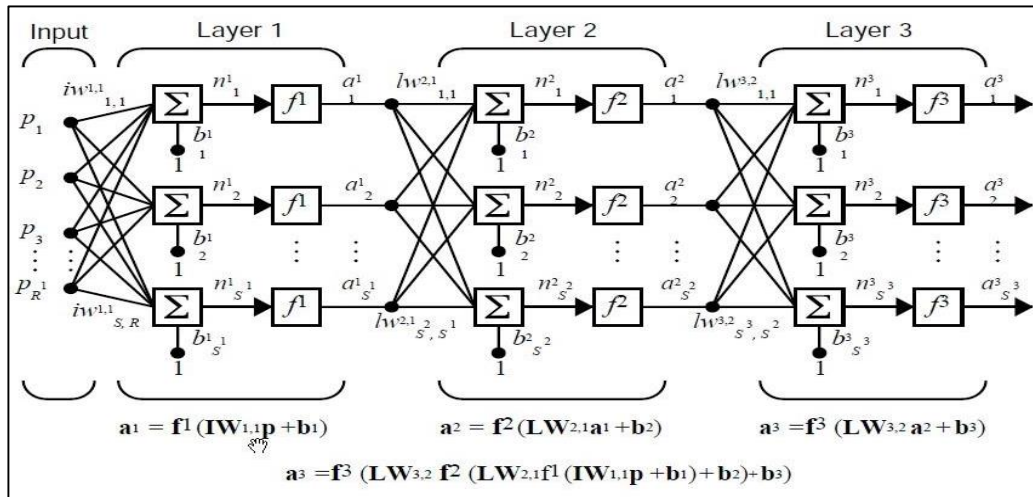


Fig. 1.32. Red Neuronal de tres capas más capa de entrada. [Demuth y Beale (2002)]

El número de capa se denota como un supra índice tanto en el número de entradas como de neuronas, así como en los pesos, los bias, los argumentos y las salidas. Diferentes capas pueden tener distinta cantidad de neuronas. En una red, la salida de cada capa intermedia es la entrada de la siguiente, por lo que cada capa j puede ser analizada como una red de una sola capa con S^{j-1} entradas, S^j neuronas y una matriz de pesos W^j de dimensiones $S^{j-1} \times S^j$. Las entradas de la capa j son los a^{j-1} y las salidas a^j .

Las capas de una red multicapa pueden cumplir diferentes funciones. La que produce la respuesta de la red se llama “*capa de salida*”, las otras se denominan *escondidas*. En el ejemplo de la Fig. 1.32 la capa 3 es la *capa de salida* y las restantes (1 y 2) son *capas escondidas*.

Estos tipos de redes son muy poderosas. Una red de dos capas con una función de transferencia sigmoidea en la primera y una lineal en la segunda puede ser entrenada para aproximar cualquier función (con un número finito de discontinuidades) dando muy buenos resultados.

Si bien existe una amplia variedad de tipos de redes neuronales y de arquitecturas, lo anteriormente mencionado abarca un esquema de cálculo general. Luego se deberá afinar el problema tomando en cuenta las variaciones particulares según el tipo de red considerado.

1.7.2.3. Acondicionamiento de los datos de entrada a la red

Para el correcto funcionamiento de la red, es importante que la información con la cual se la alimente esté apropiadamente acondicionada. En general, la información asociada a los vectores de entrada multiparamétricos tiene diferentes escalas y unidades de medida. Por ejemplo, existen parámetros de EA que tienen escalas logarítmicas y lineales y las unidades de medida de los parámetros varían desde V, dB, hasta aJ (atto Joules), etc., esto puede afectar directamente la estabilidad del cálculo iterativo de la red acarreado como consecuencia que sea menos eficiente en el procesamiento, o que tarde mucho tiempo en converger a un resultado que quizá sea una pobre aproximación respecto al resultado deseado. También se debe tener en cuenta que no todas las funciones de transferencia pueden trabajar con cualquier valor de entrada. Es entonces que se debe realizar un escalado de las variables de manera de homogeneizar unidades y magnitudes. Aunque existe una amplia variedad de escalados, a continuación, se mostraran dos de los más utilizados, que son el *minimax* y el *autoescalado*.

Escalado tipo Minimax

Este escalado toma los valores de un parámetro determinado respetando sus proporciones relativas al máximo y mínimo valor del intervalo considerado, y los normaliza en el intervalo [0-1] mediante el siguiente algoritmo:

$$X_{Escalado} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde X_i es un n valor del parámetro, X_{min} y X_{max} son los mínimos y máximos respectivamente de toda la lista de valores del parámetro en el intervalo considerado.

Escalado tipo Autoescalado

En el auto escalado, como primer paso se calcula el valor promedio de la lista del parámetro considerado, luego a cada valor se le resta el promedio calculado quedando entonces los datos centrados en el promedio, para luego dividir cada valor por el desvío estándar de la muestra. Esto normaliza las unidades de los datos, pero en general condiciona al uso de este escalado a lotes de datos que tengan distribuciones normales.

El algoritmo de cálculo es:

$$X_{Autoescalado} = \frac{X_i - X_{med}}{\sigma}$$

Donde nuevamente X_i es un n valor del parámetro, X_{med} es el promedio de la muestra de valores del parámetro y σ el desvío estándar.

Si bien estos procedimientos son simples no se les debe restar importancia, ya que escalados inapropiados pueden cambiar la relación interna entre las diferentes variables y alterar los resultados finales [Zupan y otros (1993)]. Por esto, antes de realizar cualquier tipo de escalado, se recomienda corroborar que las variables transformadas sigan describiendo adecuadamente el problema analizado. En la mayoría de los casos, la naturaleza del problema será lo que determine el tipo de escalado a ser utilizado.

1.7.2.4. Descripción del proceso de entrenamiento y predicción

La etapa de entrenamiento será comenzada una vez que la red ha sido conformada y los datos de entrada ajustados apropiadamente. En esta etapa la red comienza a aprender a reconocer los datos de entrada (en el caso de clasificación) y a auto ajustarse para obtener la respuesta buscada. Este procedimiento de aprendizaje puede ser *asistido*, donde se le da a la red las respuestas correctas y *no asistido*, donde no se le indica a la red cual es el resultado al que debe llegar.

Para comenzar el entrenamiento se debe disponer de un lote de datos para tal fin, estos tienen que ser representativos del problema y su función es únicamente la de entrenar la red para desarrollar una función deseada. Entonces, en primera instancia se trabajará tratando de optimizar las variables de la red neuronal (arquitectura, factores de corrección, cantidad de tiempo de cálculo, etc.) para que el entrenamiento produzca un valor de error que sea lo suficientemente bajo además de lograr el objetivo buscado.

Se debe tener en cuenta que el verdadero valor de error del modelo entrenado (y por lo tanto de la red) debe ser medido con respecto al lote de predicción y no al de entrenamiento, es decir que el verdadero error de la red es el que da como resultado la etapa de predicción o simulación y no la de entrenamiento.

El proceso de entrenamiento suele ser la parte más extensa en la calibración de la red. En esta etapa la red neuronal genera una matriz de pesos que iterativamente se va corrigiendo hasta lograr valores mínimos de error especificados por el usuario, y esto lo hace (en el caso de aprendizaje asistido) comparando los valores de salida de la red con respecto a los valores objetivos (respuestas correctas proporcionadas por el usuario) y corrigiendo los pesos y el bias hasta minimizar las diferencias. Este sistema generalmente se utiliza en redes de tipo retro propagación. Existen también entrenamientos no supervisados en los que la red aprende

por si sola a clasificar en grupos la información, sin haberle indicado cuales son los resultados correctos (redes de mapas auto organizados y redes competitivas). Teniendo esto en cuenta, el lote de información es pasado varias veces por la red, en donde se define como una “*época*” al pasaje completo de todos los vectores de datos de un lote por la red. Usualmente el entrenamiento conlleva una gran cantidad de épocas que, según la red, o el porcentaje de error requerido y otros factores, puede variar desde unos cientos, hasta miles. Esto se relaciona directamente con el tiempo de cálculo requerido para finalizar el proceso de entrenamiento. Una categorización de los modos de ajuste del entrenamiento puede hacerse basada en la forma de actualizar los pesos y los bias. Si se actualizan cada vez que se presenta a la red un vector de entrada de información de todo el lote se denomina *modo incremental*. Si lo hacen luego de pasar todo el lote de información, es decir luego de una época se denomina *modo batch*.

Una vez que se han alcanzado los objetivos para los cuales se entrenó la red, se procede a la etapa de simulación en donde se debe evaluar su verdadera eficiencia. Para realizar esto se le presenta a la red un lote de datos nuevos para predicción, el cual procesará de manera mucho más rápida que en la etapa de entrenamiento, debido que tanto la matriz de pesos como los bias ya están calculados y no se modificarán si los resultados son satisfactorios. Luego se evalúa el error de la red en la predicción, que por lo general es mayor que el error durante el entrenamiento y si el valor obtenido es aceptable no se vuelven a modificar los pesos ni el bias (no se reentrena a la red). Si el resultado no es satisfactorio se debe volver a entrenar la red modificando las épocas, la cantidad de datos de entrada, y otros parámetros hasta lograr el objetivo.

1.7.2.5. Descripción de reglas de aprendizaje y red elemental Perceptrón

A continuación, se analizará el funcionamiento de una red neuronal del tipo “Perceptrón” para mostrar cómo se aplican las reglas de aprendizaje y como la red toma las decisiones para un caso de clasificación. Las redes tipo *Perceptrón* son de las más antiguas. Fueron creadas por F. Roseblatt en 1960, son muy simples y están compuestas por una sola capa de neuronas. En esta red, los pesos y el bias pueden ser entrenados para producir un vector objetivo cuando se le presenta a la entrada un determinado vector de datos. La técnica de entrenamiento usada se llama “*Regla de aprendizaje Perceptrón*”. Estas redes son muy adecuadas para la clasificación de patrones siendo muy rápidas y confiables para los problemas que pueden resolver. El conocimiento del funcionamiento de la operación del

Perceptrón provee muy buenas bases para el entendimiento de redes más complejas. En la Fig. 1.33 se muestra una red de una neurona que usa una función de transferencia tipo escalón, donde cada entrada externa es ponderada con un peso apropiado w_{IR} . Todas las entradas ponderadas son sumadas y a estas se les agrega el bias. Luego la resultante es enviada a la función de transferencia tipo escalón.

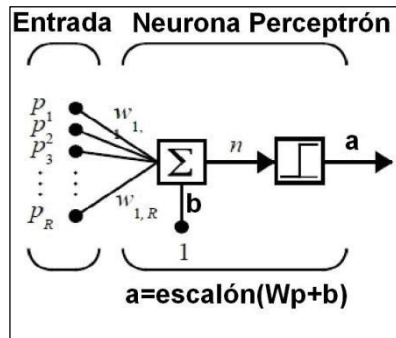


Fig. 1.33. Perceptrón con función de transferencia tipo escalón. [Demuth y Beale (2002)]

La salida de la función de transferencia escalón es 0 o 1, produciendo un 1 si la entrada *neta* a la función de transferencia es igual o mayor a 0, de lo contrario da 0 como resultado. La función escalón le da al Perceptrón la habilidad de clasificar los vectores de entrada en un espacio de dos regiones. Estas dos regiones están delimitadas por la *barrera o límite de decisión* “*L*”, donde $L = Wp + b = 0$, es perpendicular a la matriz de pesos W y cambia según el valor que tome el bias (Fig. 1.34). Para el caso que los vectores de entrada computen sobre y para la izquierda de la línea L resultará en una entrada neta mayor a cero, dando la función de transferencia un 1 como salida. Los vectores de entrada debajo y hacia la derecha de L causan que la neurona tenga un cero por salida. La línea de división L puede ser movida a cualquier región para clasificar las entradas del espacio muestral cambiando el valor de los pesos y del bias.

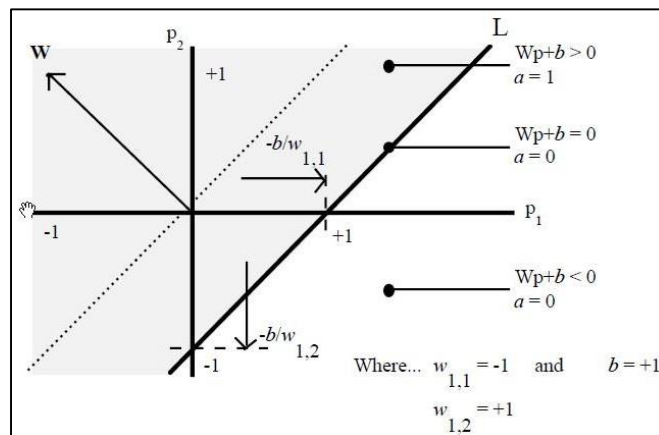


Fig. 1.34. Representación gráfica de las zonas de decisión del Perceptrón [Demuth y Beale (2002)].

Las neuronas con función escalón y sin el bias siempre tendrán una línea de clasificación que pivotará en el origen de coordenadas. Cuando se adiciona el bias, la neurona puede resolver problemas en los que diferentes vectores de entrada se encuentren en diferentes lados del origen de coordenadas. El bias permite entonces, que la barrera de decisión pueda moverse lejos del origen. La arquitectura de una red tipo Perceptrón consiste en una sola capa de S neuronas, conectadas a R entradas a través de un conjunto de pesos W_{ij} como muestra la Fig. 1.35.

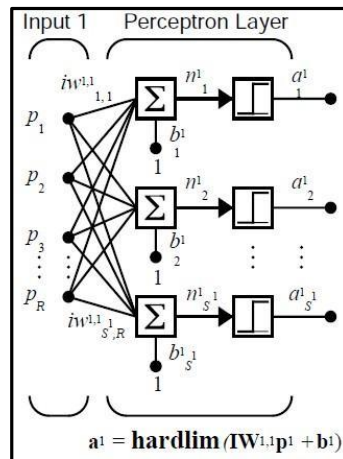


Fig. 1.35. Red Perceptrón de 3 neuronas con función de transferencia escalón y de una sola capa [Demuth y Beale (2002)].

Las *reglas de aprendizaje* se definen como el procedimiento para modificar los pesos y el bias de la red neuronal (también es referido como algoritmo de entrenamiento). El aprendizaje puede ser *asistido* (o supervisado) o *no asistido* (o no supervisado).

A continuación, se analiza un vector de datos de entrada asociado a los resultados de clasificación que deberían obtenerse (con un porcentaje de error) una vez que la red esté correctamente entrenada. El vector de datos ingresado a la red tiene esta conformación $\{p1, t1\}, \{p2, t2\} \dots \{pq, tq\}$, donde se le indica a la misma que pq es un dato de entrada de la red y tq es el correspondiente resultado objetivo (es decir lo que debería dar como salida la red). Por esta razón las reglas tipo Perceptrón se califican como “de aprendizaje supervisado”. A medida que la información es ingresada a la red, esta compara sus resultados con las respuestas objetivo, y las reglas de aprendizaje son usadas para modificar los pesos y el bias con el fin de acercar las salidas de la red a las respuestas objetivo. En contraste, en el entrenamiento no supervisado, los pesos y el bias son únicamente modificados en respuesta a los vectores de entrada, no existiendo respuestas objetivo.

El objetivo de los Perceptrones es disminuir el error (e), el cual es la diferencia entre la respuesta objetivo t y la salida de la neurona a . Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden dar tres casos para ajustar los pesos:

Caso 1: Si un vector de entrada es presentado a la red y la salida de la neurona es correcta, el vector de pesos W no es alterado. (Si $a = t$, entonces $e = t - a = 0$).

Caso 2: Si la salida de la neurona es 0, debiendo haber sido 1 (Si $a = 0$ y $t = 1$, entonces $e = t - a = 1$), el vector de entrada p es sumado al vector de pesos W acercándolo al vector p , e incrementando las posibilidades de que la próxima vez el vector de entrada sea clasificado con un 1.

Caso 3: Si la salida de la neurona fuera un 1, debiendo haber sido 0 (Si $a = 1$, y $t = 0$, entonces $e = t - a = -1$), el vector p se resta del vector de pesos W , alejándolo del vector p y aumentando las probabilidades de que p sea clasificado como 1 en el futuro.

Las reglas de aprendizaje Perceptrón en términos del error e y del cambio que debe hacerse al vector de pesos ΔW se resumen a:

Caso 1: Si $e = 0$ entonces hacer cambio $\Delta W = 0$

Caso 2: si $e = 1$, entonces hacer cambio $\Delta W = p^t$

Caso 3: si $e = -1$, entonces hacer cambio $\Delta W = -p^t$

Los tres casos pueden condensarse en una sola ecuación:

$$\Delta W = (t - a)p^t = ep^t$$

$\Delta W = (t - a)p^t = ep^t$ La expresión para el cambio del bias, considerando al bias como un peso que siempre tiene una entrada de 1:

$$\Delta b = (t - a) = e$$

Resumiendo, entonces las reglas Perceptrón pueden ser escritas como:

$$W_{nuevos} = W_{viejos} + ep^t$$

$$b_{nuevos} = b_{viejos} + e$$

Esta forma de escritura es la base para la programación de los algoritmos de estos tipos de redes. Las reglas Perceptrón convergen a una solución en un número finito de pasos si la solución existe, pero solo pueden clasificar problemas linealmente separables. Esto es debido a su arquitectura y función de transferencia.

Otras variantes de estas redes Perceptrón con función de transferencia sigmoideal de varias capas han demostrado capacidad para clasificar condiciones de desgaste de la herramienta de corte en ensayos de torneado con diferentes materiales, geometrías y recubrimientos de

herramientas. Existe una variedad de trabajos que prueban diferentes combinaciones de cantidad de neuronas y capas escondidas de procesamiento. Estas arquitecturas muestran variabilidad en el desempeño según las configuraciones de ensamble y las mismas son seleccionadas en según el arreglo que brinde el mejor resultado para identificar el estado de desgaste de las herramientas en base a la ponderación del porcentaje de error de la red. [Dimla Sr. y otros (1997), Dimla Sr. (1999)]. Las variables con las que son alimentadas las redes pueden ser las fuerzas estáticas y dinámicas de corte, así como también las aceleraciones involucradas en el proceso, además de la EA. La calidad de la información con que se alimenta la red debe ser analizada eliminando valores fuera de lo común (outliers), examinado la correlación entre las variables y además normalizando la información con el fin de no saturar la red con magnitudes muy diferentes entre los datos de entrada [Dimla Sr. y Lister (2000)]. Existen además combinaciones de redes neuronales tipo Perceptrón que cuentan con sistemas soportes de decisiones de lógica difusa aplicado a la detección de la condición de desgaste en herramientas [Balazinski y otros. (2002)], lo que indica que las variantes que pueden ser adoptadas en el campo de análisis de señales es muy amplio y se deberá observar cuales son las combinaciones que mejor se adapten al control en línea del estado de la herramienta.

A continuación, se detalla otro tipo de red neuronal a la red Perceptrón, la misma fue utilizada en el presente trabajo para la tarea de clasificación de las condiciones de broca, alimentándose con las señales obtenidas del ensayo.

1.7.2.6. Red neuronal tipo Mapas Topológicos Auto Organizados - Kohonen

Existen diferentes formas de evaluar un paquete de información, una forma puede ser algebraica donde se evalúan los valores numéricos, magnitudes y signos que son atributos algebraicos. Otra forma es analizar la relación “entre datos”, una manera muy gráfica de entender este concepto se muestra en la Fig. 1.36.

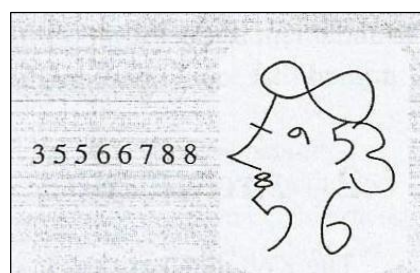


Fig. 1.36. Comparación de la misma serie de datos donde se observa un nuevo nivel de información al considerar la *topología* de los datos [J. Zupan y J. Gasteiger 1993].

J. Zupan y J. Gasteiger (1993) explican que de alguna manera puede verse un nivel nuevo de información evaluando la relación *entre* los números en vez de considerar solo sus valores numéricos. Cuando se focaliza entonces en la relación entre datos se está trabajando con la *topología* de la información. Esta forma de análisis asociada a una necesidad de disminuir la cantidad de variables multidimensionales (reducción dimensional) en la evaluación de una problemática determinada llevó a Teuvo Kohonen a introducir el concepto de “*Mapas Topológicos Auto Organizados*” o *SOM* (“Self Organized Maps”) que son redes neuronales que dan como resultado mapas que representan la relación entre datos, modelando la superficie multidimensional y colocando la información en una superficie de dos dimensiones (mapas). Este tipo de red fue utilizada con éxito en diferentes aplicaciones como ser la detección de fisuras en fabricación de mosaicos [Barrera y otros (2005)], clasificación de origen de aceites de oliva y medición de la reactividad de enlaces químicos [Zupan y otros (1993)], mejora de las características de las señales (relación señal ruido) de la EA en el control de desgaste de herramientas de micromaquinado [C. Yen et al (2013)], análisis de modos de falla en materiales compuestos [Godin et al (2005)], tratamiento de imágenes y señales en general dentro de otras variadas aplicaciones [Kohonen (2001)]. La arquitectura de la red neuronal tipo SOM se caracteriza por su distribución espacial tipo grilla o red formada por las neuronas que componen la red. Estas pueden organizarse con variadas formas, por ej.: rectangular, hexagonal, o de manera aleatoria como se muestra en la Fig. 1.37.

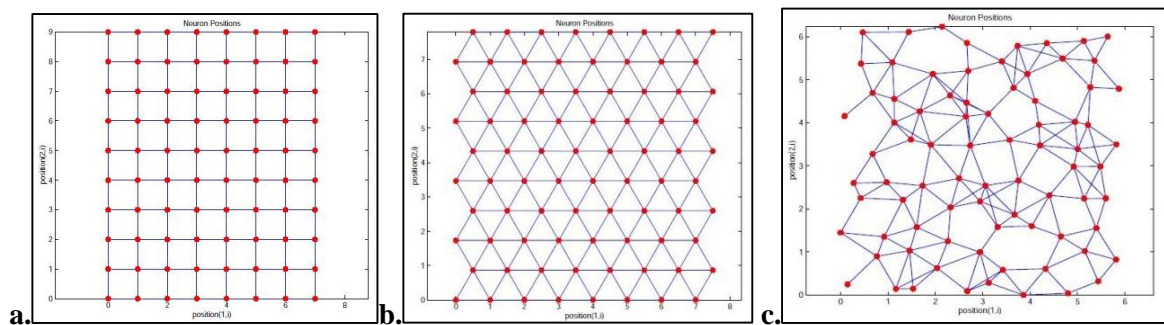


Fig. 1.37. Disposición de neuronas en una SOM. **a.** Red rectangular **b.** Red hexagonal **c.** Red aleatoria. [Demuth and Beale (2002)].

Esta variación de los arreglos conlleva a que a cada neurona se asocie con una cantidad de “*neuronas vecinas*”, definiéndose grupos de *vecindades* con los diferentes tipos de geometría según algún criterio seleccionado. El concepto de “*vecindades*” es clave para comprender el comportamiento de estas redes y su poder para reconocer patrones entre los datos, así como su capacidad de organizarse topológicamente. Los diferentes arreglos geométricos de las

redes varían en el número de vecinos y en la forma de la aglomeración de las neuronas. En la Fig. 1.38a se pueden observar dos vecindades de diferente tamaño de geometría circular y en la Fig. 1.38b vecindades de geometría rectangular donde se detallan tres niveles diferentes de proximidad. Esto puede extenderse a otras geometrías de redes (hexagonales, aleatorias, etc.).

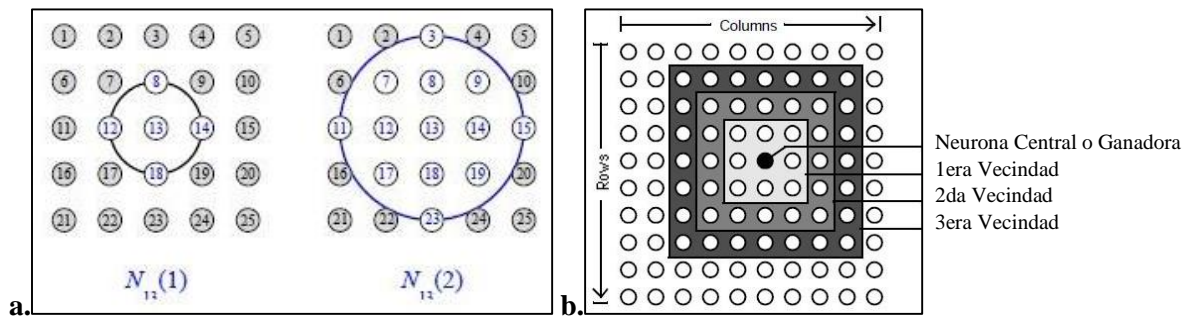


Fig. 1.38. Red rectangular con vecindades. **a.** Circunferenciales **b.** Rectangulares [Demuth y Beale (2002)].

En general para evaluaciones visuales de los resultados (mapas) las redes hexagonales son preferidas ya que no favorecen la corrección vertical y horizontal como lo hace la rectangular [Kohonen (2001)].

También se puede variar el espacio sobre el cual son representadas las neuronas, ya que si la superficie (red de neuronas en 2D) se curva a manera de toroide, se puede recorrer esta figura sin encontrar límites geométricos mapeando la superficie de manera infinita. Para esto, se conectan los índices de los extremos del mapa en el algoritmo de la red. Luego para mostrar los resultados el toroide se desdobra y se muestra la información de manera extendida en un plano de dos dimensiones. En la Fig. 1.39 se puede observar la correspondencia posicional de la información y los sucesivos pasos para transformar una red planar en un toroide uniendo alternativamente sus extremos.

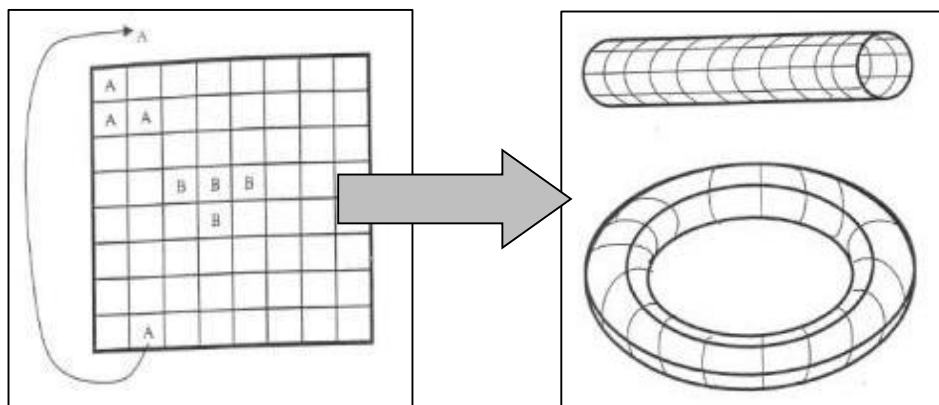


Fig. 1.39. Modificación de una distribución planar de neuronas a una toroidal [J. Zupan y J. Gasteiger (1993)].

Las redes SOM son de una sola capa y el tipo de aprendizaje es competitivo no supervisado. Esta red no recibe la relación entre los objetos de entrada y la respuesta objetivo, sino que sola encontrará las asociaciones entre los vectores de entrada. En el aprendizaje competitivo todas las neuronas de la red producen un resultado al ingresar un vector de datos, pero solo el ganador (neurona ganadora), será la respuesta única de la red que se registrará en el mapa, mientras que las respuestas no ganadoras se harán cero. Luego, a las neuronas vecinas a la ganadora se les aplica una corrección de pesos y una modificación del bias según ciertas reglas. Esto permitirá mapear la estructura de la información asociando los vectores de información que sean semejantes. Las neuronas entrenadas con reglas de aprendizaje tipo Kohonen se ajustan gráficamente para representar en un mapa de dos dimensiones las entradas de las señales a la red que son similares entre sí.

Para comprender el funcionamiento de una red tipo SOM se comenzará por explicar un ejemplo extraído del tutorial de MATLAB para redes neuronales donde se detalla el funcionamiento de una neurona de tipo competitivo. Luego este comportamiento podrá ser extrapolado a una red de neuronas más complejas.

En la Fig. 1.40 se puede observar la arquitectura de una neurona tipo competitiva donde hay un operador denominado *ndist* que recibe el vector de datos p y una matriz de pesos $IW^{l,l}$ cargada con anterioridad. Este operador da como salida un vector de S^l elementos (el supra índice indica la capa de pertenencia). Estos elementos se definen como los negativos de la distancia entre el vector de entrada p y los vectores de las filas de la matriz de pesos $iIW^{l,l}$. La matriz de pesos IW es una matriz que se utiliza desde el inicio del ciclo de cálculo, en principio los pesos de esta matriz pueden tener cualquier valor (generalmente normalizados) y están distribuidos al azar. Estos pesos luego se ajustarán a medida que progresa el cálculo iterativo.

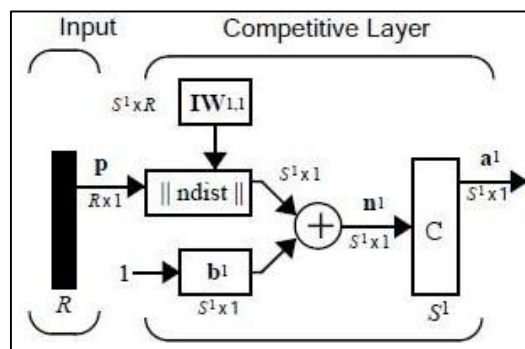


Fig. 1.40. Arquitectura de una neurona competitiva [Demuth and Beale (2002)].

La entrada neta n^l de una capa competitiva se calcula buscando el negativo de la distancia entre los vectores de entrada p y los pesos $iIW^{l,l}$ para luego sumarle el bias. Si todos los

bias son 0, el máximo valor de entrada que la neurona puede tener es 0, esto ocurre cuando el vector de entrada es igual al vector de pesos de una neurona determinada. La función de transferencia competitiva (C) acepta las entradas n (vector p evaluados en $ndist$ con respecto a los pesos w más el bias) y da como salida 0 para todas las neuronas excepto para la ganadora, que en este caso es la neurona asociada al valor más positivo de las entradas n , y hace esta salida igual a 1. Resumiendo, si todos los bias son 0, entonces la neurona cuyo vector de pesos está más cerca del vector de entrada p tiene el valor menos negativo y dará el valor n más grande, razón por la cual gana la competencia y esta salida toma valor 1, haciendo 0 el resto de las demás neuronas.

El algoritmo competitivo permite que los pesos de las neuronas aprendan los vectores de entrada. En consecuencia, la neurona cuyo peso esté más cerca del vector de entrada p es actualizada para estar aún más cerca. El resultado de este mecanismo realizado de manera iterativa es que la neurona ganadora es más propensa a ganar la competencia nuevamente cuando ingrese un vector de similares características, y menos propensa a ganar cuando un vector de entrada de diferentes características sea ingresado al sistema. A medida que más vectores son pasados por la red, cada neurona ajusta su distancia a un grupo de vectores de entrada con alguna similitud. Eventualmente si existen suficientes neuronas, cada grupo de vectores de datos similares tendrán una neurona que tenga salida 1 cuando el vector de ese grupo sea presentado y tendrá salida 0 el resto del tiempo. Este comportamiento se ve incrementado aún más por la aplicación de funciones que además de corregir los pesos de las neuronas ganadoras modifican los pesos de las vecindades asociadas a esas neuronas haciendo que las mismas se aglutinen formando clústeres de neuronas, esto da como resultado zonas de clasificación de información.

Los criterios para seleccionar la neurona ganadora pueden variar, en un caso puede ser la neurona que tenga el valor de salida más alto en toda la red o la que tenga el peso (W) más parecido a la señal de entrada como el caso del ejemplo anterior. Una vez seleccionada la neurona ganadora (C) según el criterio deseado se deben corregir los pesos de esta neurona en cuestión y de la vecindad también, de manera que su próxima respuesta sea mayor o más cercana al comportamiento seleccionado. Las correcciones que se realizan en la vecindad no son iguales para todas las neuronas, sino que dependen de la *distancia topológica* $dc-dj$ de una neurona cualquiera de la vecindad J con respecto a la neurona ganadora C .

$$a(.) = a(dc - dj)$$

$$a(.) = a(dc - dj)$$

La extensión y la forma de la estimulación de la corrección hacia las vecindades depende de la función $a(\cdot)$. La Fig. 1.41 muestra las diferentes formas que puede tener dicha función de corrección.

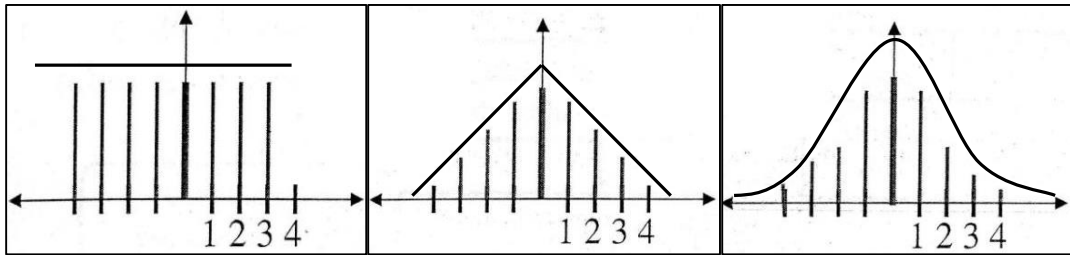


Fig. 1.41. Forma de las funciones de corrección en respecto de la vecindad **a.** constante, **b.** triangular, **c.** Gaussiana [Modificado de J. Zupan y J. Gasteiger (1993)].

Estas correcciones además de decrecer con el aumento de la distancia $(dc - dj)$, decrecen a medida que aumentan los pasos de la iteración para hacer un ajuste más fino antes de finalizar el entrenamiento. Esto se lleva a cabo multiplicando la Ec. 3.1 por otra función $\eta(t)$ $\eta(t)$ monótonamente decreciente, por lo que la nueva función queda determinada de la siguiente manera:

$$f = \eta(t).a.(dc - dj)$$

A su vez $\eta(t)$ $\eta(t)$ se puede expresar como:

$$\eta(t) = (a_{\max} - a_{\min}) \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - 1} \right) + a_{\min}$$

Donde t es el número de vectores de información (1, 2, 3, ..., n) que van ingresando a la red en el proceso de entrenamiento y t_{\max} es el número total de vectores del lote de datos que serán ingresados durante el entrenamiento. Por lo tanto, el tiempo de entrenamiento será proporcional al número de objetos ingresados a la red. Cuanto más grande sea el lote de entrenamiento, mayor será la duración de dicha etapa. Las correcciones pueden ser limitadas tanto en sus valores mínimos como máximos. Esto previene que sean tan pequeñas que la red no converja a un resultado con un error bajo, en una cantidad razonable de épocas. Por otro lado, si son valores altos, se puede acortar el tiempo de entrenamiento siempre y cuando la red mantenga la estabilidad. Podría ocurrir que dada la severidad de la corrección la red comience a oscilar frustrando la convergencia al mínimo error independientemente de la cantidad de épocas que se procese la información.

La ecuación de corrección de pesos de las neuronas de la vecindad definida por la función f depende de criterios competitivos mediante los cuales se seleccionó la neurona ganadora C . La ecuación correspondiente al criterio de selección donde gana la neurona que tenga el peso más similar al vector de entrada se puede escribir como:

$$W_{ij}^{nuevo} = W_{ij}^{viejo} + \eta(t).a.(dc - dj).(p_i - W_{ij}^{viejo})$$

Donde p_i es un vector de datos arbitrario de la matriz de entrenamiento. La función depende de $\eta(t)\eta(t)$, donde t está asociado al número de épocas por la cual la red está iterando. La distribución inicial de los pesos (antes de comenzar el entrenamiento) asociados a las neuronas puede ser de manera lineal o aleatoria donde a la larga está demostrado que los pesos aleatoriamente ordenados, se ordenarán usualmente en las primeras cien iteraciones [Kohonen (2001)]. Una de las utilidades que se le puede dar al bias en este tipo de redes es debido a la existencia de algunas neuronas que nunca llegan a ser ganadoras. Debido a esto, sus pesos nunca son ajustados, y por el contrario sus pesos quedarán desactualizados y lejos de los vectores de entrada, sin importar cuánto se entrene la red. Estas neuronas son llamadas neuronas muertas y no realizan ninguna función útil. Para prevenir este suceso, el bias es usado para darle solamente a las neuronas que raramente o nunca ganan la competencia una ventaja sobre las neuronas que ganan más frecuentemente. Un bias positivo sumado a la distancia negativa (como el caso de la Fig. 1.38) hace que una neurona lejana tenga más probabilidades de ganar. Para hacer esto, un promedio de las neuronas activas es registrado. Este valor promedio es usado para actualizar el bias de las neuronas raramente activadas haciéndose cada vez más grande y reduciéndose progresivamente para las neuronas que ganan frecuentemente. Como resultado el bias de la neurona “poco ganadora” es aumentado, incrementando la respuesta de esta neurona con respecto a los vectores de entrada y así actualizando sus pesos, eventualmente esta neurona responderá en promedio igualmente a los vectores de entrada como lo hacen las otras neuronas. Este procedimiento tiene dos efectos beneficiosos. El primero es que para una neurona que nunca gana la competencia por tener sus pesos lejos de los vectores de entrada, su bias se hará lo suficientemente grande como para que le sea posible ganar la competencia, y cuando esto suceda, la neurona se moverá hacia un grupo de vectores de entrada de manera de seguir disminuyendo el espacio que los separa y entonces su bias comenzará a disminuir hasta 0. Así es resuelto el problema de las neuronas muertas. La segunda ventaja del bias es que fuerza a cada neurona a clasificar aproximadamente el mismo porcentaje de vectores de

entrada, por lo tanto, si existe una gran cantidad de vectores de entrada de una especie, esta zona atraerá más cantidad de neuronas y podrá clasificar la información en subclases más pequeñas.

Finalmente, los mapas que dan como resultados las SOM pueden ser mostrados de diferente manera. Algunas de ellas pueden físicamente cambiar la distancia de las neuronas de la red para aglutinarse mostrando los grupos de neuronas que tienen respuestas similares como se muestra en la Fig. 1.42a o pueden ajustar simplemente sus pesos en posiciones fijas mostrando regiones que clasifican vectores datos que tienen características semejantes. En la Fig. 1.42b se pueden apreciar zonas de clasificación identificadas con diferentes colores en donde se pueden diferenciar cinco regiones topológicas dentro del mapa.

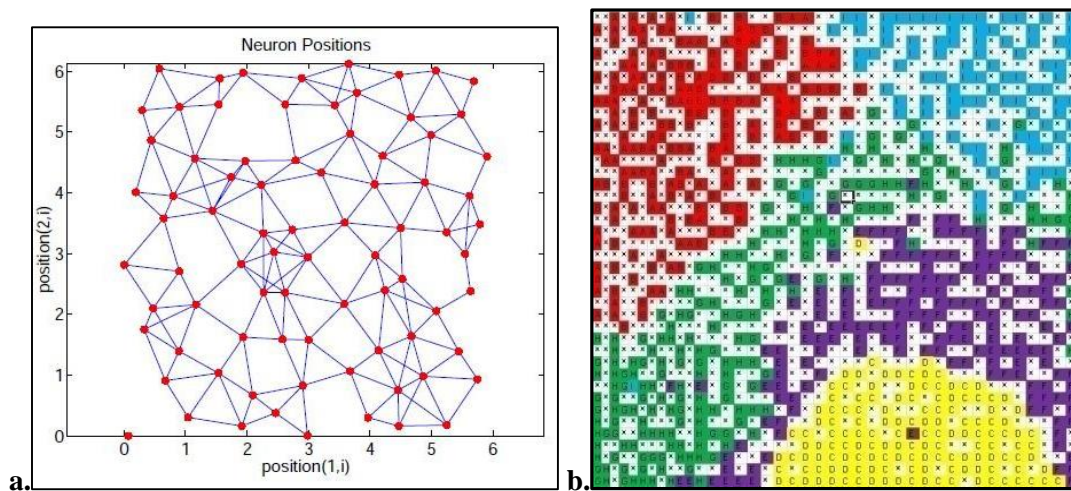


Fig. 1.42. Diferentes mapas resultantes de redes SOM. **a.** Neuronas móviles [Demuth y Beale (2002)]. **b.** Neuronas fijas con zonas de clasificación.

Como se puede observar, estos tipos de redes neuronales tienen la capacidad de resolver una gran cantidad de problemas, lineales y no lineales, y lo que es igualmente importante es que poseen la capacidad de mostrar la relación entre la información de carácter multivariable de manera sencilla.

Capítulo 2

INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE CORTE, MECÁNICA Y HERRAMIENTAS DE PERFORADO Y CLASIFICACIÓN DE LOS GEOMATERIALES ROCOSOS

El aspecto mecánico del proyecto implica un entendimiento de los posibles mecanismos de corte y de los parámetros que tiene un peso preponderante sobre el proceso. Esto permitirá diseñar un modelo de máquina que cumpla con los requerimientos para perforar los geomateriales del proyecto. En el presente capítulo se mostrarán los basamentos teóricos de los posibles mecanismos de falla durante el corte de roca, los cuales se compararán con el proceso de corte en metales. Posteriormente se analizarán las ecuaciones que describen el proceso de perforado y que permitirán calcular los parámetros de máquina del modelo. Por último, se realiza una descripción de las características y consideraciones generales de las herramientas de perforación de diamante y carburo para finalizar con una descripción y clasificación de los tipos de geomateriales rocosos utilizados en el presente trabajo.

2.1. Modelos de falla y mecánica del corte de roca

Hatamura y Chijiwa (1975), (1976A), (1976B), (1977A) y (1977B) distinguieron tres mecanismos básicos de falla en el corte de suelos (Fig. 2.1). El mecanismo de falla por corte o cizallamiento, el mecanismo de falla por flujo (plástico) y el mecanismo por rasgado. Los mecanismos por flujo y rasgado ocurren en materiales que carecen de ángulo de fricción interna. El mecanismo de corte por cizallamiento ocurre en materiales que tienen un ángulo de fricción interna como la arena. Eventualmente se puede distinguir un cuarto mecanismo de falla, que es el mecanismo por curvado o rizado, como se conoce en el corte de metales. Este mecanismo es una extensión del mecanismo por flujo y su ocurrencia depende de las fuerzas involucradas entre la herramienta de corte y el proceso. Si a los mecanismos de corte de suelos se les adiciona los procesos de corte que pueden ocurrir en rocas, pueden enumerarse dos tipos adicionales de mecanismos de falla, que son el mecanismo de corte tipo trituración y el mecanismo de corte tipo chip o viruta.

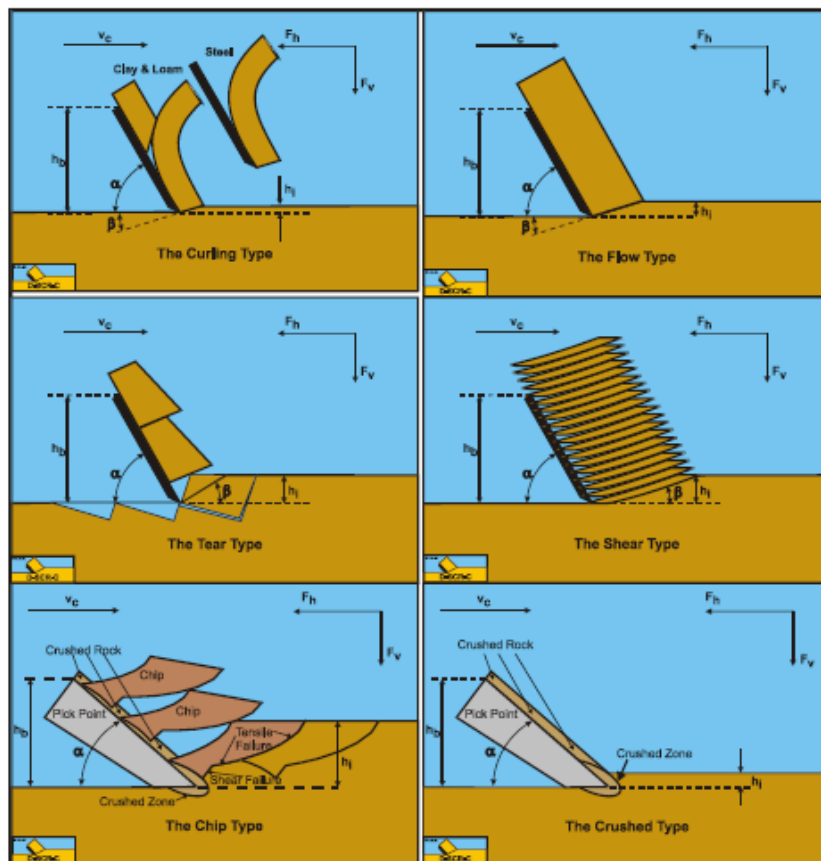


Fig. 2.1. Tipo de falla en geomateriales (suelos y roca). Tipo rizado, Tipo flujo plástico, Tipo desgarramiento, tipo corte, tipo chip y tipo trituración. (S. Miedema 2017).

Adicionalmente se puede considerar un séptimo mecanismo de corte que resulta de condiciones que no pueden ser modelizadas por los mecanismos anteriores y es el corte mediante cuña.

La roca es un material natural el cual está compuesto por la cohesión de materiales orgánicos e inorgánicos que forman parte de la corteza terrestre. Una clasificación general de estas es según su origen, distinguiéndose tres tipos, rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas. Cada uno de estos tipos de roca muestra diferentes propiedades mecánicas como resultado de su estructura interna y la composición química que hacen que. Adicionalmente, si se considera el ambiente donde se produce el proceso de corte que puede ser a presión atmosférica o hiperbárica, con temperatura, o con existencia de líquido, etc. hace que existan múltiples mecanismos de fractura los cuales se manifiestan según las condiciones de contorno del problema.

Para los modelos de corte de rocas a presión atmosférica, la resistencia compresiva sin confinamiento (UCS Uniaxial Compressive Strength), la resistencia tensil sin confinamiento cuyo nombre internacional se conoce como UTS (Uniaxial Tensile Strength), la resistencia tensil brasileña conocida como ensayo BTS (Brazilian Tensile Strength), y el ángulo de fricción interna y externa son las propiedades dominantes en estos materiales. El ángulo de fricción interna se define como el ángulo sobre el círculo de Mohr donde en base a la tensión de corte y la tensión normal efectiva ocurre falla por corte en el material. Este ángulo de fricción interna puede ser determinado experimentalmente en laboratorio mediante un ensayo directo de corte o en un ensayo de tensiones triaxiales. A su vez el ángulo de fricción externa es el resultado de la fricción actuante entre un geo material y otro medio como una pared de retención o la cuchilla de corte. Estos valores están tabulados en función de los pares de fricción que se deseen evaluar y se suele expresar en fracciones de ángulo interno de corte.

Cuando se corta una roca pueden ocurrir diferentes tipos de fallas. Se debe entonces hacer una distinción entre fallas frágiles, dúctiles y mixtas, donde a su vez las fallas de tipo frágil pueden ser clasificadas en falla frágil por corte o falla frágil por tensión o una combinación de ambas. El tipo de falla está principalmente determinado por el llamado número de ductilidad, el cual es la relación entre la resistencia compresiva dividida y la resistencia tensil, UCS/BTS. En casos extremos la presión de confinamiento y la temperatura también juegan un papel importante en el proceso de corte que puede eventualmente modificar los

mecanismos de falla. La Fig. 2.2 muestra un registro de las fuerzas de corte durante la falla en modo frágil y dúctil, donde las fuerzas involucradas durante el corte mediante un tipo de falla frágil tienen fuertes fluctuaciones en su valor, mientras que la falla dúctil muestra una fuerza constante durante el proceso de corte.

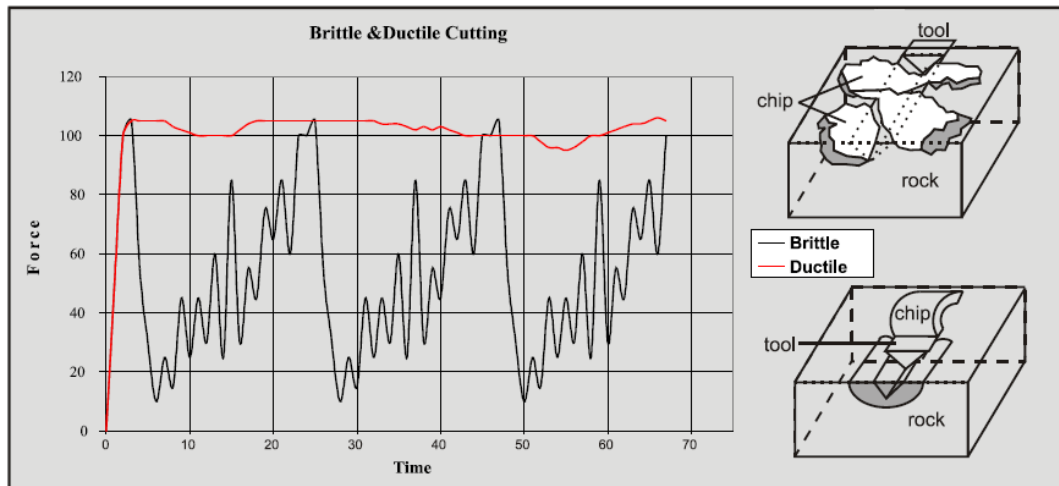


Fig. 2.2. Comparación de fuerzas de corte respecto de una roca frágil y una roca dúctil, Verhoef (1997).

Durante el corte en modo frágil existe una acumulación de fuerza y la falla ocurre cuando esta fuerza acumulada (y por lo tanto las tensiones en el material) exceden cierto límite, después del cual la roca instantáneamente colapsa y la fuerza decrece rápidamente. La fractura frágil es siempre destructiva, lo que significa que la estructura de la roca cambia durante el proceso de falla de una manera irreversible. Durante el corte de suelos, la falla dúctil en su forma pura es deformación plástica y es reversible mientras que, en el corte de rocas, una falla dúctil, es usualmente cataclástica, lo que significa que su microestructura es destruida en el proceso, lo que es irreversible. En la Fig. 2.3 se esquematizan los comportamientos frágil, dúctil y mixto de las curvas tensión deformación para los tres comportamientos enunciados.

En base a esto se establecieron criterios generales para definir el modo de falla de las diferentes rocas y materiales granulares:

Tipo de mecanismo de falla por flujo. Este tipo de mecanismo se basa en falla por cizallamiento plástico, el cual es no destructivo y es continuo. La curva tensión-deformación de la Fig.2.3 muestra el comportamiento de deformación plástica dúctil. Este tipo de falla ocurre a muy altas presiones y/o temperaturas. El flujo de magma es un ejemplo de este tipo de comportamiento.

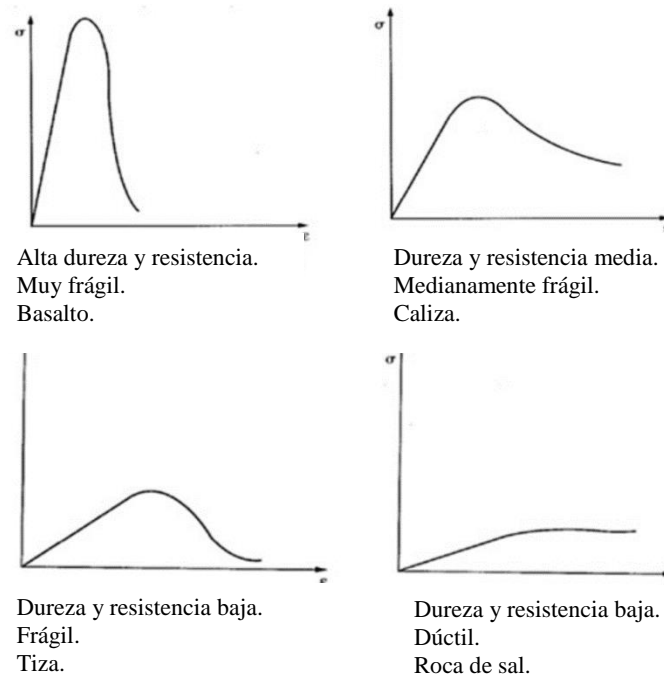


Fig. 2.3. Diagrama tensión deformación para geomateriales con tipos de falla frágil, dúctil y mixto.
(Modificado de Hudson and Harrison, 1997).

Tipo de mecanismo de falla por desgarramiento: Se observa cuando $UCS / BTS =$ grande. Este tipo de mecanismo es completamente una falla por tensión tensil (tracción) y ocurrirá cuando los valores absolutos de los ensayos UTS o BTS son muy pequeños en comparación con UCS. Este mecanismo de falla es discontinuo.

Tipo de mecanismo de falla tipo chip o Viruta: Se observa cuando $UCS / BTS =$ medio. Esta falla está basada en una combinación de falla por cizalla y falla por tracción, con la existencia de una zona de material triturado cerca del extremo de la herramienta de corte. El porcentaje de falla por cizalla o tensión depende de la relación entre los valores UCS / BTS. Una relación grande da como resultado más porcentaje de falla por tracción, mientras que una relación pequeña resulta en un porcentaje mayor de fallas por cizallamiento. Este tipo de mecanismo de corte es discontinuo.

Tipo de mecanismo de falla por Cizallamiento: Se observa cuando $UCS / BTS =$ pequeño. Este tipo de falla ocurre completamente por cizallamiento del plano de corte cuando el valor de los ensayos UTS o BTS es grande y las tensiones normales sobre el plano de corte son altas. Esto usualmente ocurre cuando para grandes ángulos de cuchillas. Este es un mecanismo de corte es discontinuo.

Tipo de mecanismo de falla por trituración: Falla cataclástica basada en cizallamiento y similar al mecanismo de corte por flujo y cizallamiento como el que resulta del corte de arena. Este tipo de mecanismo se da por desintegración de la matriz que incluye los granos de la roca y se identifica como un mecanismo pseudo dúctil ya que muestra comportamiento dúctil en la curva tensión deformación, siendo no plástico y destructivo. En general durante el corte de rocas el mecanismo tipo trituración resultará si se raspa o corta una capa delgada de material rocoso como sucede durante los procesos de perforación de petróleo y gas. Este mecanismo es similar al mecanismo por cizallamiento (extensión del mecanismo tipo flujo), con la salvedad que previamente el material debe ser triturado debajo de la cuchilla de corte. Adicionalmente el mecanismo de corte tipo viruta se observa cuando el proceso de corte se lleva a cabo extrayendo gruesas capas de material rocoso como sucede en los procesos de dragado.

A continuación, se realizará una introducción a la construcción de modelos de falla que contemplan las envolventes de zonas de integridad y fractura del material. La construcción de estos modelos se basa en la realización de ensayos mecánicos en condiciones variadas de tensiones y su representación mediante la utilización de los círculos de Mohr, donde luego se traza la envolvente correspondiente a los límites de estabilidad estructural del material. Varios mecanismos de falla pueden ser observados según la condición de corte. Por ejemplo, durante el proceso de dragado, se utilizan ángulos de cuchilla de aproximadamente 60 grados. Con estos ángulos de hoja se produce el mecanismo de corte por falla tipo chip. Con ángulos de cuchilla más pequeños, se hace visible el mecanismo de corte por falla tipo desgarramiento, mientras que los ángulos más grandes de cuchillas muestran mecanismos de corte por falla de cizallamiento. Cuanto mayor sean las tensiones normales durante el corte de la roca, es menos probable que ocurra una falla por tracción. Esto marca que tanto la geometría del cortado como las variables del proceso y el material pueden modificar la forma de falla del material. En algunos casos, cuando el extremo de la herramienta comienza a penetrar en la roca, suelen producirse tensiones normales muy elevadas delante y debajo de la punta de la misma, lo que resulta en la trituración de la roca, destruyendo la matriz que une los granos. En el diagrama de tensión deformación, este comportamiento se muestra como dúctil, pero como también es destructivo y se le llama pseudo dúctil. Luego, si el espesor de la capa cortada es muy pequeño, como sucede en los procesos de perforación de petróleo y gas, la zona triturada puede surgir hacia la superficie del material que se está cortando y todo el proceso de desintegración se desarrolla por triturado. Contrariamente si

el espesor de la capa es grueso, como en los procesos de dragado, el mecanismo de falla es tipo Chip, el cual es una combinación de mecanismos. Entre la zona triturada y la roca intacta se puede identificar un plano de corte en función del principio de mínimo trabajo de deformación. Cuando progresa el avance del extremo de la cuchilla de corte, se produce un aumento el esfuerzo cortante en este plano de corte, finalmente cuando el esfuerzo cortante excede la resistencia al cizallamiento (cohesión) se producirá una grieta frágil por cizallamiento. El esfuerzo cortante debe exceder la resistencia al corte en el inicio de la fisura de corte, como se menciona en el enfoque de Nishimatsu (1972). A medida que el extremo de la cuchilla avanza, la tensión normal y la tensión de corte aumentan, lo que da como resultado un círculo de Mohr con radio creciente. Si el radio de este círculo aumenta más rápido que la tensión normal en el centro del círculo de Mohr, las tensiones principales mínimas disminuyen y eventualmente pueden convertirse en negativas. Si esto sucede puede que su valor sea menor que los valores negativos de la resistencia a la tracción, resultando en una falla por tracción. En base a esto, el proceso comienza con una zona triturada, luego posiblemente continua mediante falla por corte en un plano de corte, finalizando por falla por tracción. Si la resistencia a la tracción es alta, es posible que únicamente ocurra falla por cizallamiento. El proceso de triturado se iniciará localmente si cierto criterio es excedido, donde generalmente el criterio de Mogi (1966) es aplicado, el cual establece una relación entre las tensiones principales máximas respecto de las mínimas de 3.4 para arenisca y de 4.2 a 6 para Calizas. El proceso de trituración no ocurre instantáneamente, sino que él mismo es gradual, basado en la estructura de la roca y en la mecánica de distribución de las microfracturas sobre la estructura de la misma. La trituración comienza por las regiones donde la roca es más débil, mediante la creación de micro fisuras, lo que deja partículas de gran tamaño, compuestas de muchos granos. Con el aumento de la tensión normal, estas partículas grandes se fragmentan en partículas más pequeñas y este proceso continuará hasta que las partículas resultantes sean lo más pequeñas posible, que son los granos constituyentes de la roca. El valor del ángulo de fricción interna, en el caso de una roca intacta varía ligeramente en función de la situación tensional ya que está básicamente relacionado con la estructura interna de la roca intacta. Sin embargo, cuando comienza el proceso de fractura y trituración, la estructura de la roca se modifica, lo que resulta en un decrecimiento del ángulo de fricción interna hasta el valor de las partículas más pequeñas (los granos), con altas presiones de confinamiento. A continuación, se muestra en la Fig. 2.4 la creación de una envolvente de falla en función de los ensayos mecánicos UCS, UTS, BTS y otros criterios.

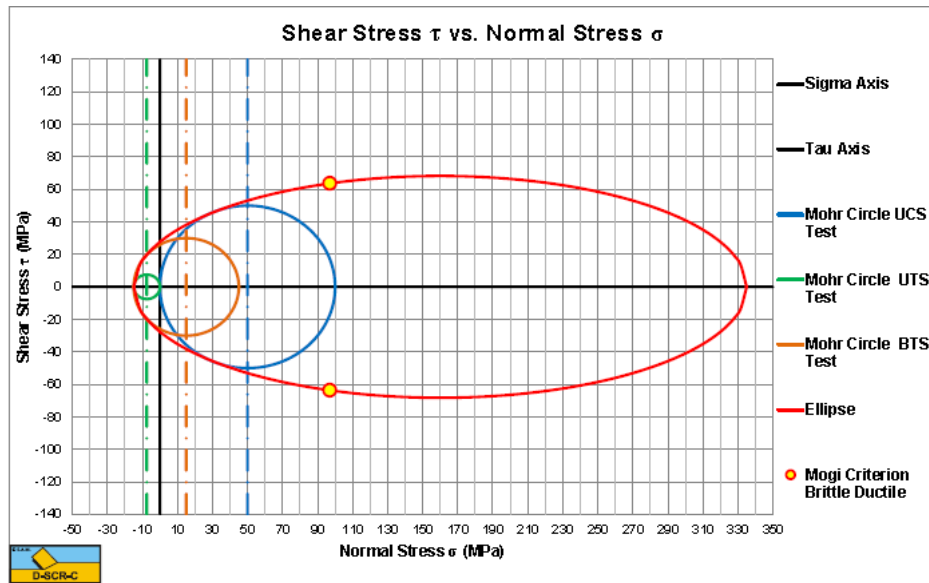


Fig. 2.4. Envolvente de falla para roca intacta. (S. Miedema 2017).

La Fig. 2.4 muestra esta envolvente de falla, donde el máximo de la tensión normal se establece en el ensayo de compresión hidrostática (HCS Hydrostatic Compression Test), donde el material se tritura sin la presencia de cizalla. Esta resistencia a la compresión hidrostática (HCS) es levemente superior a los valores del ensayo UCS de esta roca en particular. Sin embargo, no todas las rocas muestran este tipo de comportamiento. Es importante saber entonces, que esta envolvente se basa en pruebas triaxiales en roca intacta. La Fig. 2.5 muestra la construcción de la envolvente de falla conectando puntos de falla de diferentes círculos de Mohr en función de los ensayos UTS, BTS, UCS y HCS.

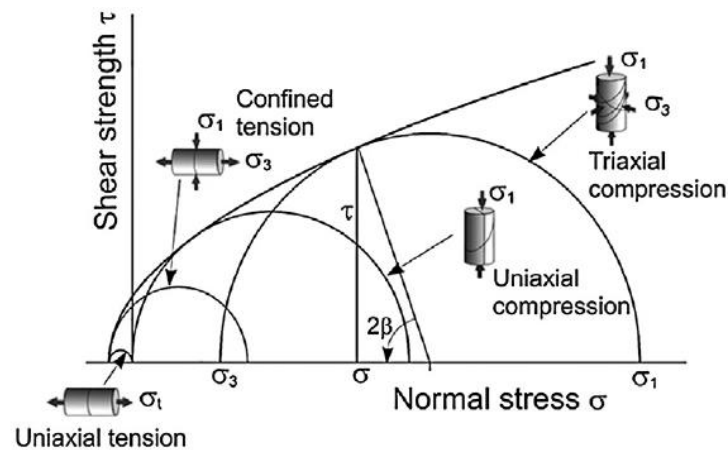


Fig. 2.5. Construcción de envolvente de falla mediante ensayos mecánicos considerando las tensiones principales mayores y menores en función de círculo de Mohr (E. Hoek, C. Martin, 2014).

Al conectar los puntos de falla de los círculos individuales forma la curva de falla del material. Rodear los círculos de Mohr con esta envolvente proporciona un límite en el cual cualquier condición tensional dentro de estos límites previene la falla.

2.1.1. Análisis de relaciones básicas

La relación entre la resistencia al corte (cohesión) c , ángulo de fricción interna φ y las tensiones principales mínimas y máximas se pueden calcular aplicando la relación Mohr – Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

$$\tau = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \cos 2\varphi; \sigma = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \sin 2\varphi$$

Igualando y reemplazando las ecuaciones anteriores y operando se llega a:

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Esta relación es válida para todos los criterios de falla lineales con cohesión c y ángulo de fricción interna φ . Ahora bien, si uno tiene dos círculos de Mohr de diferentes diámetros y se establece que el círculo más pequeño es el 1 y el de mayor diámetro se denomina 2, se puede definir una relación entre la curva de falla y el ángulo de fricción interna.

$$\frac{1 + \sin 2\varphi}{1 - \sin 2\varphi} = \frac{\sigma_{max,2} - \sigma_{max,1}}{\sigma_{min,2} - \sigma_{min,1}} = r$$

Donde operando se puede llegar a definir la cohesión en función del ángulo de fricción interna:

$$c = \frac{UCS}{2} \left(\frac{1 - \sin 2\varphi}{\cos 2\varphi} \right) = \frac{UCS}{2\sqrt{r}}$$

y se puede establecer la igualdad y la relación de Mohr Coulomb que se plantea como :

$$\tau = \frac{UCS}{2\sqrt{r}} + \sigma \frac{r - 1}{2\sqrt{r}} = \frac{UCS + \sigma(r - 1)}{2\sqrt{r}}$$

La roca tiene tanto resistencia al corte como resistencia a la tracción y normalmente se comporta de manera frágil. Si la resistencia a la tracción es alta, la falla se basa en un corte frágil, pero si la resistencia a la tracción es baja, la falla es frágil por tensión ténsil (tracción). En ambos casos el material cortado se expulsa en forma de chip, por lo tanto, la roca tiene un verdadero comportamiento frágil. Sin embargo, en condiciones hiperbáricas, la presión de poro de la roca será significativa, lo que ayuda la resistencia a la tracción a mantener las

grietas cerradas. El resultado es una zona triturada de mayor espesor que eventualmente puede llegar a la superficie. Debido a las presiones ejercidas, todo el proceso es dominado por la trituración y este material triturado se pega, donde visualmente parece un material dúctil. Esa es la razón por qué se suele hablar del comportamiento dúctil de la roca hiperbárica. En realidad, es un comportamiento cataclástico, que también podría ser llamado comportamiento pseudo dúctil. *Ahora bien, si la alta presión de confinamiento es el resultado de una alta presión hiperbárica o del proceso de corte no es importante, en ambos casos puede ocurrir el comportamiento pseudoplástico.* Gehking (1987) afirmó que se producirá un comportamiento pseudo dúctil cuando la relación UCS / BTS <9. El comportamiento frágil ocurre cuando la relación UCS / BTS > 15. Para valores de 9 <UCS / BTS <15 hay una transición entre frágil y pseudo dúctil. Mogi (1966) encontró una relación lineal entre el esfuerzo principal mínimo y máximo en la transición frágil a la falla pseudo dúctil. Para la arenisca estableció $\sigma_{max} = 3.4 \sigma_{min}$, y para la piedra caliza $\sigma_{max} = 4.2 \sigma_{min}$. Estos valores dan una indicación de las relaciones, ya que otros investigadores encontraron $\sigma_{max} > 6 \sigma_{min}$ (Verhoef, 1997). Ahora asumiendo $\sigma_{max} = \alpha \sigma_{min}$ y combinando esto con el criterio

Hoek & Brown (1988) se puede plantear las ecuaciones del círculo de Mohr como:

$$\sigma_{min} = UCS \frac{m + \sqrt{m^2 + 4(\alpha - 1)^2}}{2(\alpha - 1)^2}$$

$$\sigma_{max} = \alpha UCS \frac{m + \sqrt{m^2 + 4(\alpha - 1)^2}}{2(\alpha - 1)^2}$$

$$\sigma_{centro} = \alpha UCS \frac{m + \sqrt{m^2 + 4(\alpha - 1)^2}}{2(\alpha - 1)^2}$$

$$\sigma_{max} = (\alpha + 1) \frac{UCS}{2} \frac{m + \sqrt{m^2 + 4(\alpha - 1)^2}}{2(\alpha - 1)^2}$$

$$\tau_{max} = (\alpha - 1) \frac{UCS}{2} \frac{m + \sqrt{m^2 + 4(\alpha - 1)^2}}{2(\alpha - 1)^2}$$

La Fig. 2.6 muestra un esquema de los diferentes tipos de fracturas, donde en función de la variación de las tensiones principales y presiones de confinamiento se produce un comportamiento de fractura que varía desde totalmente frágil, mixta a dúctil.

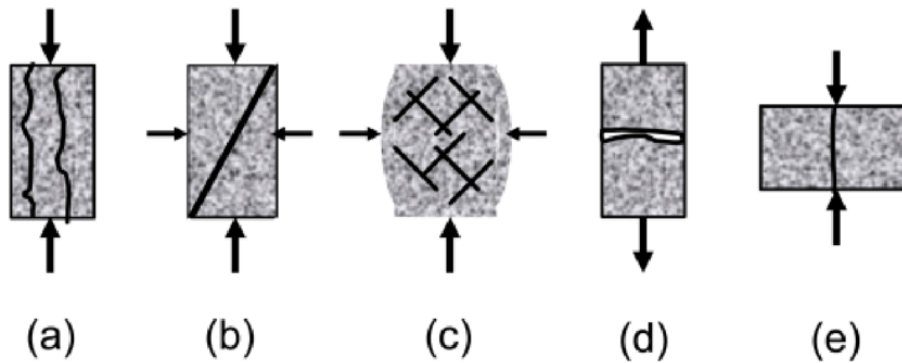


Fig. 2.6. Modos de falla en función de las tensiones principales aplicadas y la presión de confinamiento. **a.** Separación por tracción. **b.** Falla por corte. **c.** Falla por corte múltiple. **d.** Falla tensil. **e.** Falla tensil inducida por cargas puntuales (S. Peng y J. Shang 2007).

En base a todos estos mecanismos se establecen criterios de falla, donde a continuación se enumeran algunos de ellos.

Criterio de falla basado en UTS y UCS, donde se asume que la envolvente es tangente a los círculos de Mohr de estos ensayos, basado en la suposición que la curva de falla siempre debe ser tangente en al menos dos círculos de Coulomb Mohr. Este método resulta en un alto valor del ángulo de fricción interna y consecuentemente en un valor bastante bajo de la resistencia al corte (cohesión). Para hallar un valor correcto estimado del ángulo de fricción interna, debe haber dos o más círculos de Mohr basados en falla por corte.

Criterio de falla basado en BTS y UCS. En este modelo la envolvente es tangente a los círculos de Mohr de los ensayos BTS y UCS basados en que la curva de falla debe ser tangente en al menos dos círculos de Coulomb Mohr. Este método tiene las mismas limitaciones que el método anterior aunque los resultados del ángulo de fricción resultan ser algo más bajos. En este caso, uno de los círculos de Mohr está basado en falla por corte, mientras que el otro está basado en falla tensil. Si esto no ocurre el criterio no puede ser aplicado.

Criterio de falla Hoek y Brown. Este es un modelo empírico que fue desarrollado en base a los valores de los ensayos UCS, BTS, UTS en función de cada tipo de roca. Los resultados de las envolventes para este modelo parecen ser más realistas, ya que están basados en una variedad de ensayos.

Modelo de falla de envolvente parabólica en función de los ensayos UTS y UCS. Basados en los resultados de los ensayos UTS, BTS, y UCS se puede construir una parábola de las tensiones normales en función de las tensiones de corte con condiciones de borde tales que

la parábola vaya a través de los puntos de los ensayos UTS o BTS (tensión de corte igual a cero y tensiones normales iguales a $-UTS$ o $-BTS$ y la derivada de $\frac{d\sigma}{d\tau} = 0$) y conecte el círculo de Mohr del ensayo UCS de forma tangente. Como este criterio está basado en los ensayos UTS o BTS y UCS y no en dos ensayos con falla por corte, la curva resultante es más realista.

Criterio de Elipsoide evolvente en función de ensayos UTS y UCS. Este criterio utiliza una elipse en vez de una parábola, lo que brinda mayor flexibilidad a la forma de la evolvente de falla.

Criterio de falla Lineal. En este criterio la mejor forma de hallar el ángulo de fricción interna es ejecutar al menos dos ensayos con diferentes presiones de confinamiento en el rango de las tensiones normales de corte en las cuales el proceso de corte espera operar.

Criterio de falla de Griffith. Este criterio se deriva de la falla frágil donde se asume que la fractura ocurre mediante una rápida extensión de fallas sub microscópicas preexistentes aleatoriamente distribuidas en el material. En base a esto si UCS/UTS o UCS/BTS es mayor 8 ocurrirá falla frágil.

Hasta aquí, seis criterios de falla se han expuesto. Para encontrar el mejor modelo de falla, se deben realizar ensayos con diferentes presiones de confinamiento, lo que resulta en una falla por cizallamiento y un conjunto de círculos de Mohr. Dado que esta información no siempre está disponible, se pueden utilizar las aproximaciones mediante el criterio de Hoek y Brown, el criterio del paraboloides o del elipsoide. Por encima de la tensión normal de transición frágil-dúctil, la curva de falla disminuirá según Verhoef (1997), basado en la investigación de van Kesteren (1995). Como se mencionó anteriormente, en situaciones de mayor tensión, habrá fractura y trituración y cuanto mayor sea la tensión normal, más mayor será este proceso. En el inicio de la trituración, hay una disminución del ángulo de fricción interna, mientras que la curva de falla sigue aumentando. Sin embargo, en determinadas situaciones de tensión, la curva de tensión puede estar en su máximo dado que el ángulo de fricción interna decrece demasiado. Este máximo generalmente se encuentra cerca del criterio de Mogi. Como la roca intacta y la roca triturada son dos materiales con diferentes propiedades, el material tiene propiedades que cambian continuamente en función del tamaño de las partículas que se van creando, donde las primeras partículas en formarse son grandes y constan de muchos granos de roca y cuando las tensiones aumentan, estas partículas también se trituran, dando como resultado partículas más pequeñas, hasta el

tamaño de los granos de la roca. Cuando el ángulo de fricción interna disminuye más rápido que el aumento de las tensiones normales, la curva de falla disminuye. Esto no significa que haya fricción interna negativa, normal a la tangente a la curva de falla, sino que significa que el ángulo de fricción interna disminuye más rápido que el aumento de las tensiones normales y la resistencia al corte de la roca triturada se va reduciendo a cero. Verhoef (1997) y Vlasblom (2007) muestran curvas de falla con reducción a cero para tensiones normales muy elevadas. Es más probable que la roca una vez completamente triturada, tenga un ángulo de fricción interno residual y posiblemente una resistencia al corte residual. Esto último es posible, por ejemplo, cuando las partículas son tan pequeñas que las fuerzas van der Waals empiezan a jugar un papel preponderante, lo que dependerá completamente del tipo y composición de la roca.

En base a lo anteriormente expuesto, a continuación, se analizarán las mecánicas de los cortes frágil y dúctil para material rocoso. Los modelos de corte de las Fig. 2.7 muestran mecanismos de falla tipo trituración y viruta o chip, los cuales se dan en materiales rocosos donde ambos tienen una zona de trituración en la punta de la cuchilla.

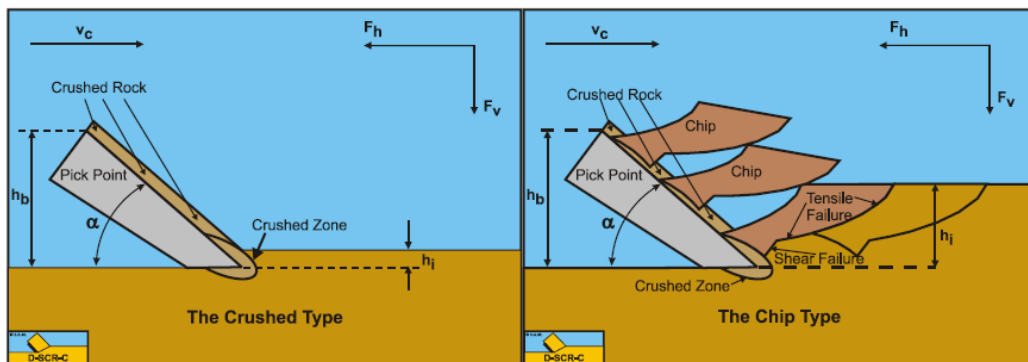


Fig. 2.7. Mecanismo de corte tipo trituración y tipo chip (S. Miedema 2017).

Al cortar la roca con un indentador, generalmente se producirá una zona aplastada delante y debajo de la punta de este. Si la profundidad del corte es pequeña, esta zona triturada puede alcanzar la superficie y ocurre un proceso de trituración completa. Si la profundidad de corte es mayor, el material triturado no puede escapar y las tensiones en la zona triturada aumentan fuertemente. Según Fairhurst (1964) las fuerzas de corte se transmiten a través de las partículas y el contacto entre ellas. Las tensiones se transmiten a la roca intacta por puntos discretos de carga causando micro fisuras por cizallamiento y finalmente una grieta de tracción. El tipo de falla depende básicamente de la relación UCS / BTS donde en función de la relación la falla pasará de ser completamente frágil a completamente pseudo dúctil.

Entre estos límites hay una transición entre falla frágil a dúctil, que también está de acuerdo con los hallazgos de Fairhurst (1964). El mecanismo descrito anteriormente es difícil de modelar. En la literatura existen algunos modelos, como el modelo de Evans (1964) basado en falla tensil y el modelo de Nishimatsu (1972) basado en falla por cizalladura y también se utiliza el modelo de Merchant (1944) aplicado al corte de metales el cual está basado en la falla por cizallamiento plástico.

El modelo de Evans (1964) asume una tensión de tracción máxima en todo el plano de falla, que podría coincidir con las fuerzas máximas, pero sobreestima la fuerza media. Nishimatsu (1972) incorpora un factor para la distribución del esfuerzo cortante en el plano de falla, lo que le permite al modelo tener en consideración que la falla puede comenzar cuando el esfuerzo cortante no es máximo en todas partes del plano de corte. Basado en el modelo Merchant (1944) para corte de acero y el modelo Miedema (septiembre de 1987) para el corte de arena, se desarrolló un nuevo modelo tanto para corte dúctil, corte cataclástico dúctil, corte frágil por cizallamiento y por tracción. En primera instancia este modelo deriva del modelo de falla por flujo, el cual describe la falla por cizallamiento dúctil o falla por cizallamiento frágil. En el caso de rotura por cizallamiento frágil, se calculan las fuerzas de corte máximas (fuerzas pico) y se estiman las fuerzas medias en un 30% a 50% de las fuerzas máximas. En resumen, el hecho de que el corte de roca sea un proceso irreversible, en comparación con el corte de arena o arcilla, significa que los cuatro mecanismos básicos de corte de suelos no se pueden aplicar al corte de roca directamente. El modelo de falla tipo flujo se supone que el material real se comporta de manera plástica el cual una vez cortado está todavía intacto, y en el caso del corte de roca con falla dúctil, desde un punto de vista macroscópico, es cataclástica, y sufre una trituración conjuntamente con cizalladura, donde el material no queda intacto luego del corte y por lo tanto se deben aplicar dos o tres modelos de corte para describir el proceso completo. A continuación, se describe el modelo de corte de Evans, modelo de Nishimatsu, y el modelo de tipo flujo basado en el modelo de Merchant.

2.1.2. Modelos de Evans

Para rocas frágiles, la teoría de corte de Evans se puede utilizar para calcular las fuerzas de corte en función de la Fig. 2.8. Las fuerzas se derivan de la geometría del cincel (ancho, ángulo de corte y profundidad de corte) y la resistencia a la tracción (BTS) de la roca. Evans sugirió un modelo basado en observaciones sobre fractura del carbón mediante la utilización de cuñas.

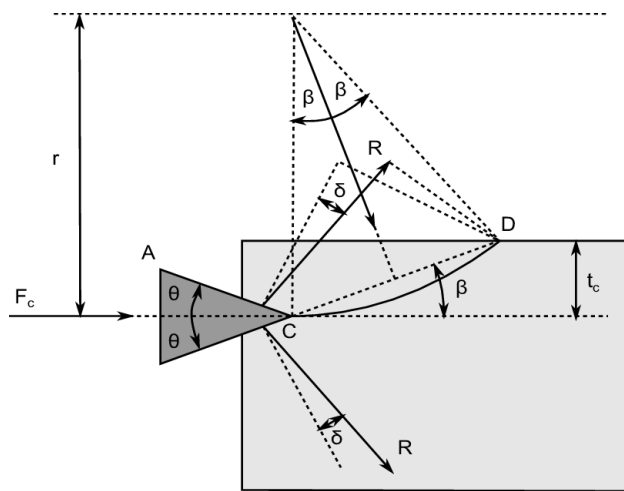


Fig. 2.8. Modelo de Evans para el corte frágil de roca (Evans 1964).

Esta teoría asume:

1. Una fuerza R actúa bajo un ángulo δ (ángulo de fricción externo) con la normal a la superficie A-C de la cuña.
2. Una fuerza resultante T de las tensiones de tracción actuantes en el centro del arco C-D, la línea C-D está bajo un ángulo β (el ángulo de corte) con la horizontal.
3. Se requiere la presencia de una tercera fuerza S para mantener el equilibrio de fuerzas, pero no juega un papel en la derivación.
4. La penetración de la cuña es pequeña en comparación con el espesor de la capa h_i . La acción de la cuña tiende a dividir la roca y hacerla girar alrededor del punto D. Por lo tanto, se supone que la fuerza S actúa a través del punto D. A lo largo de la línea de fractura, se supone que está actuando un estado de deformación plana y el equilibrio es considerado por unidad de ancho w de la cuña.

$$T = \sigma_T r \int_{-\beta}^{\beta} \cos \cos \omega d\omega w = 2 \sigma_T r \sin \sin \beta w$$

Donde $r d\omega$ es un elemento del arco C-D que forma un ángulo ω con el eje de simetría del arco. Luego h_i es la profundidad de corte y se asume que la penetración del borde de corte puede ser desestimada en comparación con h_i . Esto significa que la fuerza R está actuando cerca del punto C. Analizando el momento en el material cortado sobre el punto D se puede establecer:

$$R \cos \cos (\alpha + \beta + \delta) \frac{h_i}{\sin \sin \beta} = T r \sin \sin \beta = 2 \sigma_T r \sin \sin \beta w r \sin \sin \beta$$

En base a las relaciones geométricas se puede establecer:

$$r \sin \beta = \frac{h_i}{2 \sin \alpha}$$

lo que resulta en

$$R = \frac{\sigma_T h_i w}{2 \cos \alpha \cos (\alpha + \delta)}$$

La componente horizontal de R es $R \sin (\alpha + \delta)$ y debido a la simetría de las fuerzas actuantes en la cuña se puede calcular F_c .

$$F_c = 2 R \sin (\alpha + \delta) = \sigma_T h_i w \frac{\sin (\alpha + \delta)}{\cos \alpha \cos (\alpha + \delta)}$$

Las fuerzas normales (perpendiculares a las fuerzas de corte) son por cada lado:

$$F_n = R \cos \alpha = \sigma_T h_i w \frac{\cos \alpha}{2 \cos \alpha \cos (\alpha + \delta)}$$

El ángulo β puede ser determinado utilizando el principio de mínima energía:

$$\frac{dc}{d\beta} = 0$$

Igualando las ecuaciones y operando se obtienen las fuerzas horizontales de corte que son:

$$F_c = \sigma_T h_i w \frac{(\alpha + \delta)}{1 - \sin \alpha \sin (\alpha + \delta)} = \sigma_T h_i w \lambda_{HT}$$

y para cada lado de la cuña las fuerzas normales son:

$$F_n = \sigma_T h_i w \frac{\cos \alpha}{1 - \sin \alpha \sin (\alpha + \delta)} = \sigma_T h_i w \lambda_{VT}$$

La Fig. 2.9 muestra el coeficiente λ_{HT} de la fuerza horizontal de desgarramiento frágil como función del ángulo superior de la cuña α y el ángulo de fricción interno ϕ . El ángulo de fricción interno ϕ no juega un papel directamente, pero se supone que el ángulo de fricción externo δ es $2/3$ del ángulo de fricción interno ϕ .

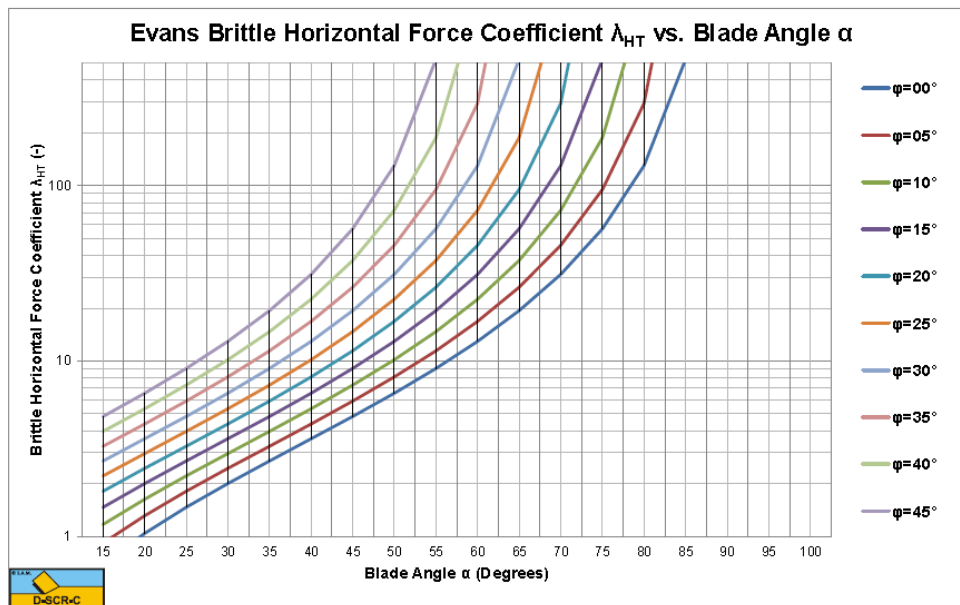


Fig. 2.9. Coeficiente de fuerzas horizontales para desgarramiento frágil en modelo de Evans (S. Miedema 2017).

Existe también dos modelos adicionales de Evans donde el primero asume que el cincel entra a la roca con un ángulo ϵ y la fractura comienza en la misma dirección de la línea central del cincel y el segundo modelo establece el caso en el que el ángulo ϵ es igual al ángulo α , donde el ángulo del cincel es 2α . Estos modelos son una extensión del modelo aquí presentado y se puede encontrar en la bibliografía citada al final del presente capítulo.

2.1.3. Modelo de E. Nishimatsu

Para el corte frágil de rocas se puede también utilizar las ecuaciones de Nishimatsu (1972). Esta teoría describe las fuerzas de corte con herramientas tipo cinceles y falla por cizallamiento. La Fig. 2.10 muestra los parámetros necesarios para calcular las fuerzas de corte. Nishimatsu presentó una teoría similar a la de Merchant (1944), (1945A) y (1945B) con la consideración de que los esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre el plano de falla (A-B) son proporcionales a la n -ésima potencia de la distancia λ entre el punto A y B. Siendo n el llamado factor de distribución de esfuerzos:

$$p = p_0 \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} - \lambda \right)^n$$

Nishimatsu hizo las siguientes suposiciones:

1. El corte de la roca es frágil, sin ninguna deformación plástica que acompañe el proceso (sin zona de trituración dúctil).

2. El proceso de corte se realiza en condiciones de tensión plana.
3. La falla está de acuerdo con una envolvente lineal del círculo de Mohr.
4. La velocidad de corte no influye en los procesos.

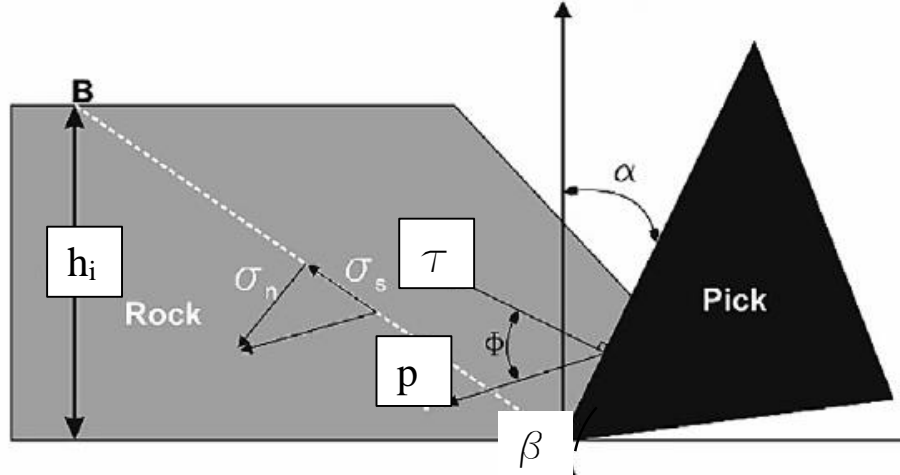


Fig. 2.10. Modelo de falla frágil por corte de Nishimatsu (1972).

Como siguiente supuesto, se establece que la dirección del esfuerzo resultante p es constante a lo largo de la línea A-B. La integración de este esfuerzo resultante p a lo largo de la línea A-B debe estar en equilibrio con la fuerza de corte resultante F . Así tenemos:

$$p_0 w \int_0^{\frac{h_i}{\sin \sin \beta}} \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} - \lambda \right)^n d\lambda = F \Rightarrow p_0 w \frac{1}{n+1} \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} \right)^{n+1} = F$$

Integrando esta ecuación y operando, se puede obtener el valor constante de p_0 el cual puede sustituirse en la ecuación de p , donde el valor máximo de p sucede en la punta del cincel y se considera que $\lambda = 0$.

$$p w = (n+1) \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} \right)^{-1} F$$

La tensión normal y la tensión de corte se calculan mediante:

$$\sigma_0 w = -p w \cos \cos (\alpha + \beta + \delta) = (n+1) \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} \right)^{-1} F \cos \cos (\alpha + \beta + \delta)$$

$$\tau_0 w = p w \sin \sin (\alpha + \beta + \delta) = (n+1) \left(\frac{h_i}{\sin \sin \beta} \right)^{-1} F \sin \sin (\alpha + \beta + \delta)$$

Las cuales si se sustituyen en la ecuación del criterio de falla de Coulomb Mohr y se opera convenientemente se obtienen las fuerzas horizontales y verticales:

$$F_h = \frac{1}{(n+1)} \frac{c h_i w \cos \cos \varphi \sin \sin (\alpha + \delta)}{\sin \sin \beta \sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)}$$

$$F_v = \frac{1}{(n+1)} \frac{c h_i w \cos \cos \varphi \cos \cos (\alpha + \delta)}{\sin \sin \beta \sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)}$$

Para determinar el ángulo de corte β donde la fuerza horizontal F_h es mínima, el denominador de las ecuaciones F_h y F_v tiene que ser máximo. Esto ocurrirá cuando la derivada de F_h con respecto a β sea igual a cero y la segunda derivada sea negativa. Realizando estas operaciones y sustituyendo se obtiene el valor mínimo de F la cual nuevamente se puede descomponer en una F_h y F_v

$$F = \frac{1}{(n+1)} \frac{2 c h_i w \cos \cos \varphi}{1 + \cos \cos (\alpha + \beta + \varphi)}$$

$$F_h = \frac{1}{(n+1)} \frac{2 c h_i w \cos \cos \varphi \sin \sin (\alpha + \delta)}{1 + \cos \cos (\alpha + \beta + \varphi)} = \frac{1}{(n+1)} \lambda_{HF} c h_i w$$

$$F_v = \frac{1}{(n+1)} \frac{2 c h_i w \cos \cos \varphi \cos \cos (\alpha + \delta)}{1 + \cos \cos (\alpha + \beta + \varphi)} = \frac{1}{(n+1)} \lambda_{VF} c h_i w$$

Esta solución es la misma que la solución de Merchant, que se derivará a continuación, cuando el valor del factor de distribución de tensiones $n = 0$. El factor de distribución de tensiones n es solo un factor para reducir las fuerzas. Las pruebas empíricas demuestran que el valor de n depende del ángulo de ataque. Para este caso particular de corte con un ángulo de corte grande, el valor de n es aproximadamente 1. En este caso, la falla por tracción puede dar camino a un proceso de falla por cizallamiento, que también es observado por otras investigaciones. Para ángulos de corte inferiores a 80 grados, n es aproximadamente constante con un valor de $n = 0,5$. La diferencia entre el enfoque de Nishimatsu y el de Merchant es que Nishimatsu asume una falla por cizallamiento frágil, mientras que Merchant asume la deformación plástica, como se puede ver en el corte de acero o arcilla. Nishimatsu utiliza el método BTS-UCS para determinar la resistencia al corte y el ángulo de fricción interna. Este método da un valor alto para el ángulo de fricción interna y un valor bajo para la resistencia al corte. Para el factor n se estableció la ecuación $n = -4,9 + 0,18\alpha$, donde el ángulo de la hoja puede tomar valores de 50 a 80 grados. Con esta ecuación n es aproximadamente 0-1 para la hoja ángulos de alrededor de 30 grados.

2.1.4. Modelo de flujo basado en el modelo de Merchant

Merchant (1944), (1945A) y (1945B) derivó un modelo para determinar las fuerzas de corte al mecanizar acero. El modelo se basó en la deformación plástica y la formación continua

de viruta (corte dúctil). El modelo incluye fricción interna y externa y resistencia al cizallamiento, pero sin adherencia, gravedad, inercia y presiones de poro. Más tarde Miedema (septiembre de 1987) amplió este modelo con adherencia, gravedad, fuerzas de inercia y presión de poro. En la Fig. 2.11 se definen los parámetros básicos de análisis para el mecanismo de corte dúctil.

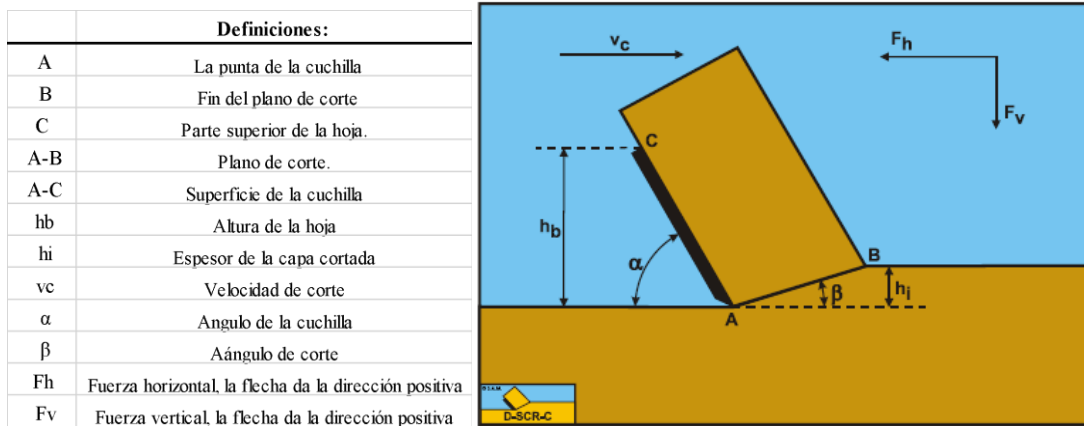


Fig. 2.11. Mecanismo de corte dúctil en roca. (S. Miedema 2017).

La línea A-B se considera como el plano de corte, mientras que la línea A-C representa el área de contacto entre la cuchilla y el material. El ángulo de la cuchilla se denomina α y el ángulo de cizalladura se establece como β . La cuchilla se mueve de izquierda a derecha con una velocidad de corte v_c . El espesor del corte de la capa de material es h_i y la altura vertical de la cuchilla es h_b . La fuerza horizontal sobre la hoja F_h es positiva de derecha a izquierda y siempre opuesta a la dirección de la velocidad de corte v_c . La fuerza vertical sobre la cuchilla es F_v y es positiva hacia abajo. Dado que la fuerza vertical es perpendicular a la velocidad de corte, la fuerza vertical no contribuye a la potencia de corte P_c que se puede establecer como: $P_c = F_h v_c$

La energía específica E_{sp} se define como la cantidad de energía utilizada o requerida para excavar un m³ de suelo o roca. Esto puede ser determinado dividiendo la potencia de corte P_c por la producción Q y da como resultado la fuerza de corte F_h en la dirección de la velocidad de corte v_c , dividida por la sección transversal de corte $h_i w$:

$$E_{sp} = \frac{P_c}{Q} = \frac{F_h v_c}{h_i w v_c} = \frac{F_h}{h_i w}$$

Este modelo de corte de rocas en condiciones atmosféricas se basa en mecanismo de corte tipo flujo plástico. Aunque en general la roca encontrará un mecanismo de falla bien más

frágil, el tipo flujo considerado representa el mecanismo de falla dúctil el cual forma la base para todos los procesos de corte. La identificación de todas las fuerzas involucradas durante el corte se muestra en la Fig. 2.12 y en la tabla 2.1 se identifican todas las variables de las figuras.

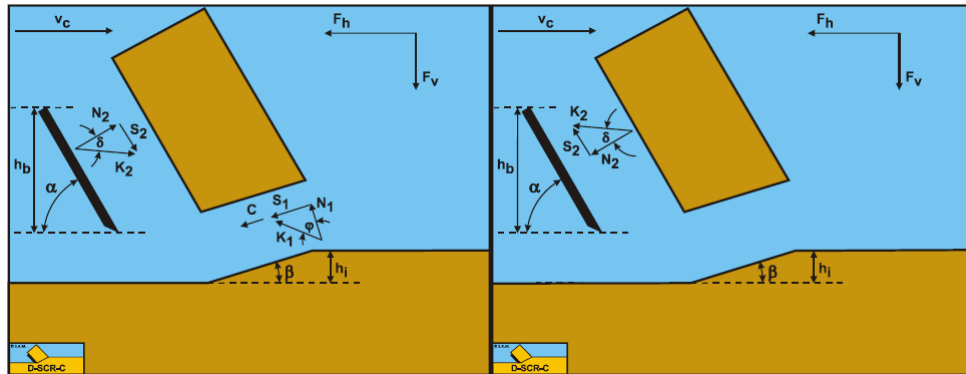


Fig. 2.12. Fuerzas sobre la capa de roca cortada y sobre la cuchilla de corte en condiciones de presión atmosférica (S. Miedema 2017).

Si las fuerzas N_2 y S_2 se combinan en una fuerza resultante K_2 , esta, resulta ser la fuerza desconocida sobre la hoja. Planteando un equilibrio horizontal y vertical de fuerzas se puede derivar la expresión de la fuerza K_2 sobre la hoja.

Equilibrio de fuerzas horizontales.

$$\sum F_h = K_1 \sin \sin (\beta + \varphi) + C \cos \cos \beta - K_2 \sin \sin (\alpha + \delta) = 0$$

El equilibrio de fuerzas verticales:

$$\sum F_v = -K_1 \cos \cos (\beta + \varphi) + C \sin \sin \beta - K_2 \cos \cos (\alpha + \delta) = 0$$

Tabla 2.1. Variables de la Fig. 2.12.

Definiciones:	
N_1	Fuerza normal que actúa sobre la superficie de corte resultante de las tensiones del grano
S_2	Fuerza cortante como resultado de la fricción interna $N_1 \tan (\varphi)$
C	Fuerza cortante C como resultado de la resistencia cortante (cohesión) t_c o c . Esta fuerza se puede calcular multiplicando la resistencia cohesiva al cortante t_c con el área del plano cortante
N_2	Fuerza normal a la cuchilla resultante de las tensiones del grano
S_2	Fuerza cortante como resultado de la fricción entre el suelo y el acero $N_2 \tan (\delta)$ o fricción externa
K_1	Combinación lineal de la fuerza normal N_1 y la fuerza cortante S_1
Fuerzas que actúan sobre una cuchilla:	
N_2	Fuerza normal a la cuchilla resultante de las tensiones del grano
S_2	Fuerza cortante como resultado de la fricción suelo / acero $N_2 \tan (\delta)$, también llamada fricción externa

Fuerza en el plano de corte K_1

$$K_1 = \frac{-C \cos \cos (\alpha + \beta + \delta)}{\sin \sin (\alpha + \beta + \varphi)}$$

Fuerza en la cuchilla K_2 :

$$K_2 = \frac{C \cos \cos (\varphi)}{\sin \sin (\alpha + \beta + \varphi + \delta)}$$

Fuerza C debido a la resistencia cohesiva de corte c es igual a:

$$C = \frac{\lambda_s c h_i w}{\sin \sin \beta}$$

El factor λ_s en la ecuación de C es el factor de endurecimiento producto de la velocidad, que causa un aumento de la cohesión resistencia a la cizalladura. En arcilla (Miedema 1992 y 2010) este factor tiene un valor aproximado de dos en condiciones de corte normal. En roca, el efecto de endurecimiento no se ha observado, por lo que se debe usar un valor de 1. De la ecuación K_2 se pueden derivar las fuerzas sobre la hoja con una componente de fuerza en la dirección de la velocidad de corte F_h y otra fuerza perpendicular a esta dirección F_v .

$$F_h = K_2 \sin \sin (\alpha + \delta)$$

$$F_v = K_2 \cos (\alpha + \delta)$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones para las fuerzas de corte horizontales (F_h) y verticales (F_v), considerándose un factor de endurecimiento $\lambda_s = 1$ en la roca.

$$F_h = \frac{\lambda_s c h_i w \cos \cos \varphi \sin \sin (\alpha + \delta)}{\sin \sin \beta \sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)}$$

$$F_v = \frac{\lambda_s c h_i w \cos \cos \varphi \cos \cos (\alpha + \delta)}{\sin \sin \beta \sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)}$$

Determinación del ángulo β

Para determinar el ángulo de corte β donde la fuerza horizontal F_h se hace mínima, el denominador de la ecuación debe tener un valor máximo. Esto ocurrirá cuando la derivada de F_h respecto de β sea igual a cero y la segunda derivada sea negativa.

$$\frac{\partial \sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi) \sin(\beta)}{\partial \beta} = \sin \sin (\alpha + 2\beta + \delta + \varphi) = 0$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha + \delta + \varphi}{2}$$

Aplicando estas condiciones y operando convenientemente se obtiene:

$$F_h = \frac{2 c h_i w \cos \cos \varphi \sin \sin (\alpha + \delta)}{1 + \cos \cos (\alpha + \delta + \varphi)} = \lambda_{HF} c h_i w$$

$$F_v = \frac{2 c h_i w \cos \cos \varphi \cos \cos (\alpha + \delta)}{1 + \cos \cos (\alpha + \delta + \varphi)} = \lambda_{VF} c h_i w$$

Estas ecuaciones son básicamente las mismas obtenidas por Merchant 1944 y 1945.

La fuerza normal N_1 y la tensión normal σN_1 en el plano de corte, con $\lambda_s = 1$, es:

$$N_1 = \frac{-C \cos \cos (\alpha + \beta + \delta)}{\sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)} \cos \cos \varphi$$

$$\sigma_{N1} = \frac{-c \cos \cos (\alpha + \beta + \delta)}{\sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)} \cos \cos \varphi$$

La fuerza normal N_2 y la tensión normal σN_2 en la cuchilla es:

$$N_2 = \frac{C \cos \cos (\alpha)}{\sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)} \cos \delta$$

$$\sigma_{N2} = c \frac{h_i \sin \sin (\alpha)}{h_b \sin \sin (\beta)} \frac{\cos \cos \varphi}{\sin \sin (\alpha + \beta + \delta + \varphi)} \cos \cos \delta$$

Las anteriores ecuaciones muestran que la fuerza normal en el plano de corte tiende a ser negativo, a menos que la suma de los ángulos $\alpha + \beta + \delta$ sea mayor que 90° . Con el uso de la ecuación de β se puede establecer que $\frac{\alpha + \beta - \varphi}{2} > 0$. Debido a los ángulos normales de las cuchillas en los herramientas de corte, esta condición es siempre válida, y la fuerza normal es siempre positiva.

2.1.5. Mecanismo de corte por cuña

Las teorías de corte hasta ahora analizadas son modelos que se desempeñan satisfactoriamente para ángulos de ataque relativamente pequeños, sin embargo, cuando el ángulo de la cuchilla y los demás ángulos involucrados aumentan, puede ocurrir una indeterminación con los modelos anteriormente planteados. Las ecuaciones básicas contienen un denominador que considera la aplicación del operador seno sobre la suma del ángulo de la cuchilla, el ángulo de corte, el ángulo de fricción interno y el ángulo de fricción externo. Si la suma de estos ángulos es igual a 180 grados, el denominador es cero, lo que significa una división indeterminada. Adicionalmente, si la suma de estos ángulos es mayor de 180 grados, el seno da un resultado negativo, lo que significa que las fuerzas de corte se

vuelven negativas, y esto no coincide con la realidad. Si analizamos situaciones límites, como cuando la suma de los ángulos se acerca a 180 grados, el seno se vuelve muy pequeño y como está en el denominador de la ecuación, las fuerzas de corte resultantes del modelo se hacen extremadamente altas. Si estas condiciones se presentan, la naturaleza selecciona otro mecanismo de menor resistencia que tienda a disminuir las fuerzas de corte, en función del principio de minimización de la energía. Por lo tanto, cuando se presenta una condición de alto ángulo debido a la geometría del cortador o a las características mecánicas de los materiales involucrados, es posible que el proceso de corte se desarrolle mediante un mecanismo de corte mediante acuñamiento. En este mecanismo de corte se formará una cuña o pseudo cuchilla (Fig. 2.13), A-C con un ángulo de ataque mucho más pequeño que el ángulo de ataque real de la cuchilla. La probabilidad de que ocurra una cuña en el proceso de corte es grande para el corte de arena y roca, ya que los cuatro ángulos mencionados juegan un papel preponderante en estos materiales.

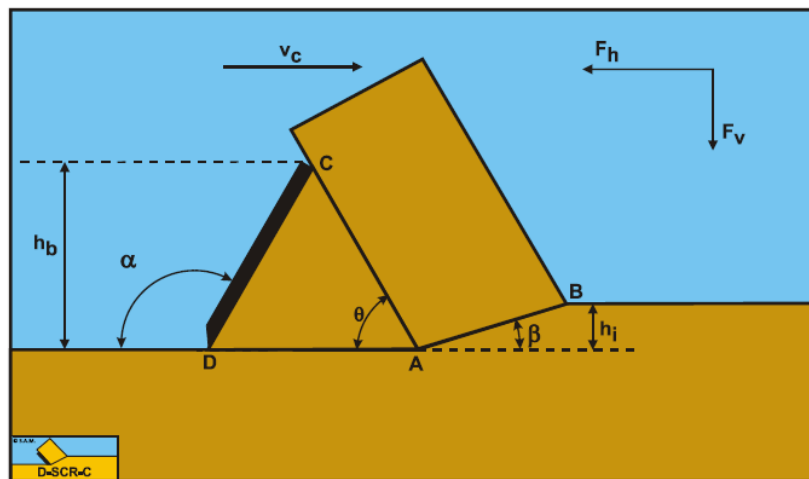


Fig. 2.13. Parámetros principales del modelo de corte mediante encuñamiento. (S. Miedema 2017).

Eventualmente la naturaleza también puede desarrollar el corte mediante otros mecanismos que resulten en fuerzas de corte aún más pequeñas, como el modelo de Hettiaratchi & Reece (1975), el cual es un modelo más complicado. La filosofía generalmente establecida es que, si un mecanismo de corte puede que resulte en fuerzas de corte más pequeñas que el modelo actualmente establecido, por ejemplo, para los ángulos de cuchilla pequeños, este nuevo modelo dará una mejor predicción de los resultados de corte.

El mecanismo de cuña es tal mecanismo, con la ventaja que es relativamente simple de usar y las fuerzas de corte predichas mediante este modelo coinciden con mucha proximidad a las fuerzas de corte experimentalmente calculadas por Hatamura y Chijiwa (1977B).

Entonces, desde un punto de vista pragmático, este mecanismo será discutido y aplicado para una cuchilla con ángulo de ataque grande. La Fig. 2.14 ilustra las fuerzas sobre la capa de material cortado y sobre la cuña y las tablas 2.2 y 2.3 enumeran y definen respectivamente las variables utilizadas.

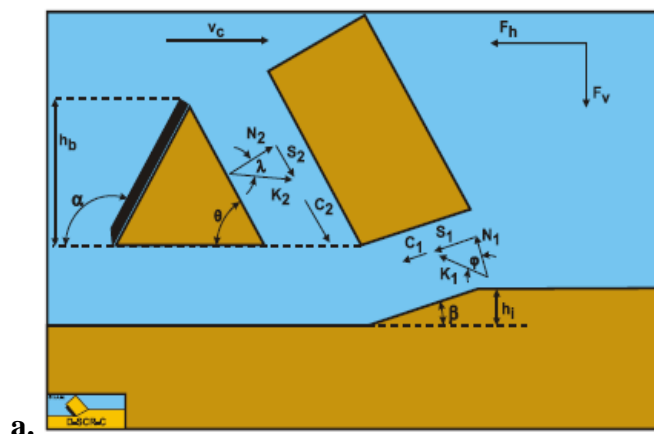
Se plantea el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales en la capa de material cortado:

$$\sum F_h = K_1 \sin \sin (\beta + \varphi) - C_1 \sin \sin \beta + C_2 \cos \cos \theta - K_2 \sin \sin (\theta + \lambda) = 0$$

$$\sum F_v = -K_1 \cos \cos (\beta + \varphi) + C_1 \sin \sin \beta + C_2 \sin \sin \theta$$

Tabla 2.2. Definiciones de la Fig. 2.14.

Definiciones:	
A	Punta de la cuña.
B	Fin del plano de corte.
C	Parte superior de la cuchilla
D	Punta de la cuchilla
A-B	Plano de corte
A-C	Superficie de la cuña
A-D	Base que forma la cuña
D-C	Superficie de la cuchilla
hb	Altura de la cuchilla
hi	Espesor de la capa cortada
vc	La velocidad de corte
α	Angulo de ataque de la cuchilla
β	Angulo de cizalla
Fh	Fuerza horizontal, el sentido de la flecha da la dirección positiva
Fv	Fuerza vertical, el sentido de la flecha da la dirección positiva



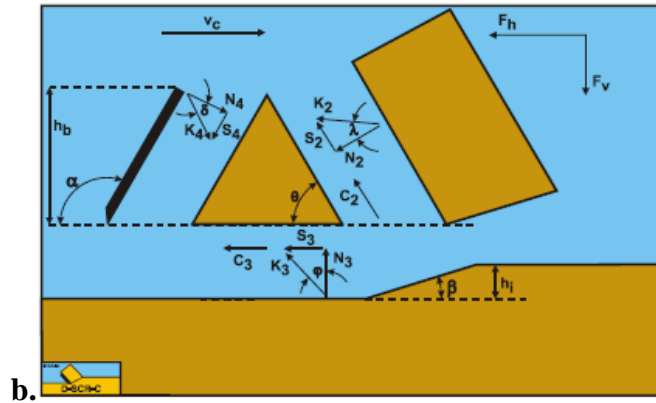


Fig. 2.14. Descomposición de fuerzas de corte por aplicación de la cuña. **a.** Sobre el material cortado **b.** Sobre la cuña de corte. (S. Miedema 2017).

Tabla 2.3. Variables analizadas en la Fig. 2.14.

Definiciones:	
N_1	Fuerza normal que actúa sobre la superficie de corte resultante de las tensiones del grano
S_1	Fuerza cortante como resultado de la fricción interna $N_1 \tan(\phi)$
C_1	Fuerza cortante C como resultado de la resistencia cortante (cohesión) t_c o c . Esta fuerza se puede calcular multiplicando la resistencia cohesiva al cortante t_c con el área del plano cortante
N_2	Fuerza normal a la pseudocuchilla resultante de las tensiones del grano
S_2	Fuerza cortante como resultado de la fricción entre la roca de la cuña y la roca del suelo $N_2 \tan(\delta)$ también llamada fricción externa
C_2	Fuerza cortante como resultado de la cohesión movilizada entre el suelo y la cuña t_c
K_1	Combinación lineal de la fuerza normal N_1 y la fuerza cortante S_1 . $K_1 = \sqrt{N_1^2 + S_1^2}$
Fuerzas que actúan sobre la pseudocuchilla o cuña:	
N_2	Fuerza normal a la cuchilla resultante de las tensiones del grano
S_2	Fuerza cortante como resultado de la fricción roca / roca $N_2 \tan(\phi)$, entre la capa cortada de material y la pseudocuchilla
C_2	Fuerza cortante como resultado de la cohesión entre la capa cortada y la pseudocuchilla t_c
K_2	Combinación lineal de la fuerza normal N_2 y la fuerza cortante S_2 . $K_2 = \sqrt{N_2^2 + S_2^2}$
Las fuerzas actuantes sobre la base de la cuña A-D son:	
N_3	Fuerza normal resultante de las tensiones efectivas del grano entre la base de la cuña y la roca no perturbada
S_3	Fuerza cortante como resultado de la fricción entre la roca de la base de la cuña y la roca no perturbada $N_3 \tan(\phi)$ también llamada fricción externa
C_3	Fuerza cortante como resultado de la cohesión entre la base de la cuña y la roca no perturbada t_c
K_3	Combinación lineal de la fuerza normal N_3 y la fuerza cortante S_3 . $K_3 = \sqrt{N_3^2 + S_3^2}$
Las fuerzas actuantes en la recta C-D durante el corte son:	
N_4	Fuerza normal que actúa sobre la superficie de corte resultante de las tensiones del grano
S_4	Fuerza cortante como resultado de la fricción entre la cuchilla y la roca $N_4 \tan(\phi)$ también llamada fricción externa
K_4	Combinación lineal de la fuerza normal N_4 y la fuerza cortante S_4 . $K_4 = \sqrt{N_4^2 + S_4^2}$

La fuerza K_1 en el plano de corte es:

$$K_1 = \frac{-C_1 \cos \cos (\theta + \beta + \lambda) + C_2 \cos \cos \lambda}{\sin \sin (\theta + \beta + \lambda + \varphi)}$$

La fuerza K_2 en la pseudo cuchilla es:

$$K_2 = \frac{C_1 \cos \cos (\varphi) - C_2 \cos \cos (\theta + \beta + \varphi)}{\sin \sin (\theta + \beta + \lambda + \varphi)}$$

A partir de la ecuación anterior, se pueden derivar las fuerzas de la pseudo cuchilla calculando las componentes de fuerzas en la dirección de la velocidad de corte F_h y las fuerzas perpendiculares a esta dirección (F_v) utilizando.

$$F_h = K_2 \sin \sin (\theta + \lambda) + C_2 \cos \cos \theta$$

$$F_v = K_2 \sin \sin (\theta + \lambda) - C_2 \cos \cos \theta$$

La fuerza normal en el plano de corte es:

$$N_1 = \frac{-C_1 \cos \cos (\theta + \beta + \lambda) + C_2 \cos \cos \lambda}{\sin \sin (\theta + \beta + \lambda + \varphi)} \cos \cos \varphi$$

La fuerza normal en la pseudo cuchilla es:

$$N_2 = \frac{C_1 \cos \cos (\varphi) + C_2 \cos \cos (\alpha + \beta + \varphi)}{\sin \sin (\theta + \beta + \lambda + \varphi)} \cos \cos \lambda$$

Conociendo entonces las fuerzas en la pseudo cuña A-C el equilibrio de fuerzas en la cuña A-C-D puede ser derivado. El equilibrio de fuerzas horizontales y verticales en la cuña son:

$$\sum F_h = -K_4 \sin \sin (\alpha + \delta) - K_3 \sin \sin \varphi + C_3 + C_2 \cos \cos \theta + K_2 \sin \sin (\theta + \lambda) = 0$$

$$\sum F_v = -K_4 \cos \cos (\alpha + \delta) - K_3 \cos \cos \varphi - C_2 \sin \sin \theta + K_2 \sin \sin (\theta + \lambda) = 0$$

Las incógnitas en estas ecuaciones son K_3 y K_4 , debido a que K_2 se conoce. También se desconocen las incógnitas del ángulo de fricción externo δ y el ángulo de la cuña θ . Estas dos últimas adicionales requieren dos condiciones más para poder resolver el problema. Para esto se puede plantear el equilibrio de momentos en el extremo de la cuña y la segunda condición es el principio de mínima energía para el corte. Luego dependiendo si el material ejerce fuerzas hacia arriba o hacia abajo respecto de la cuchilla, el factor de movilización puede tomar valores entre -1 y +1.

La fuerza K_3 en la base de la cuña es:

$$K_3 = \frac{K_1 \cos \cos (\alpha + \delta - \theta - \lambda) + C_3 \cos \cos (\alpha + \delta) - C_2 \cos \cos (\alpha + \delta - \theta)}{\sin \sin (\theta + \beta + \lambda + \varphi)}$$

La fuerza K_4 en la cuchilla es:

$$K_4 = \frac{K_2 \sin \sin (\theta + \lambda + \varphi) + C_3 \cos \cos (\varphi) + C_2 \cos \cos (\theta + \varphi)}{\sin \sin (\theta + \delta + \varphi)}$$

En función de la Fig. 2.15 a se plantean las fuerzas horizontales y verticales sobre la cuchilla:

$$F_h = K_4 \sin \sin (\alpha + \delta)$$

$$F_v = K_4 \cos \cos (\alpha + \delta)$$

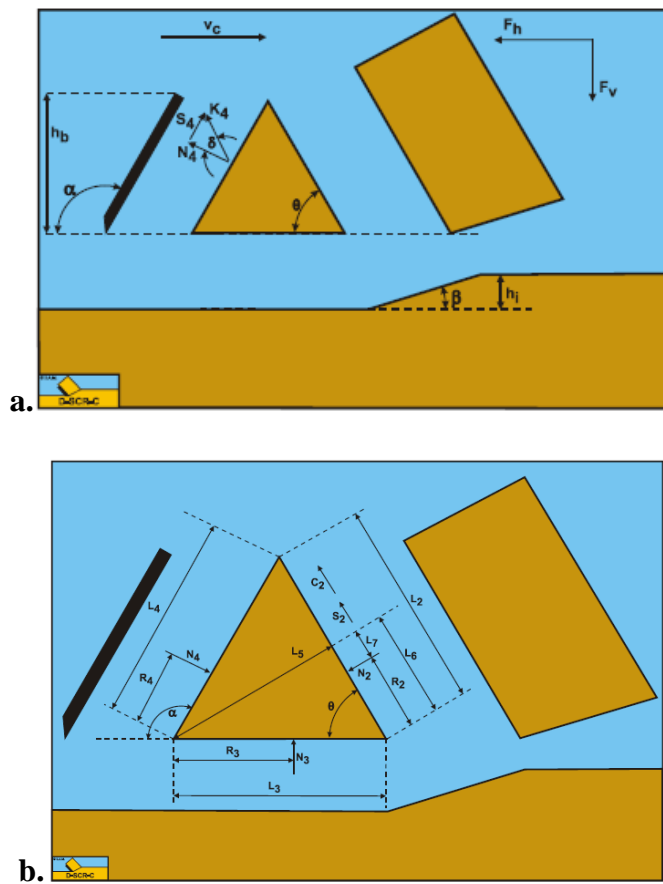


Fig. 2.15. a. Fuerzas en la cuchilla cuando la cuña está presente. **b.** Equilibrio de momentos sobre la cuña. (S. Miedema 2017).

Finalmente, con el objetivo de poder establecer las últimas incógnitas del modelo, se debe plantear el equilibrio de momentos según la Fig. 2.15b. Debido a que la cuña no está sometida a aceleración rotacional, el equilibrio de momentos se puede tomar en cada punto o ángulo de la cuña. En este caso se selecciona el extremo o punta de la cuchilla de corte. La

ventaja de seleccionar este punto es que existen muchas fuerzas que no deben ser consideradas ya que no contribuyen en la aplicación de los momentos. Con el fin de determinar las ecuaciones de equilibrio de momentos, las relaciones de todas las fuerzas que contribuyen a la aplicación de los momentos deben ser conocidas. Debido a que las palancas dependen del largo de todos los lados en el proceso de corte, se debe determinar las longitudes de los planos involucrados.

Largo del plano A-B

$$L_1 = \frac{h_i}{\sin \sin \beta}$$

Largo del plano A-C

$$L_2 = \frac{h_h}{\sin \sin \theta}$$

El largo de la base de la cuña A-D es:

$$L_3 = h_h \left(\frac{1}{\tan \tan \theta} - \frac{1}{\tan \tan \alpha} \right)$$

El largo de la cuchilla C-D es:

$$L_4 = \frac{h_b}{\sin \sin \alpha}$$

El largo de la línea desde la punta de la cuchilla hasta el lado opuesto de la cuña y perpendicular a ese lado es:

$$L_5 = L_3 \sin \sin \theta$$

El largo de la línea desde el punto A hasta la intersección del punto de la línea previa con el lado A-C es:

$$L_6 = L_3 \cos \cos \theta$$

La distancia desde el punto actuante de la fuerza de presión de poro en el lado A-C con la intersección de la línea previa con el lado A-C es:

$$L_7 = L_6 - R_2$$

El valor de los puntos actuantes R_2 , R_3 , y R_4 se calculan en base a estimaciones de la distribución de tensiones.

Finalmente se puede plantear el equilibrio de momentos.

$$\sum M = N_4 R_4 - N_3 R_3 + N_2 L_7 - (S_2 + C_2) L_5 = 0$$

Consideraciones adicionales en herramientas con cortadores fijos

El proceso de corte y remoción ejercido por un cortador de dientes fijos puede estar compuesto por un mecanismo de acuñamiento y posterior corte, arado, acción erosiva de fluido, percusión, torsión y combinación de todos los anteriores. Algunos tipos de mecanismos de corte serán preponderantes en cierto diseño de broca según la geometría de esta. Los cortadores fijos o de arrastre están primariamente diseñados para perforar mediante un mecanismo de acuñamiento sobre la roca. Si la herramienta puede ser mantenida taladrando mediante este mecanismo de corte en todo momento, se desempeñará de manera óptima y se evitará la traba y embotamiento de esta. El corte que realiza el diente se logra mediante la composición sobre el diente de la fuerza vertical de avance y horizontal de rotación. La Fuerza de Avance (FA) se logra en el caso de las perforaciones de petróleo y gas debido al peso aplicado sobre toda la sarta de perforación mediante los collares de pesos, este parámetro se suele definir como WOB (Weight Of the Bit). La fuerza horizontal es aplicada por el diente como resultado del torque necesario para hacer girar a la broca. El resultado de estas dos fuerzas define el plano de empuje del diente o plano de acuñamiento (Fig. 2.21). La profundidad de corte está controlada por el plano de empuje y este a su vez es seleccionado según la resistencia de la roca y de los recortes de la perforación. Esta profundidad puede ser expresada en términos del ángulo de fondo de la perforación (α) para el caso de la Fig. 2.16. Este ángulo es función de una deseada penetración por revolución (l_p) y del radio (r) respecto del centro del de la perforación.

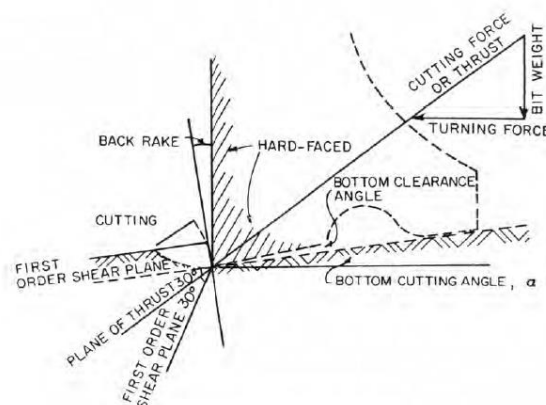


Fig. 2.16 Configuración de fuerzas de corte y planos de aplicación [A. Bourgoyne Jr. et al 1991]

Esta relación se puede definir como:

$$\tan \alpha = \frac{lp}{2\pi r}$$

El ángulo de descarga previene a la cuña de rascar el fondo del agujero mientras se retira el material cortado, esto reduce una excesiva abrasión de la broca, su rápido desgaste y disminuye la vibración. El ángulo de ataque de la herramienta puede ser negativo, neutro o positivo. Se prefieren en general ángulos de ataque negativo que privilegian la resistencia y robustez del diente. En el caso de Las brocas de arrastre de diamantes, estas están diseñadas para taladrar con una pequeña penetración en la formación. La acción primaria de estas brocas es la acción de molienda, en donde el elemento cementicio que mantiene unida la formación es roto por los diamantes en un proceso de trituración. Finalmente, sumando los modelos de cortes, lo que se conoce del comportamiento del material, la geometría del cortador, los ensayos de compresión y corte del material, las constantes elásticas de la roca y demás factores, la selección de la mejor herramienta para un trabajo determinado, así como la selección del mejor fluido de perforación y otras variables de la perforación se determinan mediante prueba y error. Un criterio aceptado para comparar el desempeño de diferentes brocas es mediante el cálculo del costo de perforación por intervalo (profundidad) de taladrado. La información entre perforaciones correlacionada sucesivamente puede dar una idea de la mejor metodología y herramienta a utilizar para eficientizar la perforación.

2.2 Tipos de cortadores para perforado de rocas

Sobre estos cortadores existe una amplia bibliografía e información disponible que detalla las geometrías utilizadas, así como la forma de trabajo típica de cada cortador. Los cortadores utilizados en las perforaciones de extracción de gas y petróleo tienen muchos diámetros disponibles para las diferentes cañerías principales y de servicios que deben ser taladradas. Las brocas rotativas de perforación se clasifican de acuerdo con su diseño, su forma de corte, material, recubrimientos etc. Una de las primeras diferencias es por su diseño, entre cortadores fijos y cortadores con partes móviles. Las brocas de arrastre tienen cortadores fijos que son integrales al cuerpo de la broca y rotan como una unidad con la sarta de perforación. Las brocas con cortadores giratorios (normalmente llamados triconos) tienen dos o más conos que contienen a su vez los elementos cortadores (Fig. 2.17). Estos giran sobre los ejes de los conos a medida que la broca gira con la sarta de perforación en el fondo del pozo.



Fig. 2.17 Dos modelos de cortadores con partes móviles (triconos) [J. Ramos, 2011].

Los mecanismos de corte para este tipo de cortador difieren respecto de los cortadores fijos. Los cortadores de tipo tricono generan una alta tensión puntual en la zona donde se produce la indentación y luego esa compresión genera una fractura o zona microfracturada debido a la falla del material de unión de los granos constituyentes de la roca.

Las brocas de arrastre mostradas en la Fig. 2.18 se caracterizan por tener cuchillas o cortadores adheridos a su cuerpo, estos cortadores se diseñan con geometría específica según la característica de la formación, el diseño y posición de los caminos hidráulicos y la metalurgia del elemento cortante entre otros parámetros. Físicamente las brocas de arrastre realizan un efecto de arado de la superficie. Este tipo de broca incluye cortadores de acero, diamante y diamante cúbico policristalino (DCP). Como estas brocas no cuentan con partes móviles en su interior, son robustas y de superficies limpias, lo que brinda ventajas en perforaciones de medidas pequeñas en donde el espacio para cortadores robustos debe ser suplido, en el caso de triconos, por un espacio para el alojamiento de rodamientos y demás mecanismos necesarios para el movimiento de los conos. Además, como las brocas de arrastre pueden ser realizadas en una sola pieza de acero, las posibilidades de fractura o rotura son menores.

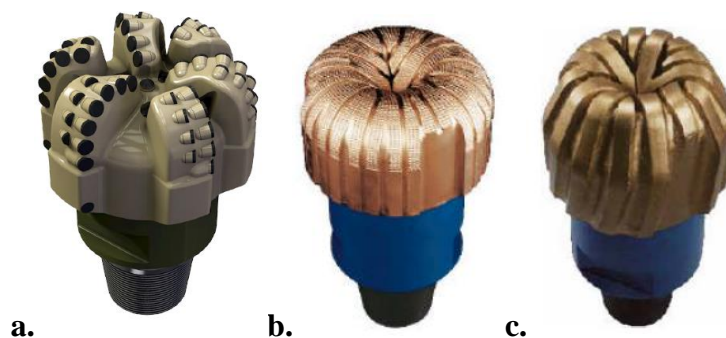


Fig. 2.18 a. Brocas de inserto de diamante DCP. **b.** Broca con diamantes naturales. **c.** Broca con diamantes impregnados. [Smith Bits 2016, Schlumberger 2001]

También disminuyen los riesgos de dejar piezas en el camino de la perforación debido a una rotura, pueden trabajar hasta los 700 °C de temperatura donde sellos poliméricos y grasas utilizadas por los triconos pueden traer complicaciones en el taladrado de pozos calientes.

Los cortadores de arrastre realizados en acero, con filos de metales duros, se desempeñan bien en condiciones de suelos suaves, uniformes y en formaciones no consolidadas. A medida que las formaciones rocosas se vuelven más duras y abrasivas, la tasa de desgaste aumenta rápidamente y la tasa de penetración disminuye. Las brocas de diamante se desempeñan mejor en formaciones no frágiles, que tienen un modo de falla plástica por condiciones de tensión presentes en el fondo de la perforación. Estas brocas en general están compuestas por varios juegos de diamantes sobre una matriz de carburo de tungsteno. En condiciones apropiadas de perforación solo los diamantes hacen contacto con el fondo del agujero taladrado, dejando un espacio entre la matriz portante de los mismos y el fondo del agujero. Sobre la matriz están formados los canales que dirigen el flujo de fluido hidráulico a través de la superficie de la broca. Estos canales deben ser dimensionados para que el fluido se vea obligado a pasar entre la matriz y el fondo del agujero realizando un efecto de limpieza de las superficies, y refrigerando y limpiando los diamantes específicamente. Una característica importante de diseño de la broca es el perfil de la corona donde la longitud de los cortadores largos asiste a una buena rectitud de la perforación y permiten el uso de mayor peso de la broca (WOB). En contrapartida las brocas con filos laterales más cortos son más fáciles de limpiar debido a que la energía hidráulica está concentrada en un área menor. El tamaño y número de diamantes usados depende de la dureza de la formación a ser taladrada. Para formaciones duras se tienen muchos diamantes pequeños 0.07 a 0.125 carat mientras que para las formaciones suaves tienen menos diamantes y más grandes. 0.75 – 2 carat. En la Fig. 2.19 se muestra una comparativa de los diferentes tamaños de diamantes que se pueden considerar. Si los diamantes son grandes, pueden ser embebidos en la matriz del cortador. La cantidad de cortadores de gran tamaño es limitada, en principio, por el espacio disponible en la broca. Eventualmente si la formación es extremadamente dura, la carga unitaria sobre estos cortadores puede ser excesiva lo que resulta en un pulido localizado y una importante generación de calor. El diseño de los cursos de agua y los espacios para recolectar los residuos del corte controlan la remoción de material y parte de la refrigeración de los diamantes.

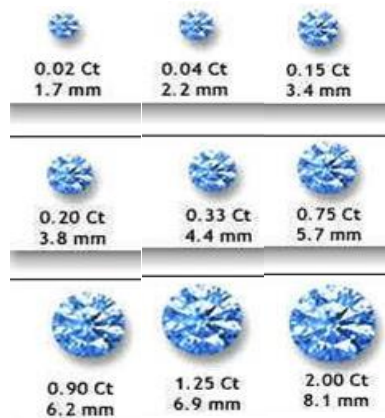
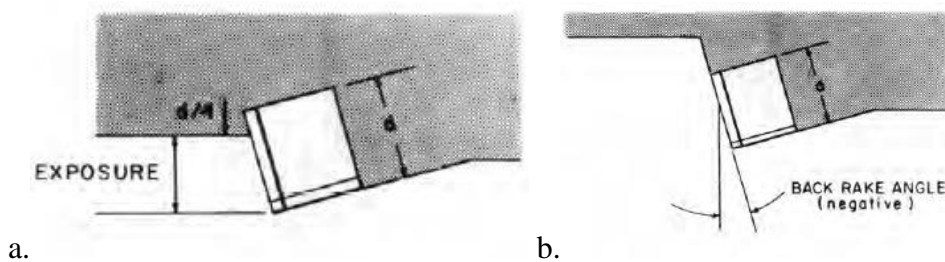


Fig. 2.19. Comparativa del tamaño de los diamantes cortadores [Schlumberger 2001]

Las brocas de diamante están diseñadas para operar a una dada tasa de flujo y caída de presión a través de la cara de la herramienta donde los fabricantes de estas establecen rangos de lubricación para su utilización. Posteriormente a la broca de metal, se introdujo un cortador con un diamante sinterizado policristalino compacto (Polycrystalline Diamond Compact, PDC). Las brocas con PDC consisten en una capa de diamante policristalino sintético de aproximadamente 0.4 mm de espesor, el cual está unido por un proceso de alta presión y temperatura sobre un sustrato de carburo de tungsteno. Este diamante tiene una resistencia alta a la fatiga térmica y al desgaste erosivo. Los planos de clivaje de estos diamantes están aleatoriamente orientados, lo que disminuye la posibilidad de que una rotura producida por shock se propague fácilmente por todo el cortador. Estas brocas se desenvuelven bien en formaciones suaves, firmes y medianamente duras. Al igual que en los cortadores de acero, en estas brocas la hidráulica juega un papel muy importante para reducir los atascamientos. La acción hidráulica es conseguida primariamente utilizando canales de agua tallados a través de la superficie de la herramienta. Otros aspectos importantes del diseño de la broca incluyen el tamaño, la forma y el número de cortadores usados y el ángulo de ataque entre el cortador, así como la superficie expuesta de la formación. La orientación del cortador está definida en términos de ángulo de respaldo y el ángulo lateral y exposición del cortador (Fig. 2.20).



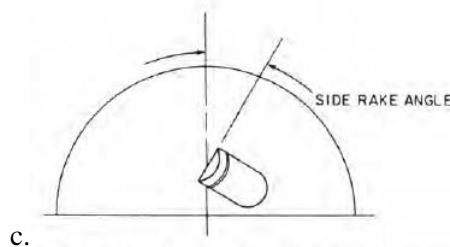


Fig. 2.20. Parámetros de posicionamiento del diamante cortador. **a.** Exposición del diente. **b.** Angulo de ataque (generalmente negativo). **c.** Ángulo lateral de ataque. [A. Bourgoyne Jr. et al 1991]

Un ángulo de ataque negativo suele ser un estándar en muchos cuerpos de acero. Estos ángulos varían según el tipo y la dureza de la formación donde se pueden utilizar ángulos de ataque menos negativos para formaciones suaves y un mayor ángulo de ataque negativo para formaciones más duras. A su vez el ángulo lateral asiste en el empuje de los restos del corte para que puedan ser evacuados por el fluido hidráulico. El grado de exposición del cortador provee espacio para que una película sea generada del fondo del hueco y el material cortado pueda ser removido sin impactar a la matriz o el cuerpo del frente del cortador, de esta manera se previene una excesiva tasa de desgaste. Esta orientación también depende de la velocidad esperada y de la distancia del cortador al centro de la broca. Existen tres tipos básicos de cortadores fijos en la actualidad, *Brocas del tipo PDC*, *Brocas de diamante natural* y *TSP* y *brocas de diamantes impregnados*.

2.2.1. Brocas con diamantes PDC

Estas brocas están construidas con un cuerpo de acero donde el diamante policristalino es colocado en placas fijadas en un substrato de tungsteno de manera de formar un cortador completo. En la Fig. 2.21 se observa una placa de diamante policristalino montado sobre un soporte carburo de tungsteno y los diferentes diámetros que pueden adoptar estos cortadores. Los cortadores de PDC están insertados en el cuerpo de la broca en un ángulo diferente de la normal respecto del fondo del pozo. Este ángulo de ataque de la herramienta, donde de alguna manera el ángulo de ataque habla de la agresividad del corte. Una herramienta completamente ensamblada para formaciones suaves se observa en la Fig. 2.22.

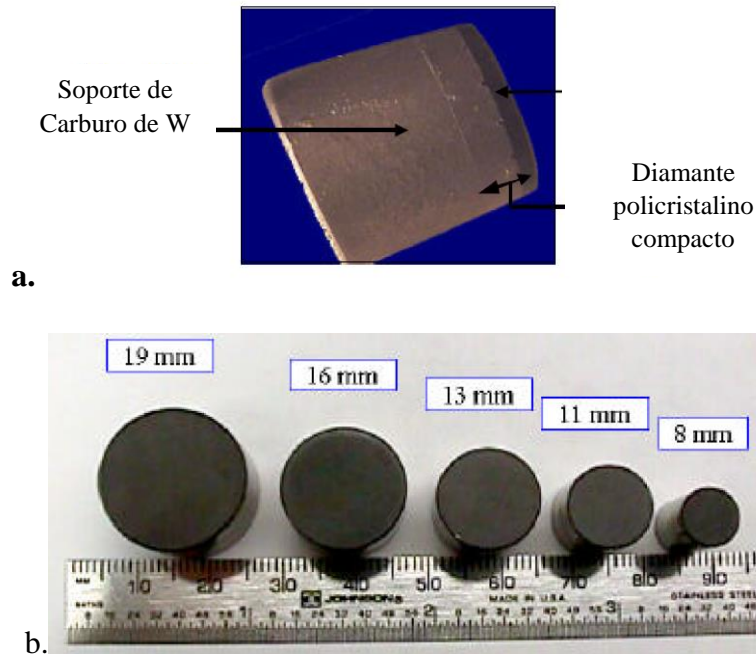


Fig. 2.21. a. Cortador individual montado sobre base de carburo de W. **b.** Diferentes diámetros de pastillas cortadoras. [Schlumberger 2001]

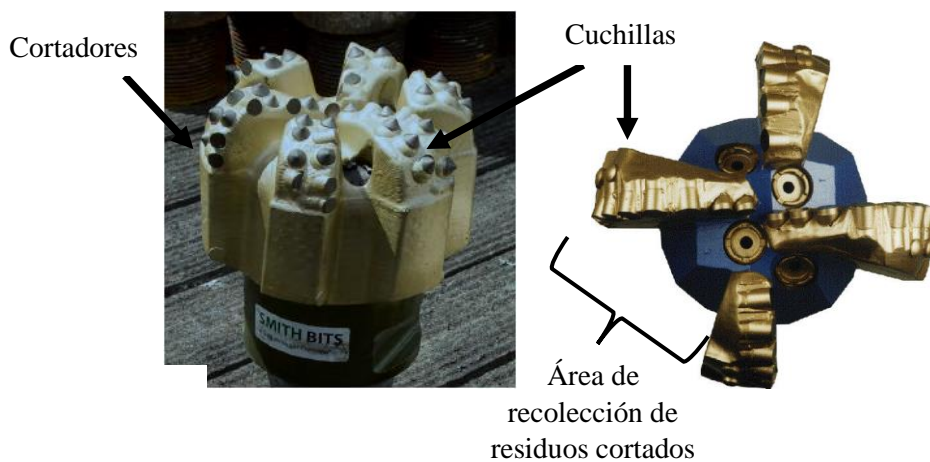


Fig. 2.22. Fotografías donde se observan las particularidades de este diseño de cortador. [Smith Bits 2016, Schlumberger 2001]

2.2.2. Brocas de diamante natural y brocas térmicamente estables

Estas brocas usan diamantes expuestos por sobre la superficie del cuerpo de la broca como estructura primaria de corte. La cantidad de diamantes varía pudiendo ser de 1 hasta 8 diamantes por carat. En los cortadores de diamante natural los diamantes son montados sobre las cuchillas con reducido espaciado entre ellas como se aprecia en las Fig. 2.23 a y b.

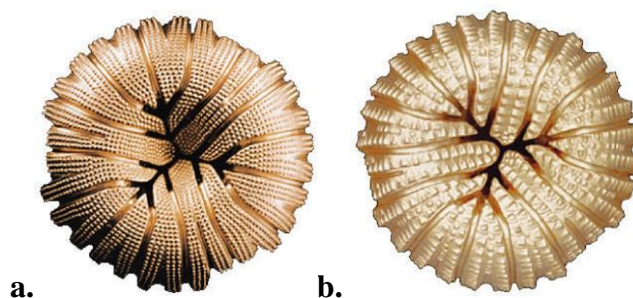


Fig. 2.23. a. Brocas de diamante natural, **b.** broca de diamante térmicamente estable.

[Schlumberger 2001]

Las brocas de diamante térmicamente estable están compuestas por diamantes policristalinos montados sobre el cuerpo de la broca. Estos conforman la estructura de corte primaria y los diamantes pueden tener diámetros de entre 1 a 2 mm los cuales están acomodados para cortar la formación en vez de pulverizarla como es el mecanismo de corte de las brocas de diamante natural.

2.2.3. Brocas de diamante impregnado

Las brocas de diamante impregnado están compuestas por diamantes de diámetro muy pequeño, básicamente particulado, el cual es adherido a la matriz de las cuchillas y se integran como granos sobre la misma. A medida que estos granos se desgastan, dejan una superficie nueva para cortar perteneciente a las caras de otros diamantes. En la Fig. 2.24 se observa una broca de diamante impregnado donde el diámetro de los diamantes es tan pequeño que no pueden ser identificados.



Fig. 2.24. Brocas de diamante impregnado donde se aprecian las cuchillas recubiertas de estos, no pudiéndose distinguir los diamantes. [Schlumberger 2001]

Las brocas de diamante impregnado trabajan sobre las formaciones duras predominantemente mediante pulverización o particulado fino de la roca. Sobre formaciones suaves taladran mediante mecanismo de corte o cizalladura. Las brocas de diamante natural o TSP taladran por un mecanismo de arado, arrastre y pulverización. Las brocas de PDC

perforan predominantemente cortando la formación. Las brocas de cortadores fijos (especialmente las de PDC) son muy dependientes de la litología, y perforan más eficientemente si los parámetros de perforación se ajustan a medida que varía la roca. Esto implica prestar una constante atención a medida que se produce el proceso de perforación.

2.2.4. Partes generales de un cortador

Los elementos principales que componen la estructura de un cortador son el cortador de diamante propiamente dicho, la estructura de soporte de estos, el cuerpo de la broca, las cuchillas, los perfiles, las tuercas, calibradores e inyectores, donde estos tres últimos suelen estar recubiertos en diamante. Los diamantes cortadores pueden variar en diámetro de 8 a 19 mm y diferentes medidas pueden ser combinadas en un mismo cortador. Los perfiles de estas brocas se clasifican en función de su longitud (corto - medio - largo), donde al aumentar la longitud del perfil aumenta la resistencia de fuerzas axiales y laterales, pero disminuye la flexibilidad para girar la broca o realizar radios reducidos de giro en la perforación direccional. Una comparación de tres cortadores de diferente longitud de perfil (corto-medio-largo) se muestra en la Fig. 2.24.

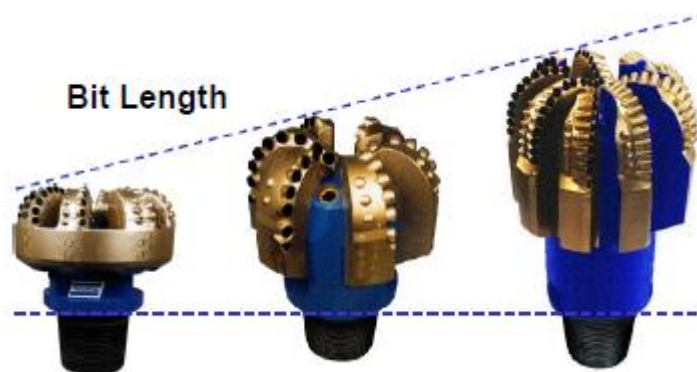


Fig. 2.24. Comparación de cortadores de diferente longitud de perfil. [Schlumberger 2001]

Los diamantes cortadores a su vez cuentan con diamantes secundarios cementados de diferentes formas en el cuerpo de la broca que protegen a los cortadores en formación abrasiva y dura o mitigan el impacto en caso de perforación descentrada. El diseño de una broca es un compromiso entre varios factores que muchas veces interactúan de forma contraria unos de otros y donde características de diseño que probaron ser extremadamente beneficiosas en unas circunstancias, pueden alejarse del óptimo en otras condiciones. En la Fig. 2.25 se señalan las partes principales de un cortador.

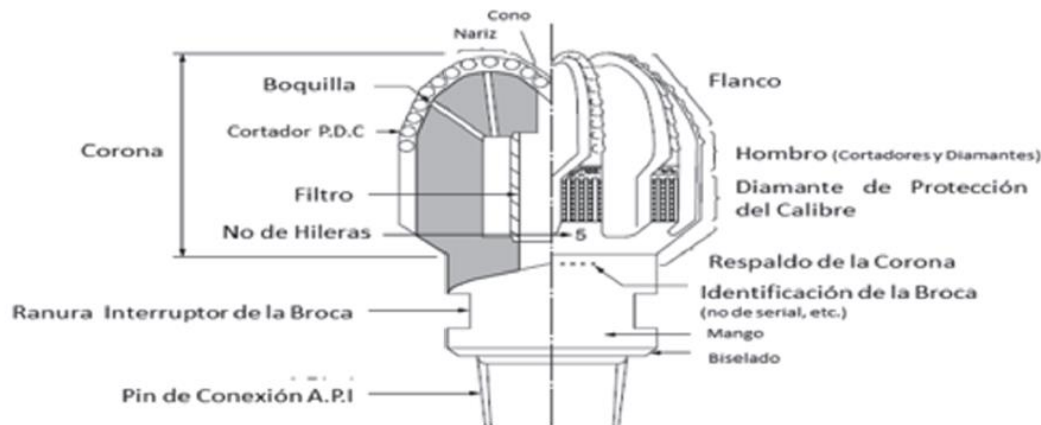


Fig. 2.25. Partes básicas de un cortador [J. Ramos, 2011].

Cono: provee cierto grado de estabilidad a la broca cuando se está perforando. Debido a las resultantes de las fuerzas de corte que tienden a hacer que la broca trate rotar a lo largo de su eje longitudinal. El cono central resultante que se forma a su vez en la roca taladrada refuerza este efecto de estabilización y ayuda a la broca a prevenir un cambio de locación respecto de su eje longitudinal.

Nariz: es la región del perfil o cara de la broca que está más lejos del extremo roscado de la conexión. Es la primera parte de la broca que se pone en contacto con un cambio de formación cuando se perfora verticalmente. En esta región es deseable tener un gran número de juegos de diamantes cortadores de manera de prevenir la sobrecarga durante periodos de transición hacia formaciones más duras.

Flanco: es la sección de la broca entre la nariz y los calibradores. Puede eventualmente proveer un grado de estabilidad y su largo es usualmente gobernado por la densidad de cortadores requeridos para la operación. Una broca diseñada para aplicaciones de alta exigencia, que necesite un gran número de cortadores, tenderá a tener un flanco más extendido que una conformada para taladrar formaciones blandas. Una forma alternativa de aumentar la densidad de cortadores es adicionando mayor cantidad de cuchillas al cuerpo de la broca sobre los cuales colocar los diamantes cortadores.

Número y tamaño de cortadores: en las brocas de PDC es primeramente definido según el desempeño de la broca. Una gran cantidad de cortadores de diámetros 8-13 mm permite a la broca taladrar formaciones duras y abrasivas y generalmente resulta en una vida más larga para la herramienta a expensas de reducir la tasa de penetración y aumentar su costo. Por otro lado, los cortadores de 19 mm de diámetro están asociados a cortadores con diseños de

cuchillas para formaciones de media dureza a suaves. Con un aumento del tamaño de los cortadores surgen problemas asociados al espacio disponible para colocar cortadores redundantes. Como el espacio sobre una broca es limitado, existe una cantidad mínima de cortadores de gran tamaño que se pueden colocar para realizar un corte diametral completo en una revolución. Adicionalmente cuando un cortador de gran tamaño se desgasta produce un flanco plano de gran dimensión que genera una considerable cantidad de calor que puede causar un daño catastrófico en la capa de diamante.

Características de los diamantes

Para comprender cómo se desarrollan estos cortadores y los cuidados que se deben tener, es necesario conocer algunas características generales de los diamantes. El diamante es unas 10 veces más duro que el acero y comparado con el carburo de W es unas 2 veces más duro y 10 veces más resistente al desgaste. Sometido a compresión, el diamante es unas 20 veces más resistente que el granito, la cual es una de las rocas más duras para taladrar. El diamante es buen conductor del calor y tiene uno de los coeficientes de fricción más bajos respecto a cualquier material analizado. Esto es importante ya que la fricción en el corte causa calor que puede ser efectivamente transmitido a toda la herramienta debilitando la capa de protección exterior y reduciendo por lo tanto la vida de la herramienta. A una temperatura de 1300 °C a presión atmosférica, el diamante se transforma en grafito. Si existe presencia de oxígeno, arde a 800 °C. La superficie del diamante es no humedecible, lo que significa que debe ser combinado con otro elemento para poder ser pegado. Esto implica que el diamante debe ser unido a un sustrato, por ej. Cobalto y este a su vez puede ser unido o ensamblado al cuerpo del cortador realizado con carburo de W. El cobalto y el diamante se pueden “pegar” bajo condiciones de alta temperatura y presión donde el Co migra a través de los granos de diamantes debido a la diferencia de gradiente de concentración entre estos materiales. En esta misma operación, se fija a la base de carburo de W que soportará la pieza diamantada en el cuerpo del cortador. El carburo de W tiene un coeficiente de expansión diferente del diamante lo que hace que durante el proceso de enfriamiento aparezcan grandes tensiones en toda la pieza ya que el W se expande y el diamante se contrae. El espesor de fabricación de los cortadores está limitado por esta diferencia en el coeficiente de expansión, la difusión del Co y el espesor del diamante, ya que se ser excesivo, no podrá penetrar suficiente cantidad de Co como para mantener el diamante en su lugar. Una de las maneras de caracterización de los cortadores es la propiedad de impacto respecto de la resistencia a la abrasión. Donde al igual que en los metales, para la mayoría de los casos a medida que se

aumenta la resistencia a la abrasión y la dureza aumenta, la deformación plástica disminuye haciendo que la resistencia al impacto baje. En la selección de las propiedades de la broca, se busca diseñar herramientas con dos o tres medidas diferentes de diamantes de manera de brindar resistencia al impacto con los diamantes de mayor diámetro y resistencia a la erosión por medio de los diamantes de menor dimensión. De esta manera la curva de desempeño puede ser movida hacia el exterior Fig. 2.26 a y b.

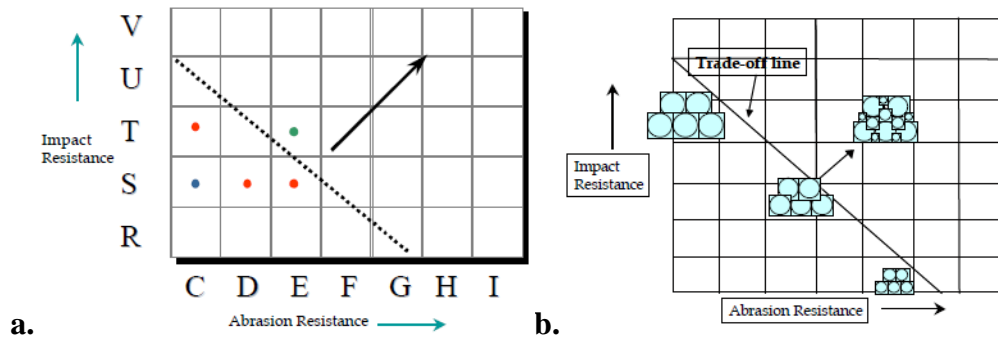


Fig. 2.26 a. Comportamiento general de relación entre resistencia al impacto y a la abrasión. **b.**

Tamaño del diamante respecto y resistencia al impacto y a la abrasión. [Schlumberger 2001]

En condiciones óptimas la broca debe perforar correctamente en un amplio rango de formaciones ya sean duras o abrasivas, debe proveer una tasa de perforación consistente, tener una vida o duración elevada y que pueda ser ensamblada a un bajo costo. Finalmente, el diseño final es una solución de compromiso entre todas las variables evaluadas.

2.3. Parámetros de cálculo para el proceso de taladrado

En función de la teoría expuesta para el corte de roca, se puede observar que existen gran cantidad de puntos de encuentro con el corte de metales, siendo una de las teorías básicas de corte la de Merchant, de flujo dúctil, pero también existen otras analogías que pueden ser estudiadas. Una de las características de las aleaciones metálicas es que según la composición química y los tratamientos termomecánicos a los que se la somete, se pueden obtener materiales con propiedades mecánicas muy diferentes y el estudio del proceso de corte en metales permitió realizar una clasificación muy detallada de estos procesos. Durante el proceso de optimización del corte en la industria metalmeccánica se desarrollaron métodos de selección de herramental de corte en función de una clasificación de materiales metálicos con diferentes características. Lo primero a considerar es el tipo de material metálico a trabajar, el segundo la geometría de la herramienta y posteriormente el grado o tipo de inserto de corte. Estos materiales están clasificados en 6 grupos generales en concordancia con las

normas ISO 513/2012 donde cada grupo tiene características únicas respecto de su maquinabilidad, formación de viruta y preparación para el proceso de mecanizado como las mostradas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Clasificación de los materiales según su maquinabilidad por norma ISO 513/2012

Clasificación de materiales según maquinabilidad ISO	
ISO P	Corresponde a aceros aleados y sin aleación, fundiciones, aceros y fundiciones ferríticas y martensíticas inoxidables. Su maquinabilidad es buena pero dependiente de los tratamientos térmicos, composición química y dureza.
ISO M	Aceros y fundición austenítica.
ISO K	Corresponde a hierro fundido
ISO N	No Ferrosos Aluminio
ISO S	Aleaciones resistentes al calor.
ISO H	Aceros endurecidos, corresponde a aceros con durezas de 45-65 HRc y hierro fundido entre 400 y 600 HB.

A su vez, cada uno de los grupos mencionados tiene asociados una forma característica de generación de viruta durante el proceso de corte Fig. 2.27. Por ejemplo, en los materiales ISO P generalmente se observan virutas largas y continuas más o menos regulares, mientras que los materiales del grupo ISO M forman virutas de tipo lamelares de forma irregular y en el caso de los materiales ISO K, estas pueden variar desde casi polvo hasta largas virutas según la composición química. Este último grupo de materiales pertenece a los hierros fundidos (fundiciones) los cuales son materiales relativamente fáciles de maquinar en cuanto a la energía utilizada, pero son de alta dureza y fragilidad y provocan mucho daño por abrasión sobre los filos de corte de las herramientas ya que contienen variadas cantidades de carburo de silicio. Algunas de las características de los materiales ISO K son de interés para nuestro caso de estudio ya que se observa una semejanza (a primer orden) entre el comportamiento de estos y algunos materiales geológicos utilizados en esta tesis durante el proceso de corte. Las rocas que se taladraron durante la perforación tienen elementos constitutivos de diferentes tamaños característicos (arena y limo), son relativamente frágiles ya que rompen con poca o nula deformación plástica y el material removido durante el corte se extrae totalmente particulado. Este comportamiento es semejante al de algunas fundiciones de alta dureza y fragilidad como la fundición nodular. Además, en ambos casos, los procesos involucran un alto mecanismo de abrasión sobre el filo de la herramienta.

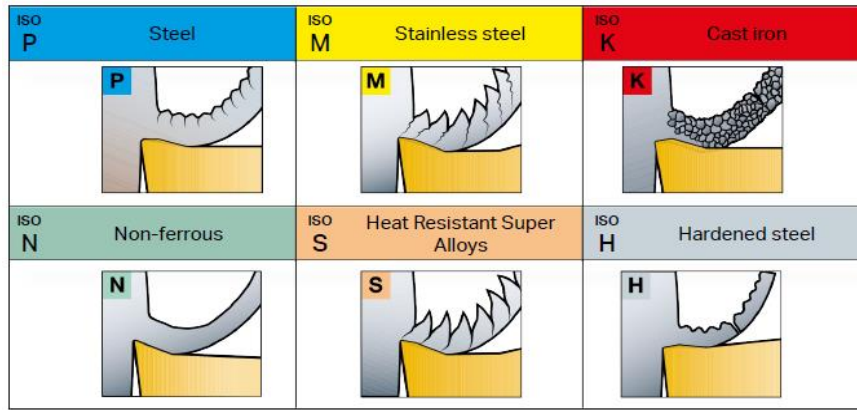


Fig. 2.27. Tipos de virutas que se extraen de los diferentes tipos de aleaciones según norma ISO (AB Sandvik Coromant 2017).

Otra diferencia entre estos seis grupos de materiales surge de analizar la fuerza necesaria para cortar un volumen de material en ciertas condiciones específicas (Fig. 2.28).

Este valor se llama fuerza específica de corte Kc_1 [N/mm^2] y se define respecto de un espesor de viruta de 1 mm y puede entenderse como la fuerza necesaria para remover (cortar) un área determinada de materia con un espesor constante de 1 mm. Cada elemento de la clasificación posee una energía específica de corte como muestra la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Fuerza específica de corte para metales según clasificación ISO.

Grupo de Maquinabilidad ISO	Kc_1 [N/mm^2]
ISO P	1500-3100 N/mm^2
ISO M	1800-2850 N/mm^2
ISO K	790-1350 N/mm^2
ISO N	350 – 1350 N/mm^2
ISO S	2400 – 3100 N/mm^2
ISO H	25550-4870 N/mm^2

Este factor no debe ser interpretado como el factor de tenacidad a la fractura de un material K_{Ic} [Pa/\sqrt{m}] el cual especifica la tenacidad a la fractura (resistencia a la propagación de una fisura) bajo la hipótesis de un comportamiento lineal elástico en materiales frágiles. Si bien no es difícil imaginar la existencia de alguna relación entre estas dos propiedades, no es objeto de esta tesis.

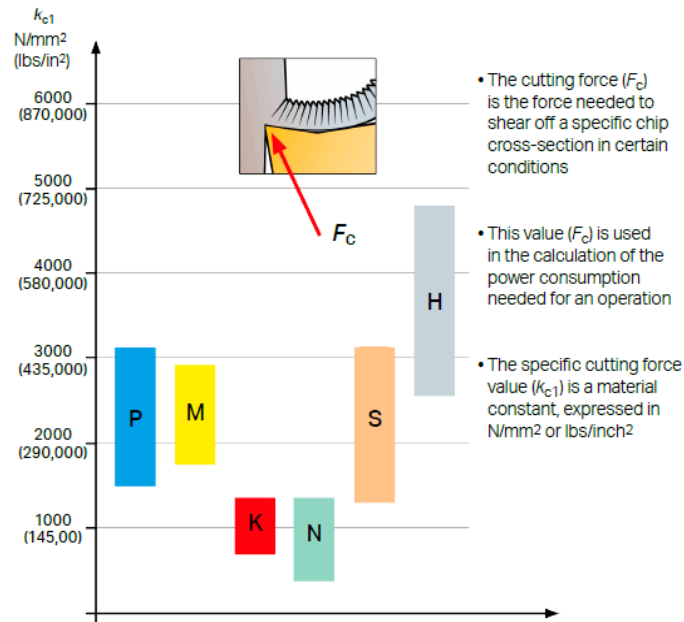


Fig. 2.28. Fuerza específica de corte para cada clasificación ISO (AB Sandvik Coromant 2017).

El parámetro de Kc_1 es derivado de una expresión más general que parte de cuantificar la energía o el trabajo necesario para remover un volumen determinado de material. Este concepto también se utiliza en las excavaciones terrestres en las cuales se calcula la energía específica de corte para una roca, de manera de evaluar si será más o menos difícil taladrar un material que otro. Los valores de la energía específica de corte se calculan realizando ensayos de indentación sobre rocas, en los cuales se mide la fuerza necesaria para realizar un surco de un volumen determinado. De esta manera, midiendo las fuerzas involucradas en el proceso y el volumen o masa total del material desplazado por la herramienta se calcula el trabajo requerido para remover una cantidad de material determinada.

Ensayos experimentales muestran que una vez fijada la geometría del cortador y variando sucesivamente la profundidad del corte, existe un valor mínimo de energía específica de corte. Este mínimo de energía brinda el punto de mejor eficiencia mecánica durante el corte [Teale 1964]. Con estas consideraciones se puede realizar una clasificación de los requerimientos de potencia para taladrar una formación dada. Adicionalmente las fuerzas a las que está sujeto el cortador varían con su geometría, los diseños entonces se realizan optimizando estos valores. De aquí se desprende que la geometría del cortador varía la energía mecánica transferida de la herramienta al material cortado. La literatura en general específica que, para el caso de fractura de rocas, un ángulo de ataque adelantado aumenta el valor de esta y los ángulos de ataque lateral pueden tener mayor o menor peso dentro de la

energía específica [V. Rajabov et al 2012 y D. Antoljak et al 2018]. En base a la bibliografía consultada en párrafos anteriores se puede extraer que algunos valores tipos de energía de corte para rocas tipo areniscas se encuentran en el orden de 9 a 20 MJ/m³ lo que a comparación de los materiales metálicos es bastante inferior (Tabla 2.5) una vez ajustado las unidades respectivas. Toda esta información recolectada permitió seleccionar un tipo de carburo de tungsteno (WC) para el filo de corte de la broca que tuviera la capacidad de maquinar un material con propiedades aproximadas a una aleación de características tipo ISO K. Estas placas de carburo son pulvimetalúrgicamente formadas con una composición base de partículas de Carburo de Tungsteno (WC aprox. 75% -80 %) cementadas con carburos de Cobalto (CCo aprox. 15% - 20%) y algún otro carburo particular. El tamaño de los granos de el WC es uno de los parámetros más importantes para ajustar la relación dureza /tenacidad de un grado determinado. A medida que el grano se hace más fino, la dureza aumenta para una dada cantidad de fase cementicia (en este caso el CCo). La cantidad de fase de CCo controla la resistencia a la deformación plástica y la tenacidad. En general un aumento de esta fase resulta en un aumento de tenacidad lo que es más proclive al desgaste por deformación plástica. A su vez un bajo contenido de CCo puede resultar en un material de características frágiles. En base a las búsquedas bibliográficas y la teoría presentada anteriormente se puede establecer que los requerimientos y materiales para cortar una aleación de tipo ISO K cumple con los requerimientos mínimos para cortar un geomaterial como la roca sedimentaria tipo arenisca, se procede analizar los parámetros teóricos del proceso de perforado en cuanto a potencia, avance y RPM que permitirán dimensionar y construir un modelo de taladradora. Las primeras variables de perforación a definir son el avance (tasa de penetración que queremos obtener), y geometría básica del cortador a estudiar (Fig. 2.29):

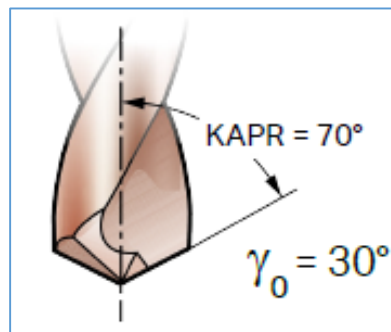


Fig.2.29. Detalles de ángulo de punta y ángulo de ataque típicos (AB Sandvik Coromant 2017)

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_C \cdot n}{1000} ; \frac{m}{min}$$

$$fn = fz * 2$$

$$vf = Fn * n; \frac{mm}{min}$$

Donde:

vc = velocidad de corte

vf = velocidad de avance

n = velocidad de rotación de la broca [rpm]

fn = avance por revolución [mm/rev]

fz = avance por diente

$$Pc = \frac{fn * vc * DC * Kc}{240 * 10^3}; kW$$

$$Pc = \frac{fn * vc * DC * Kc}{132 * 10^3}; Hp$$

$$Kc = Kc1 * fz * \sin(KAPR)^{-mc} * \left(1 - \frac{\gamma_0}{1000}\right)$$

Donde:

Pc =consumo de potencia

Kc = fuerza específica de corte [N/mm^2]

$Kc1$ = fuerza específica de corte respecto de 1 mm de espesor de viruta.

DC = diámetro de la broca [m]

γ_0 =ángulo de ataque de la herramienta

$KAPR$ = ángulo del filo principal (ángulo de punta) de la broca

mc = Factor de corrección de espesor de viruta

Finalmente, mediante el esquema propuesto en la Fig. 2.30 se puede definir la potencia total del equipo en función de la fuerza de corte, avance y torque.

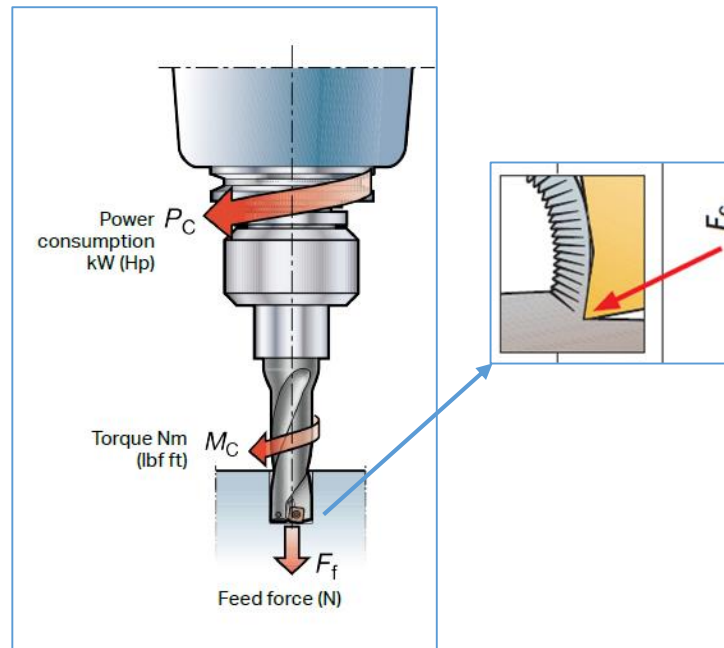


Fig. 2.30. La potencia del proceso de perforado depende de la fuerza de avance y torque aplicados las cuales en conjunto generan una componente de fuerza neta F_c . (AB Sandvik Coromant 2017)

Por último se estima la fuerza de corte, fuerza de avance y torque:

$$F_c = K_c * a_p * f_n; N \quad (7.7)$$

$$F_t \sim 0.5 * K_c * \left(\frac{D_C * f_n}{2} \right) * \sin \sin (KAPR); N (7.8)$$

$$M_C = \frac{P_C * 30 * 10^3}{\pi * n}; Nm \quad (7.9)$$

Donde:

F_c = fuerza de corte

M_c = torque

F_f = fuerza de avance

En base a estos parámetros teóricos y otras consideraciones, se pueden hacer estimaciones de las tensiones generales a los que estará sometida la estructura de una perforadora y sus componentes principales, Además permite seleccionar los requerimientos de los equipos que componen al modelo como rpm del motor, caja de reducción, tasa de avance y presión del sistema de empuje, y demás parámetros.

2.4. Clasificación de geomateriales rocosos sedimentarios y metamórficos

A continuación se realiza una breve clasificación de los tipos de rocas sedimentarias y metamórficas con el objetivo de detallar las posibles estructuras encontradas en función de su forma y material de gestación. La información presentada se extrajo de National Audubon Society 1979 y J. Erickson 2001.

2.4.1. Rocas sedimentarias

Su nombre proviene del latín “Sedimentum”, que significa asentamiento. Estas se forman cerca de la superficie terrestre por acumulación de partículas y presión moderada a partir de capas de sedimentos acumulados. Las rocas sedimentarias *clásticas* consisten en fragmentos de rocas más viejas que fueron expuestas al clima y a los elementos. Estos fragmentos (clastos) pueden ser de diferentes tamaños abarcando desde partículas submicroscópicas hasta mayores como guijarros o canto rodado. A medida que los sedimentos se acumulan, algunos de ellos en gran cantidad dejando capas de varios kilómetros de espesor, ejercen una presión incremental (acompañadas por un aumento de temperatura) en las capas o deposiciones inferiores, causando que estas se compacten y cementen formando capas de rocas. De esta manera el limo se convierte en limolitas, la arena en areniscas y así para el resto de otras deposiciones. Las rocas sedimentarias se pueden clasificar en tres grandes grupos, dependiendo de la proveniencia de los sedimentos que la componen.

Roca detrítica (clástica): Roca formada por la acumulación de fragmentos derivados de rocas y minerales preexistentes provenientes de desintegración mecánica (medioambiental) y transportada a sus lugares de deposición final por agentes puramente mecánicos (Agua, viento, hielo y gravedad).

Rocas biogénicas u orgánicas: Las rocas sedimentarias orgánicas son formadas directa o indirectamente a partir de acción de organismos (plantas o animales) con o sin restos fósiles, algunos ejemplos de estas son el carbón, piedra caliza de coral y tiza.

Rocas químicas: Estas rocas sedimentarias no clásticas están compuestas primariamente por minerales producidos por la precipitación de una solución salina o agua natural con algún contenido de minerales. Luego estos minerales se concentran en la solución por efecto de la evaporación y como resultado de esta se llaman *evaporitas*. Ejemplos de estos tipos de rocas son la roca de sal y yeso.

Las rocas sedimentarias, de manera general, son fáciles de reconocer debido a que usualmente presentan una estructura de deposición en capas que pueden eventualmente revelar el ambiente sedimentario donde se creó. Por ejemplo, las grietas poligonales por desecación, marcas de ondulaciones y evidencia fósil de la vida primitiva del planeta tierra. Un número de términos especializados son usados para indicar los orígenes de los diferentes tipos de roca sedimentaria:

Hidrogénica: Precipitada a partir del agua mediante procesos inorgánicos.

Acuosa: Depositada por el agua.

Eólica: Transportada y depositada por el viento.

Terrígena: Derivada de la tierra

Lacustre: Proveniente de depósito de lagos

Marina: Depositada en agua marina

Continental: Depositada en tierra

Los siguientes términos son usados especialmente para describir la composición específica de los tipos de rocas sedimentaria.

Arcillosa: Que contiene una cantidad apreciable de arcilla.

Arcosica: Que contiene apreciable cantidad de feldespatos. Ejemplos: arenisca arcosica, conglomerados o calizas.

Calcáreas: Que contiene apreciable cantidad de carbonato de calcio (calcita).

Carbonáceas: Que es rica en carbón o materia orgánica, suficiente para producir un color gris oscuro o negruzco.

Dolomítica: Que contiene apreciables cantidades de carbonatos de calcio magnesio (dolomita) en adición a la calcita.

Feldespáticas: Que contiene conspicuos feldespatos en forma de fragmentos o granos.

Ferruginosas: Que contiene suficientes óxidos de hierro (hematites o limolitas) para colorearla generalmente en tonos rojizos o marrones amarillentos.

Cuarzosa: Que contiene cuarzo como mayor constituyente.

Silíceas: Que contiene abundante sílica libre (SiO₂) en vez de silicatos como principal constituyente.

Las texturas de las rocas sedimentarias se describen con cuatro términos básicos:

Granulometría gruesa: Compuesta por fragmentos más grandes que la arena. Ejemplos: guijarros y canto rodado.

Granulometría media: Compuesta por partículas del tamaño de la arena.

Granulometría fina: Compuesta por partículas más finas que el limo. Ejemplo: partículas de arcilla, las que no pueden ser distinguidas a ojo desnudo. También son llamadas *densas*.

Cristalinas: Compuestas completamente por cristales o fragmentos cristalinos.

Según sus características estructurales de las rocas sedimentarias pueden agruparse en:

Estratos: También llamadas *en capas*, son rocas formadas por sedimentos que frecuentemente son depositados en capas que pueden ser distinguidas por su diferencia en textura, dureza, color, estructura interna cementación, y composición entre las sucesivas capas. La deposición en capas es llamada *estratificación*.

Laminación: También llamadas de *lecho fino*, son finamente estratificadas como en el caso del shale.

Laminación cruzada: Arreglos menores de laminación entre la roca estratificada más o menos inclinadas respecto a la superficie de deposición, con pendientes rectas o cóncavas en varios ángulos. La laminación cruzada puede resultar de la deposición de sedimentos por inundaciones, crecimiento y movimientos de dunas de arena por el viento o acumulación de sedimentos provenientes de un delta.

Marcas de ondulación: Son pequeñas crestas y concavidades paralelas (llamadas ripples) originalmente formadas en sedimentos sueltos por la acción del viento, el agua, flujos en corrientes, olas y corrientes en el fondo de lagos o en las bases del océano que luego se preservaron en la consolidación de la roca.

Agrietamiento de barro: Fracturas irregulares en un patrón aproximadamente poligonal, originalmente formado por la desecación y contracción de la arcilla, limo, o lodo al aire abierto. Posteriormente las grietas fueron llenadas por rocas endurecedoras y preservadas en la consolidación de la roca sedimentaria.

Rocas de concreción: Estructuras aproximadamente esféricas o redondeadas, más o menos simétricas en rocas sedimentarias clásticas. Estas son formadas por la acumulación y cementación de material mineral (usualmente presente en la roca como cemento) alrededor de núcleos (generalmente fósiles) en el centro de la estructura.

Oolitas: Cuerpos de concreción redondeados de pequeño tamaño en roca sedimentaria. Su tamaño típico es de entre 0.5 mm a 1 mm de diámetro. Están compuestas por calcita, pirita, cuarzo, hematita, limolita u otro mineral con un arreglo concéntrico de capas respecto de un núcleo (por ejemplo, grano de arena). Algunas Oolitas tienen estructura radial y otras son virtualmente sin estructura.

Pisolitas: Pisolitas son esencialmente como las Oolitas, pero tienen un diámetro mayor que oscila entre los 2 mm a 10 mm de diámetro y con forma más irregular. En su interior carecen de estructura definida o se encuentran llenas de minerales acomodados en forma de fibras radiales.

Fósiles: Se llaman fósiles a cualquier resto, traza o impresión de planta o animal preservado mediante procesos naturales en la superficie terrestre.

2.4.2. Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas provienen del griego “meta” cambio y “Mopha” forma. Estas comprenden el grupo más complejo de rocas en comparación con las ígneas y las sedimentarias. Las mismas provienen de cambios producidos en rocas precedentes, ya seas ígneas, sedimentarias o metamórficas preexistentes. Estas rocas son modificadas debido a la presión, la temperatura, así como con la actividad química en la corteza terrestre. Las rocas metamórficas muestran varias características distintivas y los minerales en ellas generalmente aparecen en forma cristalina. Por ejemplo, una caliza densa y maciza puede cambiar a mármol con textura cristalina gruesa. Muchos minerales formados por recristalización involucran los constituyentes químicos de sus rocas padres (Ej. Micas, cloritas, hornblenda, etc.) Tienden a ser alongadas en ciertas direcciones o estar alineadas en capas paralelas, de manera que brindan una estructura orientada o foliada. Esta foliación puede aparecer como bandas alternadas de color y textura como en el Gneis o esquisto. Algunos minerales como la Tremolita, Sillimanita y la Cianita son siempre de origen metamórfico. Los efectos del metamorfismo dependen de las propiedades de las rocas padres, del ambiente metamórfico al cual son sometidas y del tiempo que son expuestas a este, antes de aparecer en la corteza terrestre. Los esfuerzos y movimientos laterales y

verticales en la corteza terrestre provocan una enorme fuerza compresiva que juntamente con las altas temperaturas que ocurren varios kilómetros debajo de la superficie terrestre, cerca de los bordes de los cuerpos de magma hacen que el cambio metamórfico se produzca. Estos cuerpos de magma generalmente están compuestos por material metamórfico refundido de rocas y aquí el ciclo de la roca comienza de nuevo desde roca fundida.

Tres tipos de procesos metamorfismo son reconocidos:

Metamorfismo de contacto (termal): Este metamorfismo se debe principalmente al calor, donde el magma con una temperatura promedio de 700-100°C es introducido en la corteza terrestre formando rocas ígneas plutónicas. La roca que se encuentra en la corteza terrestre puede ser modificada, pero por el intenso calor y por los materiales que emanan del material fundido del magma. La zona de contacto metamórfica alrededor de la intrusión ígnea se aureola. En esta zona se observa una clara reducción del metamorfismo a medida que se incrementa la distancia de contacto con la intrusión. Hornfels, mármol, silicatos calcáreos y metacuarcita son típicas rocas metamórficas de contacto.

Metamorfismo hidrotermal: Metamorfismo relacionado con el metamorfismo de contacto, debido a la percolación de una solución caliente o gases a través de las fracturas, causando cambios en la química y en la mineralogía de la roca circundante. Skarn y Serpentinita son las principales rocas de este tipo.

Metamorfismo dinamotérmico: Este metamorfismo se debe a la acción combinada de calor y presión que acompañan procesos terrestres de gran escala como la formación de montañas. También es llamado metamorfismo regional dinamotérmico. Este metamorfismo afecta extensas áreas (mayores a 1000 kilómetros cuadrados) hasta grandes profundidades dentro de la corteza terrestre, donde además operan durante muy largos intervalos de tiempo. Es posible distinguir varios grados de metamorfismo dinamotérmico, dependiendo de que las temperaturas involucradas sean bajas, medias o altas. Rocas características de este tipo de formación son: Pizarra, Esquisto, Gneis, Mármol, Calcita, Metacuarcita.

Durante el metamorfismo, nuevos ensambles de minerales son creados a partir de la reorganización parcial o total de los minerales que constituyen las rocas padres. El resultado es que la fabricación de rocas metamórficas es mayoritariamente cristalina, donde las rocas padres pueden tener un variado tipo de textura. Un número de minerales son formados exclusiva o mayoritariamente por la acción del metamorfismo. Algunos de ellos son: Actinolita, Almandina, Andalucita, Andradita, Clorita, Cordierita, Epidota, Glaucofano,

Grafito, Cianita, Talco, Tremolita, etc. Numerosos minerales que se originan en rocas sedimentarias e ígneas también son comunes en rocas metamórficas. Ejemplos de estos son el Cuarzo, el cual es lo suficientemente estable como para someterse al proceso de metamorfismo y permanecer sin cambios. Debido a que este mineral persiste en su forma original a pesar de la acción destructiva del metamorfismo, se describe como mineral *Relicto* (mineral remanente o residuo).

El metamorfismo usualmente causa cambios en la forma de los granos. Estos se modifican en cristales bien conformados de mayores tamaños y texturas de mayor grosor. Los minerales metamórficos ya sean recientemente formados o recristalizados de previos minerales, tienden a mostrar nuevas facetas y formas cristalinas de gran tamaño mayores a los granos de las rocas padres. Los cristales en general parecen encajar como azulejos en un mosaico en vez de estar entrelazados como se mostraría en la fabricación de una roca Ígnea. En muchos aspectos las texturas cristalinas metamórficas se parecen a las observadas en las rocas plutónicas Ígneas, sin embargo, existe una fuerte tendencia de los minerales a tomar forma de escama y prismática alineadas de manera paralela.

De los varios términos adoptados para describir las texturas de las rocas metamórficas, aquí se describirán sólo tres:

Porfidoblasto: Diferentes cristales (Granate, Estaurolita, etc.) sobre una matriz de grano más fina.

Granoblástica: Tiene cristales equiaxiales o equidimensionales de origen metamórfico más o menos uniformes en tamaño formados por la recristalización de rocas metamórficas no foliadas

Cristaloblástica: Compuestas por texturas de cristales minerales enteramente producidas por procesos metamórficos. Los cristales pueden ser de cualquier medida desde muy pequeños hasta muy grandes.

El metamorfismo a menudo incluye el desarrollo de nuevas estructuras dentro de las rocas. El alineamiento de los minerales es un cambio estructural común dentro de estas, causado por la presión, que es habitual en estos procesos. Un gran número de minerales tienden a crecer de manera perpendicular a la dirección de la presión aplicada y por lo tanto el crecimiento de estos minerales tiene un fuerte efecto en el desarrollo de la estructura de la

roca. Algunos de estos minerales tienen formas características o hábitos que son útiles a la hora de realizar la identificación de la roca.

Escamas: Micas, Clorita, Talco, Grafito

Prismáticas (Gruesas, columnares, aplanados, forma de cuchillas): Hornblenda, Sillimanita, Estauroлита, Andalucita, Kyanita.

Ecuante (de forma regular): Granate, Calcita, Dolomita, Cuarzo, Pirita, algunos Feldespatos.

En el proceso de describir las rocas metamórficas es necesario distinguir varios niveles de características estructurales, de las cuales las más importantes se detallan a continuación:

Estructura Linear: Habla de un alineamiento paralelo o subparalelo de minerales prismáticos en direcciones lineales, pero sin orientación plana.

Foliación: Arreglo plano paralelo o subparalelo de escamas, así como de minerales prismáticos. Su textura se asemeja a hojas sobrepuestas unas sobre otras. En base a lo anterior se pueden distinguir cuatro tipos de foliación.

Foliación tipo pizarra: Foliación incipiente producida por un arreglo plano de escamas de mica microscópica por donde una fractura se propaga fácilmente dejando una superficie suave y lustrosa. Esta también se llama clivaje tipo pizarra. Aunque hablando rigurosamente el término clivaje debe ser restringido a minerales.

Foliación tipo filita: Es una foliación mejor desarrollada. Las escamas de Mica son lo suficientemente grandes para ser vistas a ojo desnudo y las superficies de foliación son irregulares.

Foliación tipo esquisto: Esta foliación está bien desarrollada tendiendo a ser foliación de grano grueso. Está comúnmente se produce por orientación paralela o subparalela de minerales en forma de escama o prismáticos como Mica o Hornblenda que representan más del 50% de los minerales de la roca.

Estructura tipo Gneis: Capas de minerales granulares que muestran discontinuidades o foliación alineada alternada, con bandas de foliación definidas de micáceas y minerales prismáticos representando menos del 50% de los minerales de la roca.

Capítulo 3

MÉTODO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen las características técnicas del equipo de perforación, el diseño y construcción de sus componentes y la construcción de las probetas de geomaterial. Adicionalmente se detallan los parámetros del proceso y se describen los métodos de procesamiento de las señales de EA obtenidas de la perforación para evaluar la dinámica del proceso.

3.1 Cálculos para el diseño de la máquina perforadora, verificación de tensiones máximas y parámetros de diseño preliminares

En base a la literatura y la información mostrada en los capítulos introductorios se puede establecer que el proceso de perforación es al menos complejo y que depende de muchas variables. Entre las más importantes se pueden mencionar las características mecánicas y físicas del material a cortar, el material y la geometría del cortador, las condiciones de perforación (mecanismos, velocidad de rotación y avance), las condiciones tensionales del material taladrado, la lubricación del proceso y el modo de remoción de los residuos de material cortado. Es por esto por lo que se decidió comenzar el análisis de las condiciones de corte en base a una comparación con los procesos de corte de metales, de los cuales existe una amplia experiencia científica y técnica, con bibliografía disponible y de fácil acceso. El corte de metales tiene una variedad de formas que permiten extrapolar y asociar comportamientos de estos, a otros materiales de diferente composición o morfología no metálica. El corte puede variar desde muy dúctil y pastoso como para algunos polímeros y aceros de baja aleación, a formas de corte frágiles con mínima o nula deformación plástica y alta fricción y desgaste, como puede ser el corte de rocas o de aleaciones metálicas fundidas (fundiciones) de alta dureza.

La información presentada en el capítulo introductorio referente al proceso de perforado permitió realizar una simulación de diferentes configuraciones del proceso de taladrado en las cuales se pueden variar parámetros como la velocidad angular de rotación rpm, el ángulo de la punta, la fuerza de avance necesaria para el corte del material y la potencia del torque aplicado para evaluar cómo cambia la sollicitación mecánica del modelo de máquina para las diferentes configuraciones. Una vez realizada esta aproximación a primer orden, se procede a realizar los cálculos de verificación del modelo, donde se analizan las tensiones en uno de los puntos de mayor sollicitación mecánica. Esta es la broca de perforación ya que por ella se transmite la fuerza de avance y el torque que produce directamente el proceso de corte. Todos estos análisis se realizaron a fin de encontrar los puntos de operación apropiados para el ensayo, definir las características del cortador, la potencia de motor y la fuerza de empuje necesarias para perforar estos geomateriales. En la Fig. 3.1 se muestran los resultados obtenidos de los modelos donde se evalúa la fuerza y la velocidad de avance en función de la potencia del motor utilizado. Estos resultados consideran un ángulo de punta específico con una broca de 65 mm de diámetro.

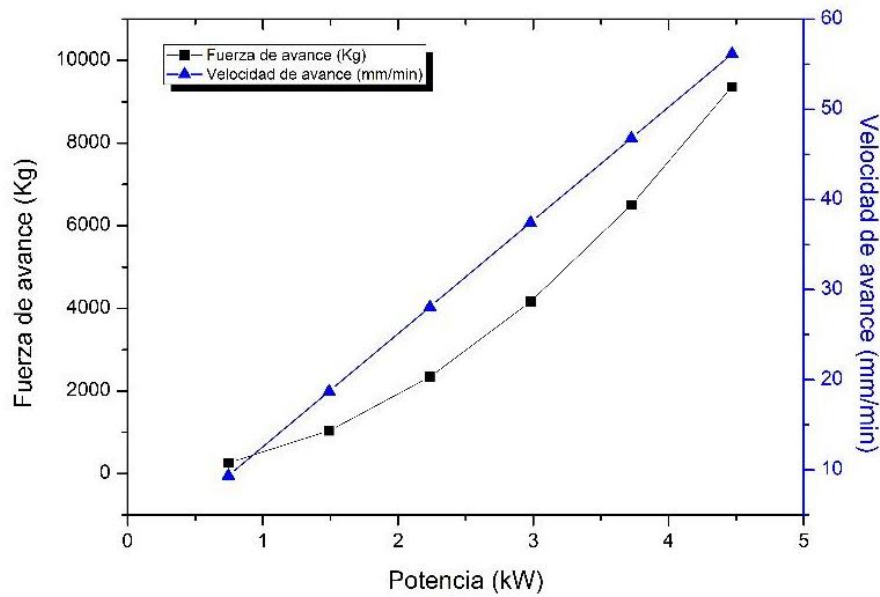


Fig. 3.1. Resultado de modelos de cálculo de parámetros de perforación en base a ecuaciones de perforación disponibles en el manual de mecanizado (Anexo A).

Los modelos de cálculo fueron cargados en una planilla de Excel para tal fin y se encuentran basados en las ecuaciones desarrolladas en el capítulo introductorio de mecánica de la perforación y en secciones posteriores de este capítulo donde se analiza el filo cortador. De esta manera, se pudieron modificar libremente cada una de las variables consideradas y evaluar cómo cambian los valores de las demás variables. Los cuadros de cálculo y la verificación de secciones resistentes de la broca se encuentran en el *anexo A*. Los mismos no se detallan en el presente capítulo ya que no es el objetivo principal de la tesis, pero se menciona, que este paso permitió estimar detalles constructivos como el espesor de las secciones del cuerpo del cortador y definir los ángulos de corte de la herramienta perforadora, la potencia mínima del motor, la potencia y presión mínima del sistema hidráulico de avance, la dimensión del cilindro de empuje y otros importantes parámetros constructivos de la máquina. Posteriormente en el *anexo A* también figuran los modelos 3D realizados en *SOLIDWORKS* que fueron necesarios para diseñar varias de las partes de la perforadora.

3.2. Construcción de las diferentes piezas del modelo de la perforadora e instrumentación de monitoreo

3.2.1. Carro de avance y estructura de soporte

El cuerpo central de la perforadora consta de una estructura de soporte y movimiento perteneciente a una máquina en desuso. Este elemento consta de dos soportes laterales de hierro tipo U los cuales contienen en su interior un carro con corredera deslizante sobre tres guías prismáticas que le permiten moverse verticalmente una distancia aproximada de 600 mm. Sobre este carro se realizó el montaje de los dispositivos de perforación como el cuadro de soporte y fijación de la máquina, el motor, caja de reducción y la broca. Este carro de avance y otras piezas referenciadas oportunamente fueron donados por la empresa **CARSOL S.R.L**, para la construcción del prototipo. En la Fig. 3.2a se observan las guías de soporte por donde desliza el carro de avance vertical y los perfiles tipo U por donde se une esta estructura al soporte de todo el equipo. El soporte del carro que se observa en la Fig. 3.2b está compuesto por tres colisas prismáticas tratadas superficialmente (carburizadas), lo que provee buenas características de dureza superficial y resistencia al desgaste en sus caras deslizantes con una alta tenacidad para soportar eventuales impactos y fuerzas combinadas de flexión y torsión que puedan ser transmitidas por el carro. Sobre este soporte se monta el carro deslizante que cuenta con alojamientos para suplementos trapezoidales los cuales se utilizan para ajustarlo y trabarlo a las colisas prismáticas. La Fig. 3.3 muestra la parte posterior del carro, desmontado para su reparación y ajuste, observándose el alojamiento de la guía central y los tornillos de ajuste los suplementos trapezoidales que permiten regular el juego lateral y frontal durante el deslizamiento del sistema.



Fig. 3.2. a. Vistas superior de perfiles U y colisas de guía. **b.** Montaje de carro de avance sobre guías lineales.

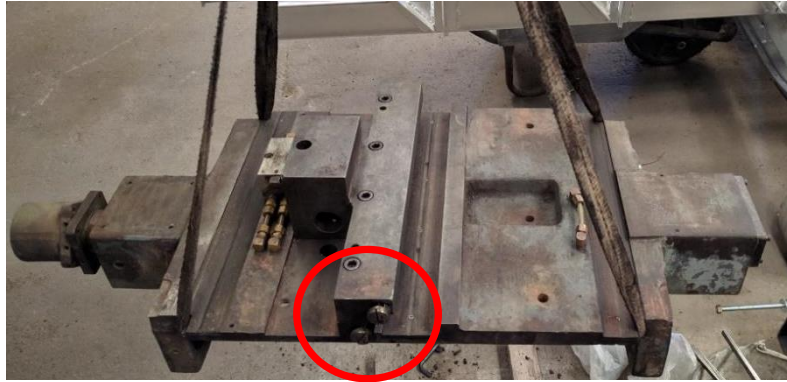


Fig. 3.3. Parte inferior del carro deslizante que soporta el equipo de perforación

Mediante caños estructurales cuadrados de 120 mm x 120 mm x 2.5 mm de espesor se construyó un marco integral (Fig. 3.4), que soporta el peso de la máquina y permite fijar la estructura al lugar de trabajo. Adicionalmente esta estructura proporciona los puntos de anclaje del cilindro hidráulico que provee la Fuerza de Avance (FA) del proceso de perforación.



Fig. 3.4. Marco de soporte de la perforadora, unido al sistema de deslizamiento.

Una vez definidas las dimensiones generales, se continuó con el montaje de los accesorios individuales que accionan el movimiento y la instrumentación de la perforadora. Para esto, se instaló una placa rectangular de 1000 mm de largo por 700 mm de ancho por 19 mm de espesor sobre el carro de avance (Fig. 3.5 a y b) que servirá de plano de apoyo a diferentes componentes según el modelo detallado en un croquis realizado en Autocad.

En la Fig. 3.6 se detallan los dispositivos fijados sobre la placa base y un croquis de su posición relativa antes del montaje. Este ensamble se realizó con la asistencia del programa Solidworks con el fin de establecer el posicionamiento correcto de todos los elementos luego de su relevamiento físico, y evitar interferencias de los mismos. Un detalle de todas las piezas modeladas se encuentra en el **anexo A**.

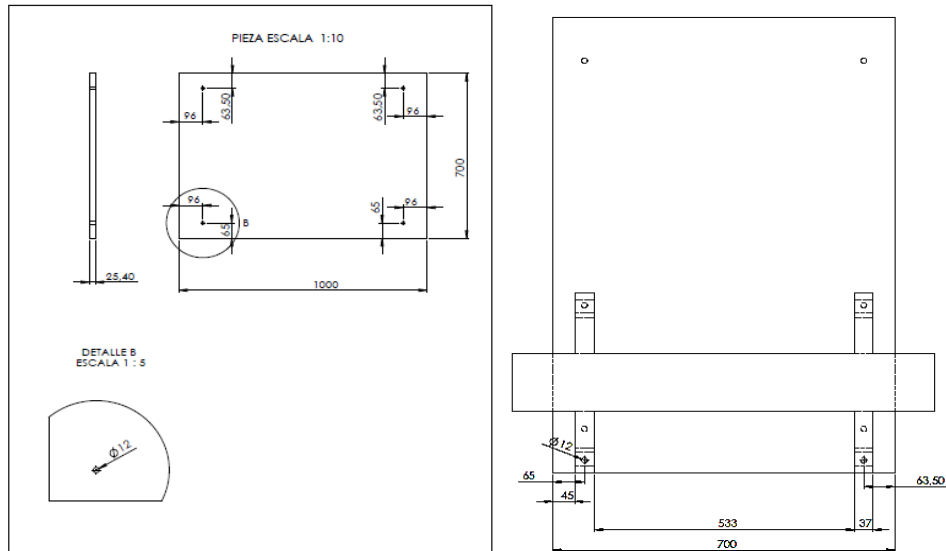
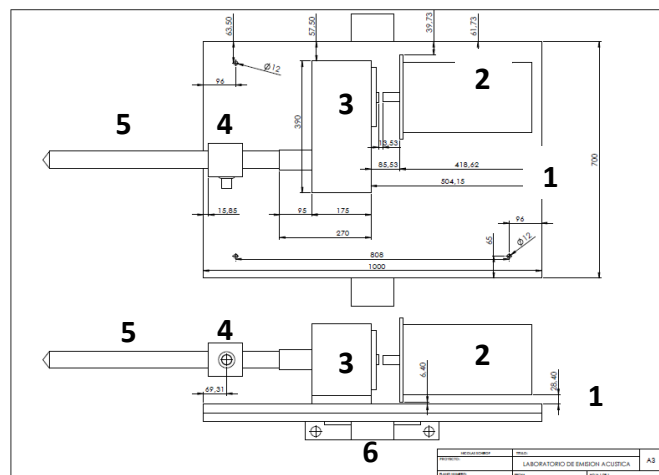


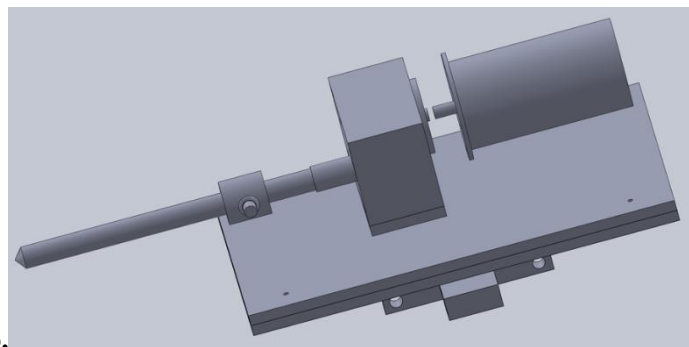
Fig. 3.5. **a.** Placa base donde se montaron accesorios de la perforadora. **b.** Posición de montaje de placa respecto de carro de movimiento.

El modelo ensamblado virtualmente permitió dejar preparada la máquina para futuras modificaciones que eventualmente mejoren sus prestaciones, por ejemplo, en el caso de ser necesario, colocar una segunda línea de rodamientos radiales con el fin de eliminar la fuerza de flexión antes que la broca ingrese a la caja reductora de rpm.

Nro	Detalle
1	Placa base
2	Motor Eléctrico
3	Caja multiplicadora
4	Guía de ondas de EA
5	Broca de perforación
6	Carro deslizante



a.



b.

Fig. 3.6. **a.** Detalle de los dispositivos montados sobre la placa base. **b.** Modelo 3D realizado en Solidworks.

3.2.2. Montaje del soporte de rodamientos y anclajes de la lumbrera, la caja reductora y el motor

Sobre la placa de soporte se realizó la colocación de todos los anclajes para los rodamientos (radial y cónico) y la placa de soporte que une la lumbrera mediante una conexión doblemente enchavetada entre el motor y la caja multiplicadora. Estas placas y soportes fueron cortados con oxiacetileno a partir de chapas de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " de espesor (Fig. 3.7 a). Luego con estas piezas se construyó la placa de lumbrera y la lumbrera (Fig. 3.7 b y c) que permiten soportar y conectar el motor con la caja reductora, los anclajes pertenecientes al rodamiento radial, los soportes del rodamiento axial y los anclajes de la guía de ondas hidráulica. Estos componentes fueron soldados en posición según el diseño del croquis de la Fig. 3.5.

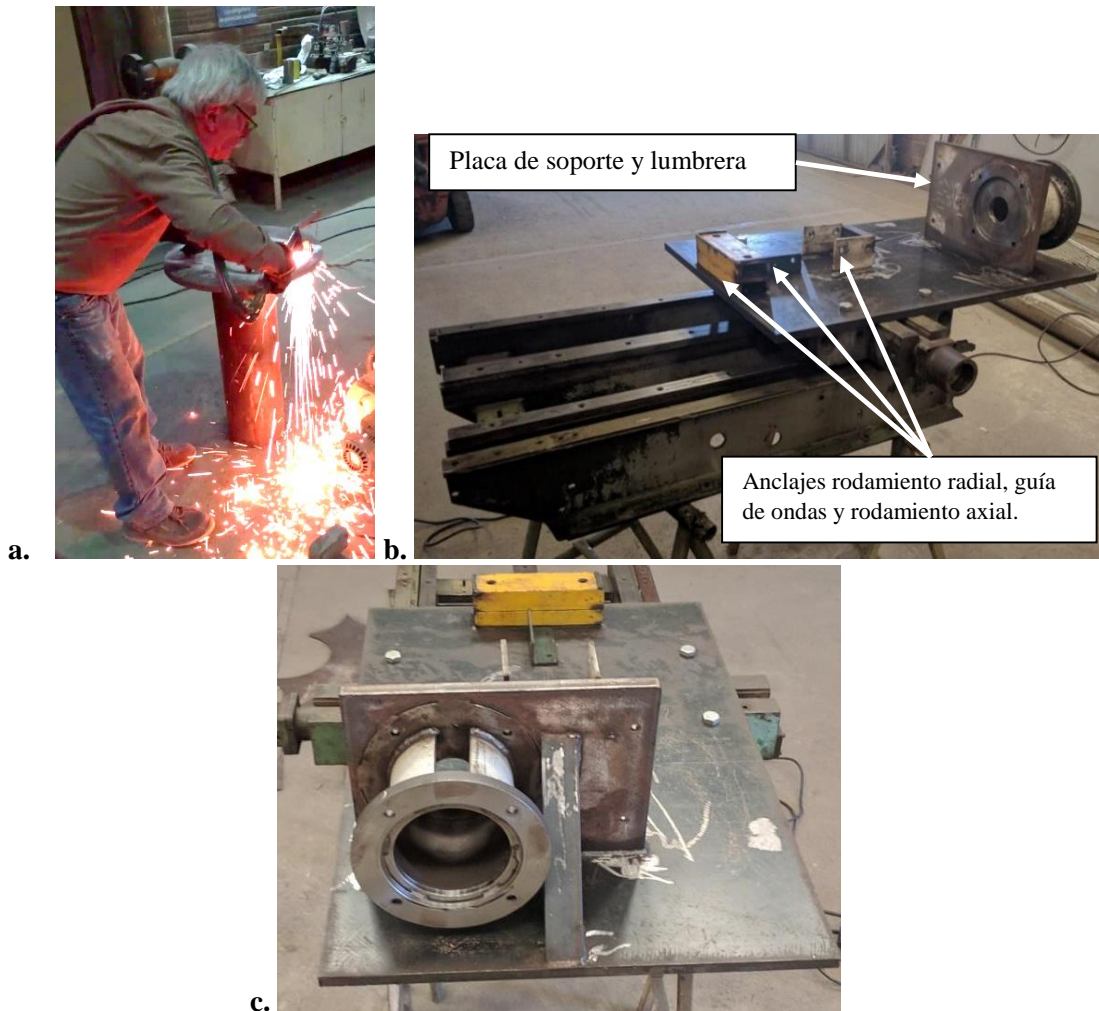


Fig. 3.7. a. Corte manual de la placa de anclaje. b. Posición soldada de los anclajes sobre la chapa base. c. Vista principal de la lumbrera de conexión y el soporte motor - caja reductora.

3.2.3. Caja de reductora

La caja de transmisión instalada tiene 4 etapas de reducción de velocidad, con engranajes de dientes planos y helicoidales en diferentes partes de la cadena de transmisión. Esta caja tiene un factor de reducción de 160:1. Esto produce un gran aumento del par transmitido a la broca y permite un proceso de perforación estable. Originalmente esta caja estaba diseñada para una velocidad de ingreso de 1000 rpm y 8 hp de potencia, pero debió ser modificada para acoplarse al motor de 3000 rpm y 4 hp. Para esto, se recubrieron los engranajes de transmisión con bisulfuro de molibdeno, y se le proporcionó una lubricación especial con grasa grafitada liviana, además de otras modificaciones que permitieron que el equipo pueda trabajar a 4 veces su velocidad nominal. A continuación, se muestra el despiece de la caja antes de las modificaciones (Fig. 3.8).



Fig. 3.8. Tapa, cuerpo y engranajes de transmisión de caja de reducción con relación 160:1.

3.2.4. Construcción de la broca de perforación

La herramienta de corte completa, o broca, está diseñada como un ensamble de cuatro componentes. Estas piezas son el encastre roscado para la transmisión del torque, el tubo o cuerpo de perforación, la punta porta filo y el filo de corte. La Fig. 3.9 muestra un croquis de los componentes principales de la herramienta, donde el encastre rectangular roscado al cuerpo de la broca se realizó en acero SAE 4140 laminado en frío. Esta pieza fue provista de un extremo cuadrado el cual se conecta al alojamiento cuadrado de la caja reductora y otro extremo roscado que se une al cuerpo cilíndrico de la broca para transmitir el torque. El cuerpo de la broca se realizó a partir de un tubo de acero sin costura (Euronorma 10.297) de 60.3 mm de diámetro, 12 mm de pared y 1000 mm de longitud. Sobre este tubo se realizaron roscas en ambos extremos para la instalación del encastre a la caja reductora y la punta porta filo. Adicionalmente este tubo debió ser torneado exteriormente a medida, con el fin de ajustar los rodamientos de soporte de cargas radiales, axiales, sellos para la inyección de

agua y la guía de ondas hidráulica, que se describe en una próxima sección y cuyo fin es realizar el acoplamiento del sensor de EA a la herramienta rotante en todo instante. Este tubo también debió ser perforado lateralmente proveerle acceso a el ingreso de agua desde la caja de rodamientos radial hacia el alma del tubo. Luego esta agua se inyecta por la punta de la broca para lubricación y extracción de material cortado durante la perforación. Se realizaron dos tipos de puntas porta filo.

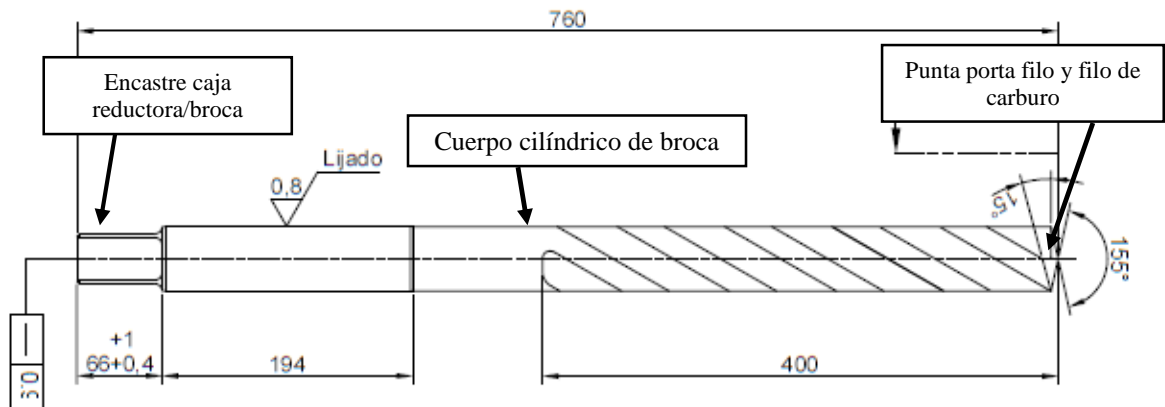


Fig. 3.9. Croquis de la broca completa con sus 4 partes constitutivas básicas.

Cortador de 2 filos de corte de Carburo de Tungsteno (WC)

Este cortador comprende un porta inserto realizado en acero SAE 4140 templado a 62 ± 1 HRc y posteriormente revenido como muestra el diagrama de ciclo térmico de la Fig. 3.10 hasta una dureza final de 52 ± 1 HRc.

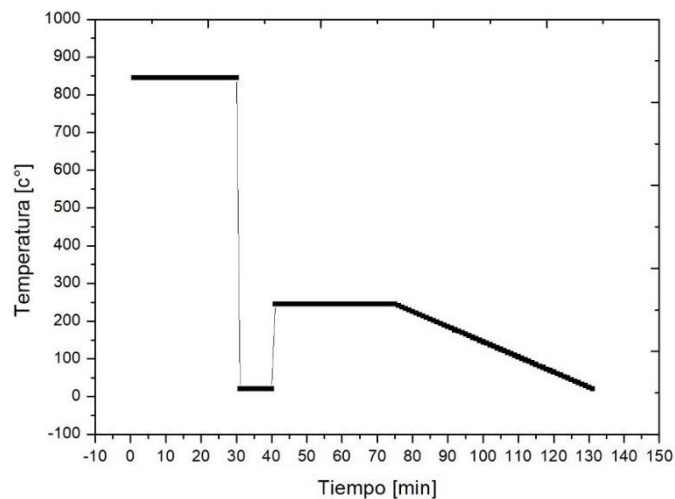


Fig. 3.10. Ciclo térmico temperatura – tiempo de proceso de templado y revenido para la punta porta filo.

El diseño de la punta contempla canales de desagote de material cortado, agujeros para inyección de agua y el alojamiento para la inserción de la placa de corte de carburo de tungsteno (Fig. 3.11 a y b). Los insertos de corte de WC fueron fabricados mediante

pulvimetalurgia y se seleccionados para esta aplicación considerando una sollicitación de bajas temperatura de corte y velocidad, y fractura frágil del material con gran componente de fricción y erosión.

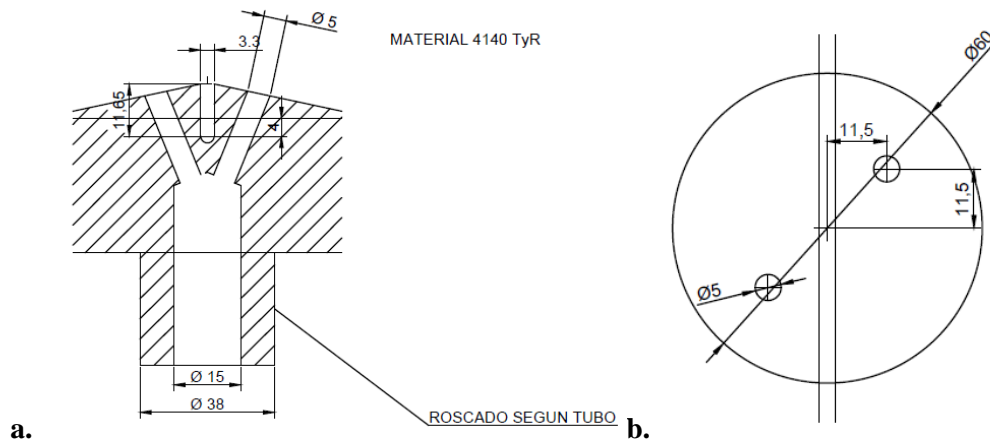


Fig. 3.11. a. Corte de punta portabroca mostrando canales de inyección de agua y encastre de filo de CT. **b.** Vista superior de encastre y canales de inyección de agua.

El material utilizado es una composición pulvimetalurgica estandarizada denominada ISO K20 el cual tiene aproximadamente 93% WC y 7 % Co. La densidad promedio es de 14.5 gr/cm³, y aproximadamente 90.5 HRa de dureza. El contenido de cobalto puede variar según se necesite mayor o menor tenacidad en la aplicación. Esto resguarda el filo a la fractura en un caso de impacto, pero disminuye su resistencia a la erosión/abrasión. Las empresas proveedoras de este material fueron Antares SA y Tantal SA. Estas placas en un principio fueron solicitadas en forma rectangular y mediante afilado manual sobre el torno se les proveyó del ángulo de punta previsto. Posteriormente dichas placas fueron solicitadas con el ángulo de punta conformado directamente a partir de la matriz de compactación y así disminuir la cantidad de material removido durante el afilado.

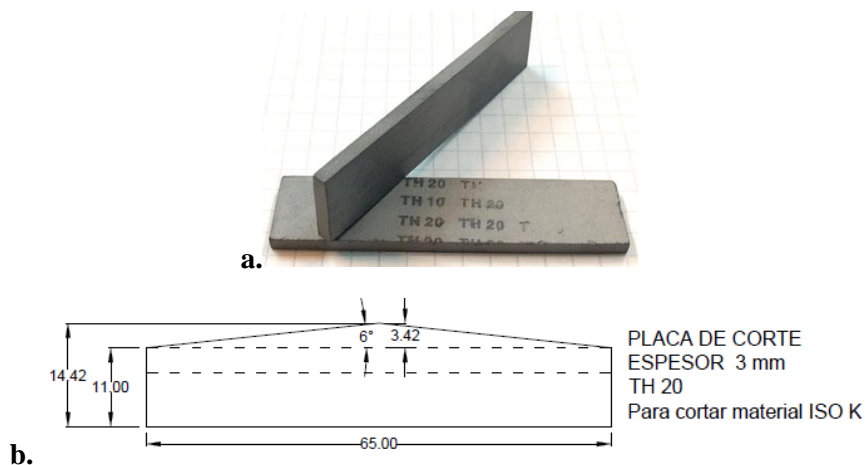


Fig. 3.12. a. Placas en bruto antes de ser afiladas. **b.** Geometría final a obtener mediante afilado.

Las placas de corte se adhieren a la punta porta filo (Fig. 3.13 a y b) mediante pegamento epoxi el cual posteriormente se cura en un horno a 60 °C por aproximadamente 90 minutos. De esta manera, se aumenta la resistencia del pegamento utilizado. En esta condición la punta de la broca es montada en un torno para su afilado donde se le realizará el ángulo de punta (Fig. 3.14 a y b), y manualmente se le provee del ángulo de descarga de filos principales y secundarios. Estos parámetros geométricos fueron calculados en base a los conocimientos expuestos en la parte teórica y en el desarrollo del modelo de la perforadora que se analizará posteriormente.



Fig. 3.93. Placa de WC pegada en punta porta filo sin ángulo de punta. **a.** Vista lateral **b.** vista superior.

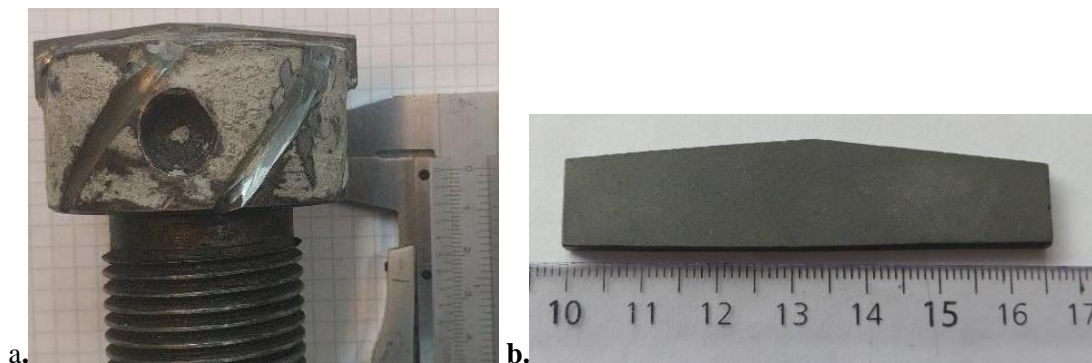


Fig. 3.14. **a.** Punta completa luego del proceso de afilado. **b.** Placa de carburo con ángulo de punta de fábrica.

Una vez probado el funcionamiento de la geometría de filo durante algunos ensayos de calibración, y con el fin de disminuir el tiempo de afilado de cada una de las brocas, se modelaron las placas de corte de WC con el ángulo de punta ya determinado desde fábrica, para lo cual debe realizarse una matriz que durante la compactación y sinterización del material le proporcione dicha geometría (Fig. 3.14 b). De esta manera una vez pegadas las

placas de WC solo se deben afilar a la piedra proveerles las descargas del filo y las mismas están listas para su uso. Un cortador compuesto por todos los requisitos de ensamblado anteriormente mencionados, componen una herramienta de corte 2 filos con un diámetro de taladro de 65 mm, con un ángulo de punta de 168° y con un ancho de diente de 3 mm. El flanco de ataque es recto de aproximadamente 1 mm de espesor y un destalonado mayor a 12° por 2 mm de espesor aproximadamente. Esta herramienta de corte se define como *Cortador de dos Filos de WC*.

Cortador de 4 filos de corte de acero SAE- AISI O2

El denominado *Cortador de 4 filos* se realizó en una única pieza mediante torneado, fresado y limado de una barra redonda de acero SAE O2 de alto carbono. Este cortador a diferencia del anterior cuenta con cuatro (4) filos de corte de mayor espesor (7.35 mm) que el cortador de dos filos que además conforman una pieza monolítica entre filo y cuerpo. También cuenta con 4 agujeros de lubricación y 4 canales de descarga de aproximadamente 15 mm de ancho cada uno. El ángulo de punta es de 168° con el flanco de ataque recto y el ángulo de descarga superior de 12° . Esta broca fue íntegramente tratada térmicamente mediante temple y revenido quedando una dureza final de 59 HRc promedio.



Fig. 3.15. Cortador de 4 filos de acero SAE-AISI O2 templado y revenido. Canales de lubricación y descarga.

En la tabla 3.1 se detallan las características generales de ambos cortadores que serán utilizados durante los ensayos y la Fig.3.16 pertenece a modelos extraídos del archivo de AutoCAD de la fase de diseño donde se marca el sentido del flujo del material cortado. El cortador de dos filos de WC conduce el material por su periferia (debido a la diferencia de diámetros entre el filo y el cuerpo del cortador) y en menor medida, por los canales del

cuerpo, mientras que el cortador de 4 fillos conduce íntegramente el material cortado a través de sus anchos canales de descarga tallados en el cuerpo ya que el mismo cuenta con una geometría cónica que hace que el diámetro inicial del cuerpo y los fillos de corte tengan el mismo diámetro que el agujero perforado.

Tabla 3.1. Comparación general de características entre los dos cortadores.

	Piezas	Diámetro	Cuerpo	Material del filo	Angulo de ataque	Angulo de punta	Descara de filo	Espesor del filo	Agujeros de Lubricación	Descarga de material cortado
Cortador 2 fillos	2- Filo y cuerpo pegados con epoxy	65 mm	Cilíndrico	Carburo de Tungsteno ISO K20	0°	128°	Si	3 mm	2	Periferica por variación de diámetro y canales en cuerpo
Cortador 4 fillos	Monotética-Filo y cuerpo de una sola pieza	65 mm	Cónico (5°)	Acero SAE O2 TyR	0°	128°	Si	7.35 mm	4	Por canales en cuerpo

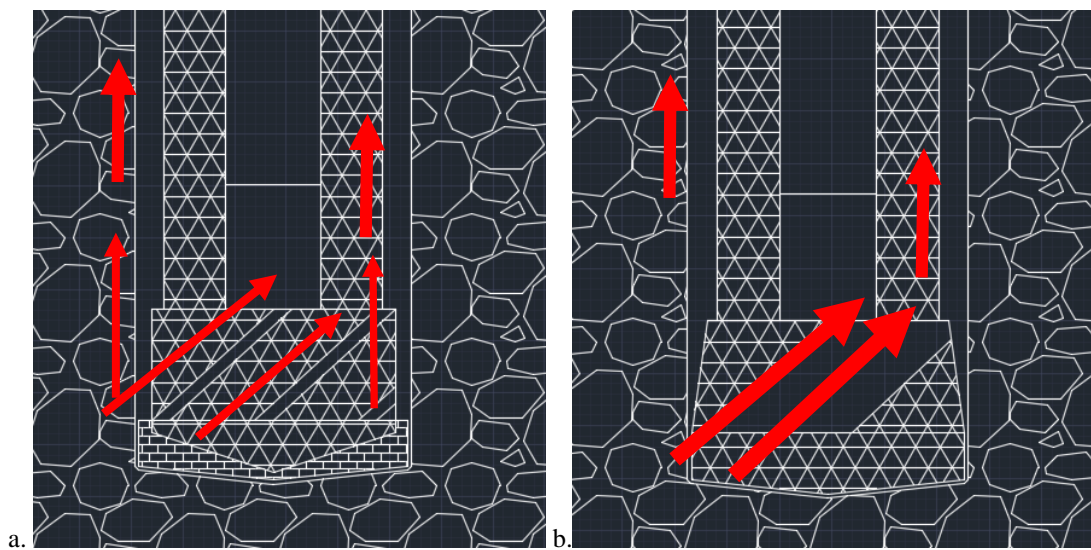


Fig. 3.16. Modelo de flujo de material cortado para el cortador de 2 y 4 fillos. **a.** Cortador de dos fillos de WC. El material se expulsa por los costados del cuerpo por la diferencia de diámetro entre filo y cuerpo y por las ranuras de descarga. **b.** Cortador de 4 fillos. Todo el flujo de material de descarga es canalizado por las ranuras de descarga.

Análisis del modelo de corte

El modelo básico del cual se partió para diseñar los fillos de los dos tipos de cortadores presentados está expuesto en la Fig.3.17 comprende un filo con un ángulo de ataque neutro (0°) que ejerce una fuerza de corte con una dirección y magnitud resultante de la suma vectorial de la Fuerza de Avance (FA) y del torque (TQ) de la máquina. La roca se fractura por compresión y corte creando una fractura que inicialmente está alineada con la fuerza de corte, pero a medida que se aleja del filo, está rota hacia el ángulo de fractura propio de la roca considerada. Finalmente, la fractura asciende hasta la superficie y el trozo de material se desprende. Luego este suele ser pulverizado y expulsado fuera de la zona de corte. A

continuación, se establecen las condiciones para definir la magnitud y dirección de la fuerza de corte aplicada en el modelo.

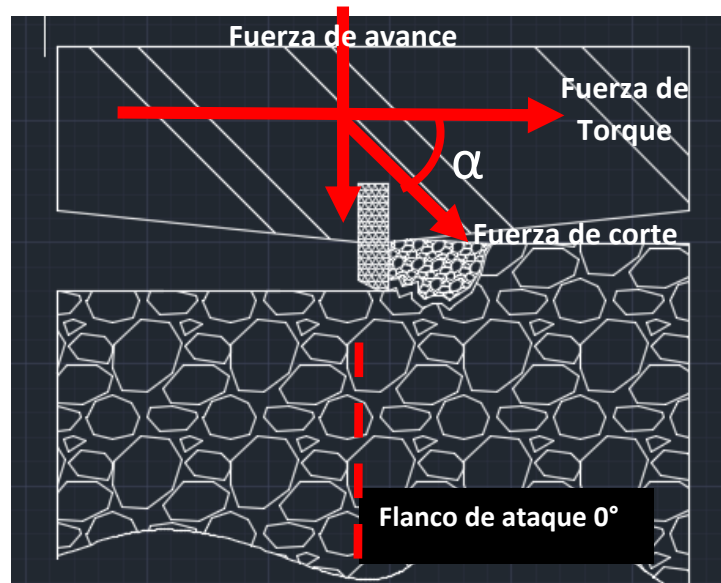


Fig. 3.17. Composición de fuerzas y forma de fractura del material para el modelo de los filos de los cortadores diseñados.

Se plantea que:

$$p_e = t_e \omega_e \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$p_s = t_s \omega_s \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\omega_e; \omega_s = 2 * \pi * \frac{n}{60s} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde p_e, p_s son las potencias [W] de entrada y salida al sistema, $\omega_e; \omega_s$ representa las velocidades angulares en [R/s] y t_e, t_s son los torques [N*m] de los ejes de entrada y salida de la caja. Además, se establece que la potencia de entrada a la caja sufre una disminución durante la transformación al de salida, considerando un 12% de pérdidas entre las 4 etapas de reducción, es decir que la potencia final es un 88% de la potencia de entrada.

$$p_s = p_e(100\% - 12\%) = p_e * 0.88 \quad \text{Ec. 3.4}$$

Se calculó:

Motor: 2.982 kW (4hp) a 3000 rpm.

Caja reductora: relación 160:1.

Pérdidas: 12% en las cuatro etapas (aproximadamente 3 % de pérdida por cada etapa)

$$t_s = p_s / \omega_s = (p_e * 0.88) / \omega_s \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$t_s = \frac{2982 \text{ W} - (0.12 * 2982 \text{ W})}{\frac{2 * 3.1415 * (3000/160) \text{ rpm}}{60 \text{ s}}} = 133.81 \text{ N*m} \quad \text{Ec. 3.6}$$

La broca tiene 65 mm de diámetro, por lo tanto, la fuerza de torque (f_t) aproximada en uno de los extremos del cortador será:

$$\frac{1336.7 \text{ Nm}}{0.0325 \text{ m}} = 41129 \text{ N} = 4196,8 \text{ kgf} = f_t \quad \text{Ec. 3.7}$$

La fuerza de avance neta (FA Neta) se calcula como:

$$F_E = A_e * P_e; F_R = A_r * P_r \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$F_{ANeta} = F_A - F_R \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde F_A Neta representa la resta entre la F_E (fuerza de entrada al cilindro en la parte de empuje) y F_R (fuerza de retención aplicada por restricción a la descarga del cilindro), A_e y A_r es el área [m] de entrada y retención respectivamente. A_r debe ser afectada por la disminución de áreas debido al vástago del cilindro y P_e y P_r [at] representan las presiones de entrada y retención del cilindro. Considerando estos datos se puede calcular que si:

Diámetro interior cilindro lado empuje = 0.0759 m

$A_e = 0.0058 \text{ m}^2$

$A_r = 0.004219 \text{ m}^2$ (27 % más chica que la superficie de empuje)

$P_e = 51.67 \text{ atm} = 523546.75 \text{ N/m}^2$

$P_r = 23.27 \text{ atm} = 2357832.75 \text{ N/m}^2$

$F_E = 30365.75 \text{ N}$ o 3094 kg.

$F_R = 13910.75 \text{ N}$

$F_A \text{ Neta} = 16455 \text{ N}$ o 1679 kg (28 atm de diferencia de presión)

Según Fig. 3.18 la Fuerza de corte (f_c) aplicada a la roca es la suma vectorial de:

$$\langle f_t \rangle + \langle F_{ANeta} \rangle = \langle f_c \rangle \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$\langle 41129 \text{ N} \rangle + \langle 16455 \text{ N} \rangle = \langle f_c \rangle \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$\langle 44298 \text{ N} \rangle = \langle f_c \rangle \quad \text{Ec. 3.12}$$

Por último, se puede calcular en ángulo α que indica la orientación de aplicación de la f_c :

$$\text{Sen } \alpha = 16455 \text{ N}/44298 \text{ N} = 23.58^\circ \quad \text{Ec. 3.13}$$

Los cuales representan aproximadamente 4500 kg de fuerza de corte que aplican los filos sobre la roca con una inclinación de 21.6° respecto del plano horizontal. Si bien el modelo de análisis básico consiste en la fractura con acuñamiento, se debe considerar que existe también una componente de fractura por indentación y desgaste por erosión y abrasión de la herramienta sobre la roca. La energía impresa a la herramienta será también utilizada para desgastar y triturar el material taladrado.

Evaluación del filo para cortador de WC

El deterioro del filo puede evaluarse de diferentes maneras, una de ellas es contrastar la modificación de la geometría producto del desgaste respecto de la geometría original o en estado nueva. Como se detalló en la introducción teórica, los cortadores de diamante (ya sea sintéticos o naturales) pierden las piezas cortadoras o el recubrimiento a medida que se van desgastando mediante un proceso de fricción, erosión y fractura dependiendo de la constitución del cortador. Esta pérdida de geometría original produce una modificación en el mecanismo de corte y en general hace que sea menos eficiente debido que se modifica la distribución de fuerzas respecto de los ángulos óptimos para fracturar la roca, se incrementa la superficie de contacto y el arrastre. También aumenta el rozamiento y la temperatura del corte, lo que produce una mayor tasa de ocurrencia de fenómenos de deterioro producto de procesos asociados a la difusión. Durante la ejecución de los ensayos se presentó el caso donde el filo de carburo de tungsteno se fracturó parcialmente y el cortador siguió taladrando en esa condición hasta la finalización del ensayo. Un análisis de estos resultados y su consecuencia en la calidad de terminación de la perforación se desarrollarán a continuación. Esta información será convalidada por la emisión acústica como parte de los resultados de la presente tesis.

Se clasificaron *dos (2) tipos* de filo. Filo en Buenas condiciones de corte (FB), y Filo Fracturado (FF). El esquema y la fotografía de la Fig.3.18 muestran el filo principal, flanco de ataque y descarga de la placa de CT que serán expuestas al proceso de corte de la roca. La misma tiene una medida nominal de 3 mm de espesor (Fig. 3.19 a). Sobre el borde de corte que forma el flanco de ataque y el filo principal se observan pequeñas irregularidades pertenecientes al proceso de fabricación pulvimetalúrgica de las placas. Estas imperfecciones son menores a 0.5 mm de espesor y están repartidas de forma homogénea

sobre el filo principal (Fig. 3.19 b). Finalmente, sobre esta superficie, se demarca una sección de descarga o destalonado dejando una zona máxima de aproximadamente 1 mm de espesor para el filo principal de corte y de más de 2 mm de descarga, que tiene por fin disminuir el rozamiento y atascamiento de la herramienta (Fig. 3.19 c). El filo en esta condición se considera como *Filo en Buen estado* (FB) ya que puede perforar dejando un agujero con buena terminación superficial y buenas tolerancias geométricas y dimensionales.

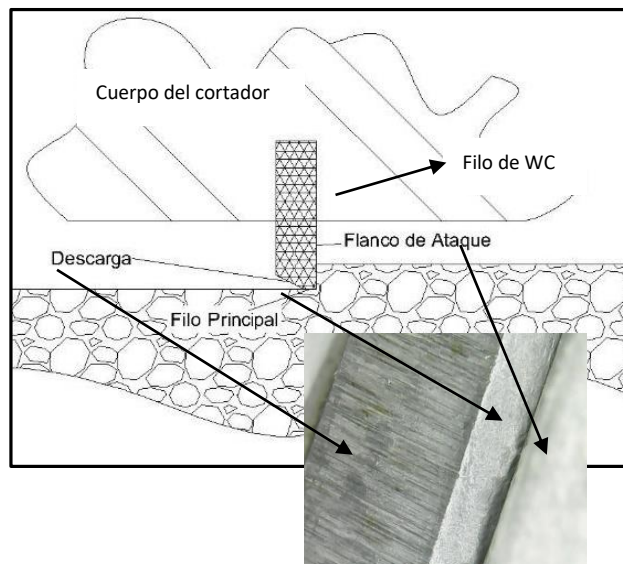


Fig. 3.18. Esquema de los filos de corte y micrografía del filo principal del cortador donde se observa el filo principal, flanco de ataque y descarga de la herramienta.

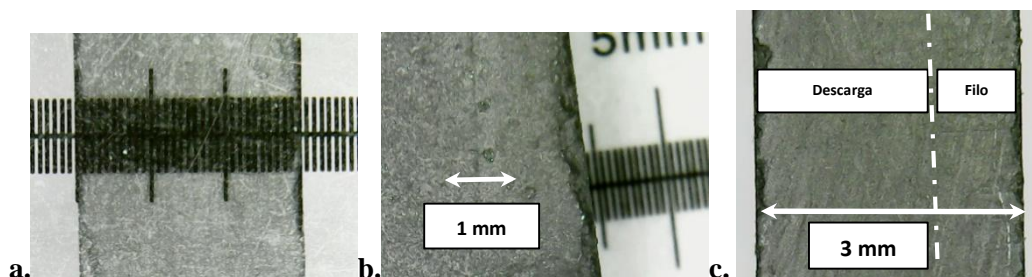


Fig. 3.19. Zoom óptico sobre placa de WC. Vista de filo principal. **a.** Ancho nominal 3mm. **b.** Aumento sobre borde de ataque (unión del flanco de ataque y filo principal), **c.** Esquema de afilado y generación de descarga o destalonado.

Luego de haber taladrado tres perforaciones con la misma broca sobre una probeta construida para calibración, se realizó una evaluación del filo, con el fin de evaluar y dimensionar la erosión producida durante el corte. Para tomar una medida del ancho de la zona del filo principal respecto de la zona de descarga, se aplicó una regla milimetrada transparente sobre el filo y se proyectó la luz de manera de resaltar por reflexión la zona pulida por el corte del

filo principal y la zona de la descarga de la herramienta. Las medidas son tomadas en tres diferentes lugares sobre el filo principal, partiendo del centro hacia los extremos (Fig. 3.20 y 3.21).

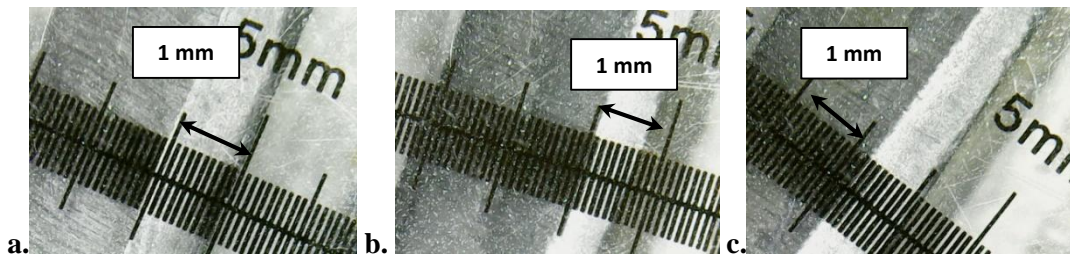


Fig. 3.20. Condición de FB sobre **Flanco 1**. Medición de espesor de filo principal. **a.** Zona Centro. **b.** Zona media. **c.** Zona de extremo del filo.

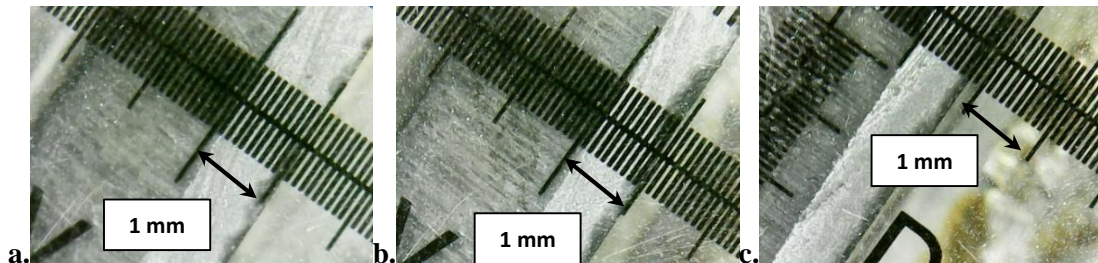


Fig. 3.21. Condición de FB sobre **Flanco 2**. Medición de espesor de filo principal. **a.** Zona centro. **b.** Zona media. **c.** Zona de extremo del filo.

Tabla 3.2. Medición de ancho para filo principal para broca de WC en estado FB luego de tres perforaciones.

	Zona Centro	Zona Media	Zona Periferica	Promedio
Filo 1	1.1 mm	0.6 mm	0.79 mm	0.83 mm
Filo 2	1 mm	0.8 mm	0.8 mm	0.86 mm

Ampliaciones con la lupa digital nos permiten observar pequeñas zonas erosionadas que se distribuyen de manera regular a lo largo del extremo del filo (Fig.3.21 a y b). La zona central del cortador se encuentra menos erosionada (Fig. 3.22 a y b). Esto se atribuye a que la periferia del cortador está sometido a una velocidad tangencial que disminuye a medida que nos acercamos al centro de la broca. El centro de la broca tiene velocidad tangencial igual a cero y trabaja más bien por indentación que por corte.

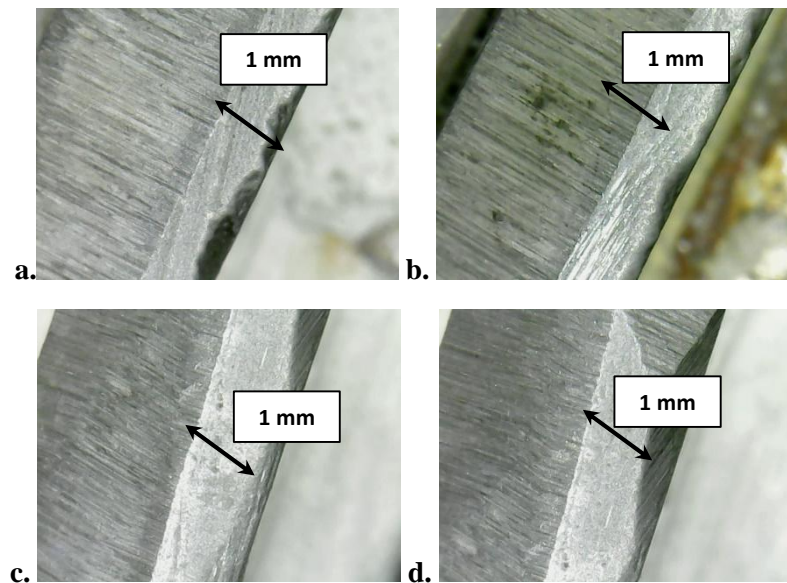


Fig. 3.22. Fotografías del filo principal donde se observa erosión en algunas zonas de la periferia (a y b) y del filo central donde debido a la baja velocidad de corte no hay signos visibles de erosión (c y d)

Luego de estas tres perforaciones. no se presentó una modificación mayor en la geometría del cortador, el leve deterioro mostrado por la broca de WC, luego de ser ensayada en una probeta de prueba, permite establecer que la misma se encuentra en buenas condiciones operativas y que no se producen importantes modificaciones en el proceso de corte. *Esta condición se establece con el nombre de filo bueno (FB).*

Cortador dañado o filo fracturado

En algunos ensayos se presentó la fractura parcial del filo en la zona periférica del cortador dejando únicamente el filo central de corte y el cuerpo endurecido de la broca para taladrar (Fig. 3.23), esta condición se denomina *cortador con Filo Fracturado (FF)*. En estos casos, cuando se detectó la fractura del cortador, posteriormente se prosiguió con la perforación en esta condición desfavorable de trabajo, hasta finalizar el agujereado. Los parámetros que pueden influir en la aparición del FF pueden ser debidos a una incorrecta relación entre rpm, avance y propiedades del material taladrado, atascamiento por falta de lubricación, atascamiento mecánico por movimiento de la broca, etc. Estas fracturas de filo se evidenciaron principalmente en la roca caliza, posteriormente en la pizarra, no evidenciándose ninguna fractura en la arenisca. La roca caliza en comparación con roca arenisca tiene un módulo de elasticidad mayor, es más compacta, de grano más fino y su taladrabilidad es inferior. Un cuidadoso ajuste de la velocidad de avance respecto de las rpm fue necesario para disminuir la rotura del filo sobre este tipo de roca. A posteriori se exponen

los resultados de la EA relacionada con el proceso de fractura de la placa de WC y la perforación en condición FF, diferenciándose de la condición FB.

Evaluación de la calidad de la terminación de la perforación

La Fig. 3.24 muestra una perforación realizada con una broca en estado FB. La Fig. 3.24 a es una toma general del orificio de perforación donde se observa una terminación uniforme, con bordes regulares y geoméricamente circular, además de un escalón en el primer cuarto de perforación. Una focalización en el fondo del agujero (Fig. 3.24 b) revela una terminación muy prolija y pareja con bordes definidos debido al correcto estado de filo de la broca.



Fig. 3.23. Fotografías de filo fracturado (FF) en diferentes ensayos, donde se observa la fractura del filo en la zona periférica del cortador, quedando solamente la parte central del mismo **a.** **b.** Fractura de la broca en probetas de calibración. **c.** Ampliación de zona de fractura.

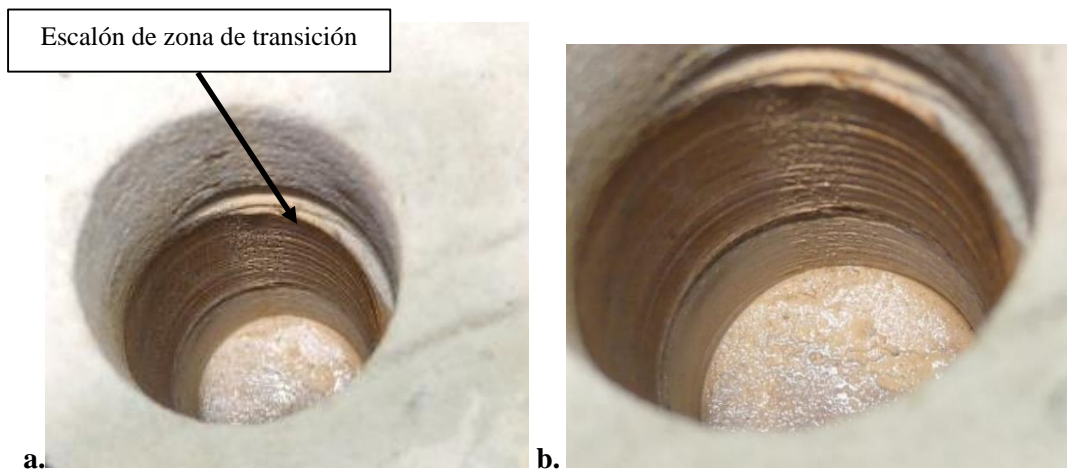


Fig. 3.24. Perforación con broca en estado de FB. **a.** Foco en parte superior. **b.** Foco en fondo de agujero

El escalón observable en esta perforación corresponde con una modificación del centro de la perforación durante el cambio de estrato de cemento a roca. Esto se debe a que la broca es un elemento elástico que puede ser direccionado, como sucede en la perforación de pozos horizontales. En este caso, este efecto, se traduce en la desviación del centro de la broca

debido al cambio de propiedades mecánicas entre los materiales que están siendo perforados. En general la broca tiende a ser desviada por el material más duro hacia el material más blando, este hecho es particularmente conocido a la hora de taladrar metales de diferente dureza. En el caso de esta probeta donde los estratos están colocados de manera perpendicular al sentido de perforación, la broca buscó un nuevo centro dentro del material más duro. Una vez *encontrado* este centro, la misma sigue perforando en esa dirección. Durante el proceso de *encontrar* un centro de perforación, se observa un comportamiento variable de la dinámica de corte hacia estados menos estables de proceso. Esta zona de la probeta se denomina *zona de transición* de interfaces y en general muestra una variación apreciable de la EA respecto del resto de la perforación en estados estables. La Fig. 3.25 muestra una perforación realizada sobre la probeta de calibración con dos capas de roca caliza. En esta perforación ocurrió una fractura del filo a mitad de la primera capa de roca caliza (Fig. 3.25a). Posteriormente, la perforación se desarrolló en condición de FF mostrando una superficie y calidad de terminación muy irregular hasta el fondo del agujero (Fig. 3.25b).



Fig. 3.25. Perforación en condición FF donde se observa una calidad irregular de terminación. **a.** Cambio de forma de corte en lugar de la fractura del filo. **b.** Foco en la parte inferior del pozo luego de la fractura.

La Fig. 3.26 pertenece a la perforación de una probeta combinada de una capa de roca arenisca y una capa de roca caliza. En este caso la fractura del filo se produjo en la parte final de la perforación, cuando se estaba taladrando la capa número dos (2) de roca Caliza.

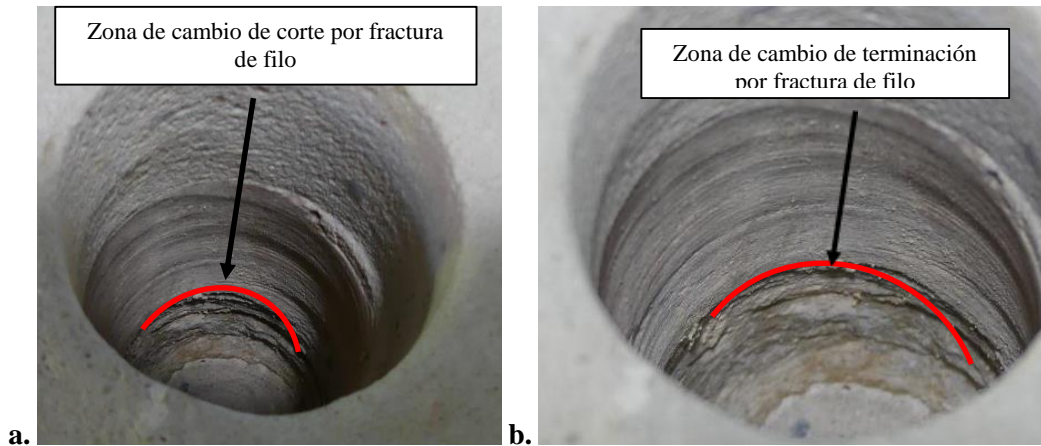
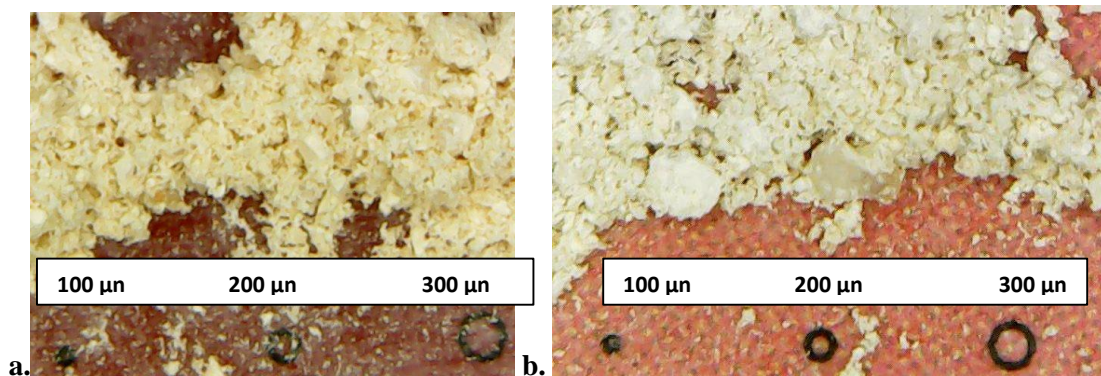


Fig. 3.26. Perforación con fractura de filo en la segunda capa de material geológico **a.** Parte superior de la perforación con foco en estado FB. **b.** Zona de cambio de mecánica de corte y comienzo de perforación en condición FF.

Luego de la fractura se observa la clara diferencia en la calidad de terminación entre ambas condiciones de corte en el fondo de la perforación. Estos eventos también pudieron ser monitoreados por la EA durante la realización de estos ensayos.

Caracterización de los residuos de corte de Arenisca y Caliza para cortador de WC

Durante los ensayos de perforación se realizó la extracción de muestras de material cortado, para evaluar la homogeneidad en una condición de corte de FB, para los tipos de rocas Arenisca y Caliza respectivamente. Las muestras se recolectaron en húmedo, donde el material una vez decantado, fue desecado y pulverizado para su análisis (Fig. 3.27). Los resultados muestran que existe un proceso de molienda del material a tamaños similares en ambas rocas para el caso del cortador de WC. Las micrografías en general muestran partículas de diámetros inferiores a 300 μm de forma regular.



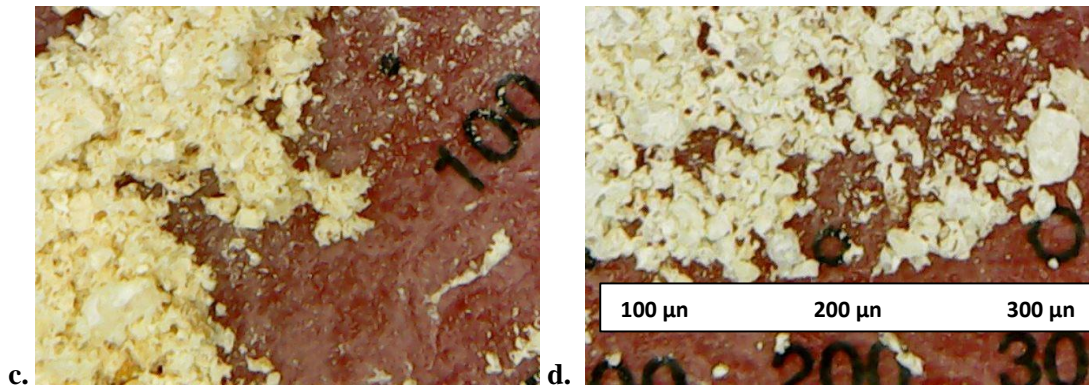


Fig. 3.27. Material cortado mediante herramienta de carburo de tungstenos en rocas.

a y c. Arenisca. **b y d.** Caliza.

Esto indica que parte de la EA recibida puede ser asociada a este proceso de molienda posterior al corte. Este mecanismo de molienda se da en ambas rocas con tamaños de grano diferentes y por lo tanto puede considerarse como una componente de emisión de tipo continua dentro del espectro de la EA. Otras señales pertenecientes al proceso de fractura, fricción, indentación del centro del cortador, y modulaciones de menor frecuencia asociados al sistema de perforación están conjuntamente en la señal que se recibe.

3.2.5. Sistema de accionamiento de empuje hidráulico, soporte de fuerzas de corte e inyección de agua de perforación

Consideradas las necesidades del cortador respecto de la potencia, carga, velocidad de avance teórica, etc., se procedió con el diseño y construcción del sistema de fuerza de avance y movimiento de la herramienta. Este sistema que proporciona la FA al taladro consiste en un circuito hidráulico compuesto por una unidad hidráulica de marca Vickers (Fig. 3.28a) con un motor de 1 hp de potencia, una bomba de 120 bar de presión y dos válvulas de comando, una de tres vías con la cual se direcciona el sentido de la perforadora (sube-baja) y una válvula diferencial que permite regular la presión de empuje según el valor de voltaje con la que se la alimente, donde 0 V corresponde a la posición completamente abierta y 12 V corresponde a la válvula totalmente cerrada. Adicionalmente al circuito de retorno se le incorporó una válvula reguladora de caudal para limitar la velocidad de avance del sistema. Para registrar la presión en las cámaras de admisión y retención del cilindro se colocaron dos sensores de tipo piezoeléctrico (Fig. 3.28 b) marca TECSIS de 0-250 bar y 0-600 bar con 4-20 mA de salida, respectivamente. Estas señales debieron acondicionarse a un rango de 0-10 V como requisito del equipo de EA con el que fueron adquiridas como parámetro externo, en simultáneo a la EA, previa calibración. Esta instrumentación es necesaria debido a que

brinda información importante de la Fuerza de Avance (FA) y la Fuerza de Retención (FR) del sistema en todo momento. También permite analizar el sistema en una condición de equilibrio dinámico entre la FA y FR, el cual establece un avance a velocidad constante del cilindro. Esto también permite limitar la velocidad máxima del cilindro para que no se acelere de forma súbita ante el cambio de propiedades mecánicas del material perforado. A futuro también se puede utilizar la información correspondiente a la diferencia entre estas magnitudes que corresponde a la fuerza neta que está absorbiendo la roca para ser taladrada. Para transformar la presión hidráulica en movimiento de avance se instaló un cilindro hidráulico en desuso que fue reconstituido, cambiándole los sellos y conexiones hidráulicas (Fig. 5.28 c). Este cilindro tiene un vástago de 45 mm de diámetro con un recorrido de 1100 mm y el diámetro en la cámara de admisión es de aproximadamente 85 mm.

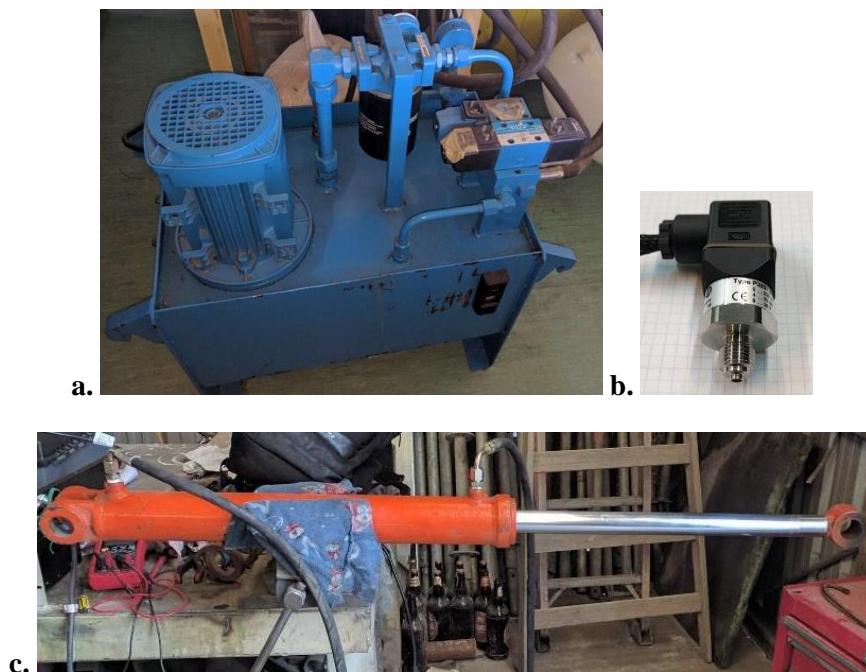


Fig. 5.28 a. Centralina hidráulica de potencia (prestada por el laboratorio del ICES -CNEA). **b.** Transductor de presión piezoeléctrico. **c.** Prueba de cilindro hidráulico luego de la reparación.

Para soportar la fuerza radial y centrar la broca se colocó en el extremo de la placa de soporte un conjunto autocentrante con rodamiento modelo UCP 212 de la marca NTN/FK y para absorber la FA o de penetración del sistema se seleccionó un rodamiento de rodillos cónicos marca SKF modelo 30311. La instalación de este rodamiento se realizó en la misma unidad que el sistema de inyección de líquido de refrigeración. Esto requirió diseñar y construir la unidad con el alojamiento correspondiente al rodamiento y una tapa brida con la cual se

regula el tiraje de apriete del rodamiento. También debieron ser construidos los alojamientos adicionales para los sellos hidráulicos en el cuerpo de la unidad. Esta pieza realiza múltiples tareas, la primera de ellas es la transferencia de la carga de la FA desde el sistema cilindro hidráulico - placa base hacia la broca de corte y la segunda es la inyección de fluido de perforación hacia el centro del cuerpo de la broca a medida que se realiza la perforación. Una de las necesidades de la mecánica de perforación es retirar el material cortado para que no bloquee el mecanismo de corte. Esto se puede realizar mediante la instalación de un helicoides en el cuerpo de la broca que a medida que al girar realiza la extracción del material cortado. Otra alternativa es mediante la inyección de algún fluido (aire, agua, espuma, otros) en el extremo de la perforación que permita extraer, empujando o arrastrando, el material cortado hacia la superficie del agujero taladrado. Para estos ensayos, se seleccionó el método de extracción de material mediante la inyección de agua que ingresa a través de la unidad de soporte de la FA y pasa por el cuerpo cilíndrico de la broca siendo expelida por orificios en la punta del cortador, justo delante de los dientes cortadores. En la Fig. 3.29 se presenta un croquis del diseño con AutoCAD, observándose el alojamiento para el rodamiento cónico a rodillos, encargado de absorber la mayor cantidad de la FA y el diseño del sistema de inyección de agua con dos retenes (superior e inferior) para crear un espacio confinado. Posteriormente, se agregaron perforaciones en el cuerpo de la broca para permitir el ingreso de líquido y su eyección por la punta. Los detalles constructivos específicos de diseño se detallan en el anexo A.

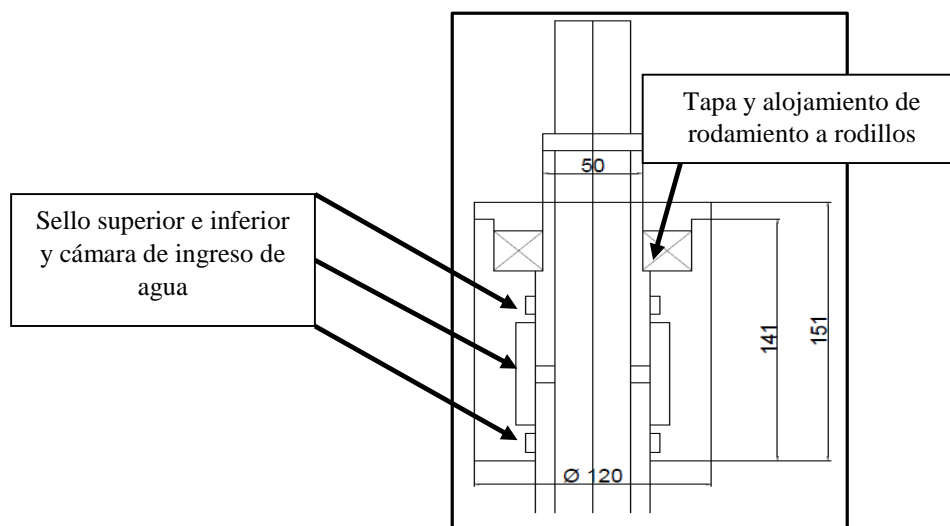


Fig. 3.29. Croquis del dispositivo de soporte de la FA y sistema de inyección de fluido de perforación.

3.2.6. Guía de onda hidráulica para instrumentación de una herramienta rotante

Una parte muy importante del presente esquema experimental es la instrumentación de la técnica de EA para tener una buena claridad y calidad de información. Esto comprende, entre otras cosas, captar las ondas elásticas donde sea más representativo del evento o proceso que se desea observar. Algunas veces es posible instrumentar el material a ser procesado, otras veces (para evaluar la condición de la herramienta) es preferible instrumentar directamente la herramienta. En general la instrumentación de la herramienta brinda un buen nivel de detalle del proceso que se desea analizar ya que es este elemento el que realiza en trabajo de corte, deformación, desbaste, fractura, etc. Cuando la herramienta se encuentra estática es relativamente fácil de realizar su instrumentación y si la misma es rotante usualmente se suele instrumentar la probeta que se encuentra fija durante el proceso. Esto se puede verificar en los trabajos experimentales aplicados al mecanizado mediante torneado (herramienta fija) o perforado (probeta fija) de metales y materiales compuestos: Dornfeld et al (1980), Kannatey-Asibu, Jr. et al (1980), Saini et al (1996), Grabec y Leskovar (1977), Jemielniak et al (1997), Everson et al (1999), Ravishankar et al (2000), Mascaro et al (2005). Debido a la naturaleza del proceso de taladrado, la herramienta en general está rotando cuando perfora y su extremo se encuentra fuera del alcance del operador. En estos casos, las soluciones tecnológicas para el monitoreo de alguna característica del proceso permiten utilizar métodos indirectos, como sistemas ópticos, sensores acústicos acoplados en aire, sensores con contactos deslizantes, sistemas de medición solidario a la rotación del equipo de manera que adquiera y guarde la información para luego extraerla y analizarla u otros tipos de soluciones. Cada una de estas metodologías tiene sus ventajas y desventajas en cuanto al rango de aplicación en frecuencia, robustez, facilidad de implementación, etc. Con el fin de poder monitorear el proceso de perforación de manera efectiva y sencilla, en el presente trabajo se desarrolló una idea surgida del monitoreo de ondas elásticas a través de fluidos líquidos. Estos, en general los líquidos, son buenos acoplantes gracias a que tienen una alta impedancia acústica y hacen buen contacto entre superficies, pudiendo transmitir gran parte de la energía elástica de un medio a otro. El desarrollo del presente dispositivo permitió instrumentar directamente la broca rotante de manera sencilla y confiable. El concepto de diseño implica la creación de un anillo de fluido estable que auspicie de acoplante dinámico entre el sensor y la broca y permita el movimiento de rotación de esta última. En la Fig. 3.30 se esquematiza en un croquis de la guía de onda y el principio básico de acople y funcionamiento del sistema.

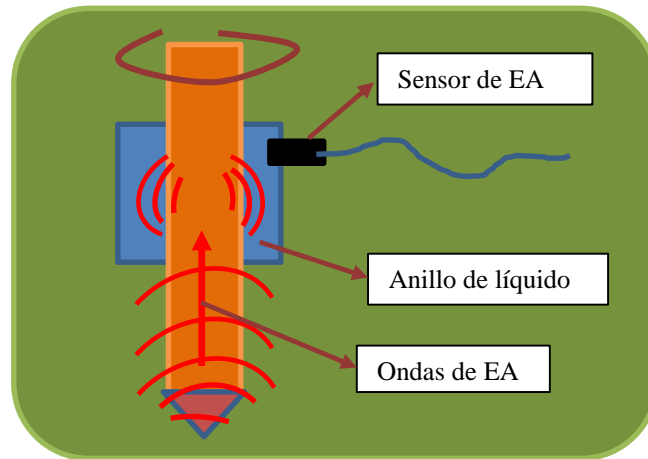


Fig. 3.30. Croquis principio de funcionamiento de la guía de onda hidráulica para monitoreo de la herramienta rotante, donde la emisión sube desde el extremo del cortador a través del cuerpo hasta el anillo hidráulico y posteriormente llega al sensor inmerso en él.

Las ondas ultrasónicas provenientes del proceso de corte, extracción de material, inyección de líquido y demás fenómenos mecánicos relacionados con el proceso de corte son conducidos a través de cuerpo metálico de la broca hacia el anillo líquido, y luego estas pasan al sensor piezoeléctrico que se encuentra inmerso en este. En general, se considera que las ondas transmitidas por el cuerpo de la broca son del tipo de ondas de Lamb. A una frecuencia típica de “escucha” de 150 kHz para metales, la longitud de la onda resultante es de aproximadamente 36 mm, cuando la velocidad de propagación se considera de 5500 m/s. El espesor del cuerpo metálico de la broca es de 12 mm. Tanto la longitud de la onda como el espesor de la pared del tubo están dentro del mismo orden de magnitud, en esta condición el modo de propagación de las ondas de EA es el de Lamb (con modos simétricos y antisimétricos). Posteriormente cuando estas ondas ingresan al líquido se convierten en ondas tipo P que finalmente llegarán al sensor piezoeléctrico. Los modos simétricos y antisimétricos de Lamb se propagan por el tubo a diferentes velocidades según la frecuencia que se considere.

Estos modos disipan diferente cantidad de energía al medio en función del sentido de la oscilación de cada modo. Los modos antisimétricos, que contienen oscilaciones perpendiculares a la pared del tubo son los que transmitirán mayor cantidad de energía al líquido del anillo hidráulico. Una vez que estas ondas pasan al líquido, las únicas componentes que pueden ser transmitidas por el líquido son ondas tipo P, longitudinales o

de presión. De esta manera el líquido produce un filtrado o modificación de las señales de forma natural. Los planos esquemáticos del presente sistema se encuentran en anexo A.

3.2.7. Ensamble del sistema y primeras pruebas

En las Fig. 3.31 a y b se muestran fotografías (lateral y frontal) del equipo durante el proceso de ensamble del sistema. Sobre estas figuras se detallan los componentes del taladro que figuran en la Tabla.3.3. En esta etapa se comenzó con las pruebas de funcionamiento de todos los dispositivos, la alimentación del motor eléctrico, el funcionamiento del variador de velocidad, la alineación entre el motor, la caja reductora y la broca, el comportamiento a diferentes velocidades de rotación, el funcionamiento de la guía de ondas hidráulica, la inyección de agua, el sistema de empuje de cilindro hidráulico y otros sistemas.

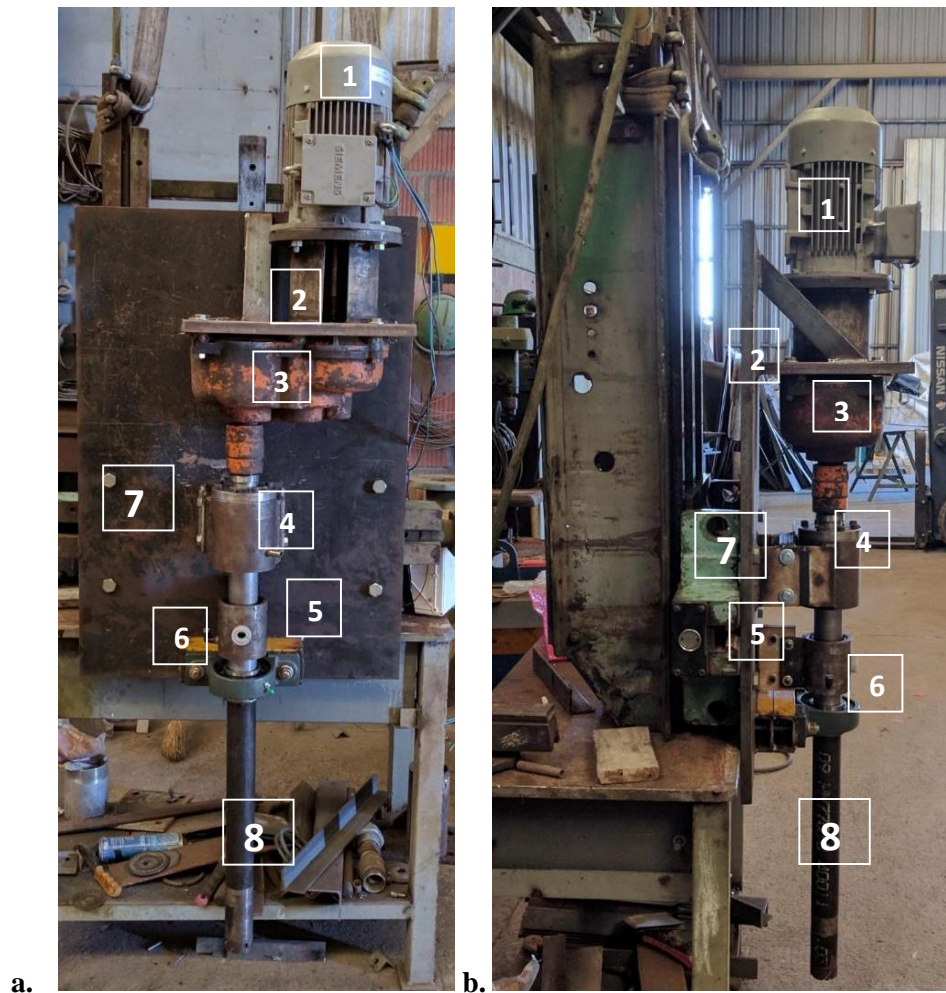


Fig. 3.31. a. Vista frontal y **b.** vista lateral de los componentes del taladro en proceso de montaje.

Tabla 3.3 Detalle de componentes descritos en Fig. 3.31.

<i>Nro Componente</i>	<i>Descripción</i>
1	Motor de 4 HP. 3x380 V
2	Placa de soporte y lumbrera de acople motor-reductor
3	Caja reductor 1:160 entrada y salida paralela
4	Dispositivo de soporte de FA e inyección de agua de perforación
5	Guía de ondas hidráulica
6	Soporte rodamiento radial
7	Carro de deslizamiento y placa base
8	Cuerpo cilíndrico de la broca

3.3. Construcción de las probetas de ensayo

Las probetas para ensayar los materiales geológicos fueron armadas de manera de obtener una unidad multicapa de dos o tres elementos constitutivos diferentes dispuestos en *capas o estratos* como muestra la Fig. 3.32, conformadas dentro de un contenedor rectangular de material plástico. Las dimensiones del contenedor son: 320 mm x 320 mm x 400 mm de profundidad. El material geológico que se coloca en su interior debe ser tallado según estas medidas aproximadas y perforado para poder ser atravesado por una guía de ondas metálica en la que se conectará uno de los canales de EA que se utilizará como una señal de comparación (Fig. 3.33). Así preparados los estratos rocosos, deben ser cementados dentro del contenedor. Como elemento de consolidación se utilizó una mezcla de cemento, cal y arena en una proporción 0.8:0.2:3. Esta relación mostró adecuadas propiedades de elasticidad y resistencia para mantener las piezas en su lugar con propiedades geomecánicas diferentes de los otros materiales geológicos utilizados para conformar la probeta. Las propiedades mecánicas de los materiales influyen de manera importante sobre el proceso de corte. En este caso, la dureza del cemento que fue regulada con el porcentaje de cal, la forma de consolidación, tamaño de grano utilizado, etc., modifican el comportamiento ante la fractura (mecánicamente hablando) y por lo tanto es posible que modifique la EA que emana del proceso de corte y sea fácil de discriminar respecto de los demás elementos geológicos. Una vez consolidadas las probetas completas, se dejaron curar un mínimo de 35 días antes de ser ensayadas, de manera de asegurar una homogeneidad posterior al curado y obtener propiedades mecánicas semejantes en todas las probetas.

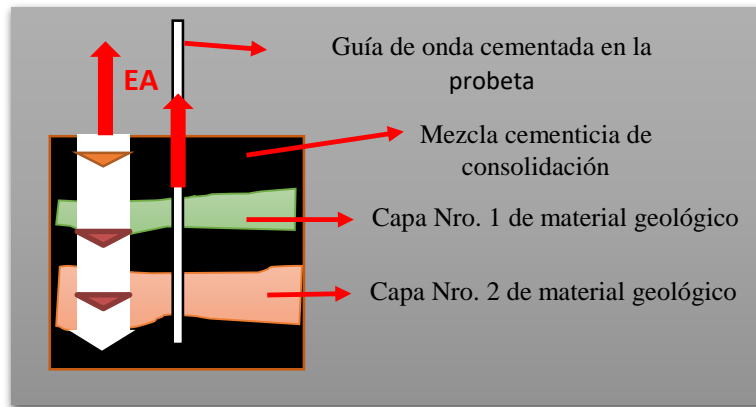


Fig. 3.32. Esquema de probeta multicapa de tres componentes con guía de onda.

Cada probeta realizada es única desde el punto de vista constructivo debido a las variaciones en espesor y geometría de los estratos (Fig. 3.34), y desde el punto de vista del material, debido a que la composición de las rocas utilizadas es naturalmente no homogénea, lo que produce diferencias de propiedades mecánicas dentro de un mismo trozo de material.

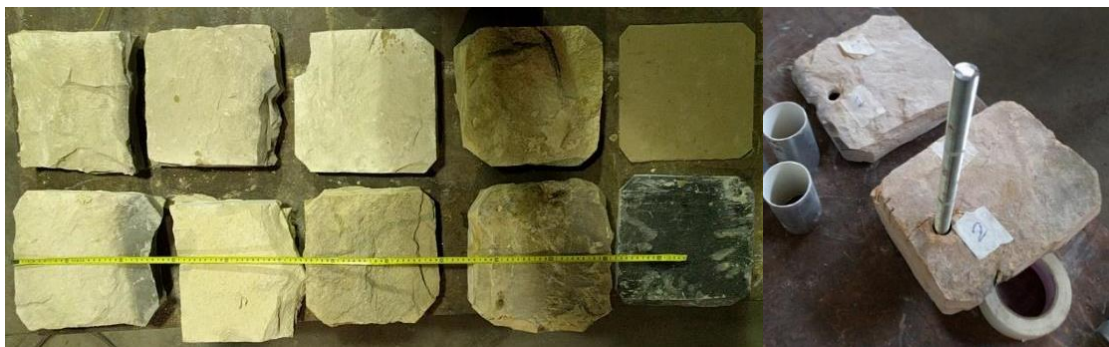
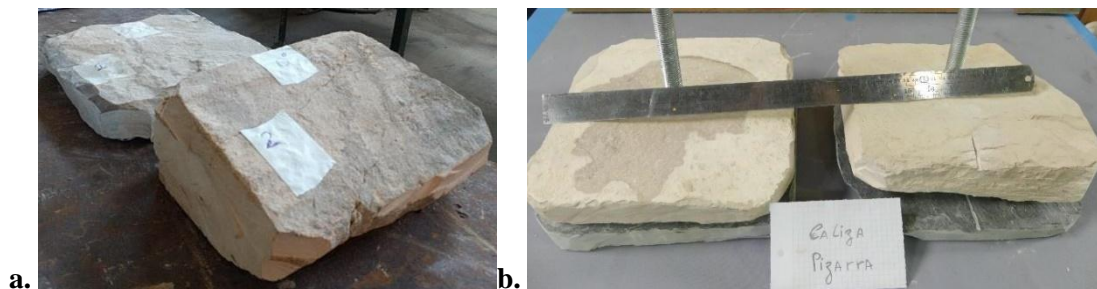


Fig. 3.33. Rocas talladas para conformar la probeta y colocación de la guía de ondas de referencia.

Es importante entonces detallar de manera precisa la construcción de cada una de las probetas realizadas y conciliar posteriormente la información de la EA y los parámetros exteriores con la composición y posición de cada uno de los estratos.



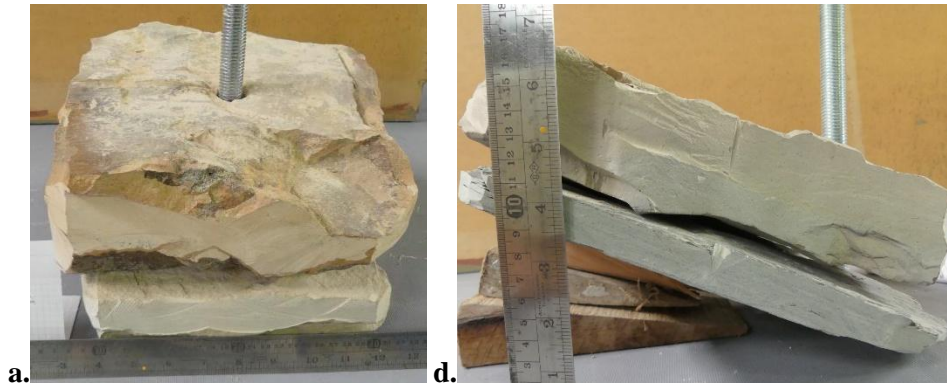


Fig. 3.34 **a.** Vista lateral donde se aprecia la diferencia de espesor entre la roca arenisca y la caliza. **b.** Vista frontal de caliza y pizarra antes de ser cementadas con la guía de ondas ya colocada. **c.** Probeta de arenisca caliza antes de ser cementada. **d.** Estratos de roca caliza y pizarra antes de ser cementada con la inclinación marcada dentro de la probeta.

El objetivo de esta constitución no homogénea plantea serios desafíos a la hora de analizar la información de cada uno de los ensayos, pero, por otro lado, brinda un mayor grado de semejanza con la realidad ya que la disposición y composición dentro de estas rocas en la corteza terrestre es aún más compleja. Estos diferentes factores modifican la EA del proceso de corte, cada tipo de roca requiere diferente energía para poder ser atravesadas y por lo tanto la EA asociada a cada uno de los procesos de corte debería sufrir una modificación. La diferencia de propiedades mecánicas del material geológico se debe a múltiples factores como su origen, forma de consolidación, granulometría y textura entre otras cosas. El campo de la identificación y clasificación de rocas es una materia compleja que excede por lejos el alcance de la presente tesis, más a continuación se brindará información básica según la cual se realizó una clasificación visual o “de campo” de las muestras utilizadas para este estudio. En la introducción teórica también se presentó una descripción general de los tipos de rocas existentes (omitiendo las rocas Ígneas por economía de espacio y porque no fueron utilizadas en el presente trabajo). Esta información ayuda a comprender la forma en que puede fracturar, la relación con los tamaños de granos, la compactación y otras características que definen su comportamiento mecánico.

3.3.1. Clasificación Empírica del material geológico seleccionado para perforación

En base a un reconocimiento mediante la metodología sugerida en “*Field Guide to Rocks and minerals, National Audubon Society, Chanticleer Press, Ed. Nro 13, 2016*” se realizó una clasificación de las rocas utilizadas. Esta metodología es básica desde el punto de vista geológico o mineralográfico, pero sirvió para determinar el ambiente y la forma de gestación,

en donde estos materiales fueron creados, consecuentemente moldeando en gran medida sus características ante la fractura y perforación. Las bases de la metodología son la comparación y análisis visual de los materiales constituyentes, dureza en escala Mohs, forma típica de fractura y otras características adicionales. A continuación, se definen los tipos de rocas utilizados y se brinda una pequeña reseña de cada tipo de roca.

Roca Sedimentaria tipo Arenisca

El material geológico llamado Arenisca y comercialmente designado como *Roca Mendoza* (Fig. 3.35), tiene un color naranja –marrón pálido. Clasifica como material no denso, ya que los granos se pueden apreciar a ojo desnudo o con lupa de mano y se observan que estos clastos están consolidados con algún tipo de elemento cementicio. La textura de fractura es rugosa y puede ser rayada con un cuchillo o lama de corte, indicando y muestra dureza variable entre 5 ½ a 7 Mohs. Los granos se observan más o menos equiaxiales y se alcanza a distinguir una estratificación gruesa como la mostrada en la Fig. 3.35c. En base a lo anterior este material geológico podría ser clasificado como roca sedimentaria del tipo Arenisca. Las areniscas son rocas sedimentarias de grano regular, con tamaños que pueden variar de 0.05 – 2 mm de diámetro. Estos se unen por compactación en la presencia de arcilla o por cementación de sílica, carbonatos, arcilla u óxidos de hierro. Las areniscas presentan estratificación, que puede variar desde fina a gruesa. También pueden tener laminación cruzada y marcas de ondulación. Algunas areniscas también presentan contenido fósil. Su color es extremadamente variable, dependiendo en primera medida del color y la cantidad del material cementicio y luego del mineral del cual se componen sus granos. Los colores claros generalmente prevalecen cuando la composición del elemento de consolidación es calcita o cuarzo, en cambio la presencia de Limonita y Hematita, que son variedades de óxidos de hierro, brindan colores rojos, beige u ocre y marrón. Cantidades apreciables de Glauconita también causan tonalidades verdes en estas rocas. La composición dominante de los clastos de estas rocas es de mineral de cuarzo, de forma redondeada y a veces angular. Cuando contienen suficiente cantidad de feldespatos, son llamadas rocas tipo Arcosa. Luego Granate, Magnetita, Turmalina, Hornblenda, Mica, y Zircón pueden estar presentes en pequeñas cantidades. Como agentes de cementación comunes se pueden encontrar Sílica, Carbonatos (calcita, dolomita, siderita), arcilla, y óxidos de hierro. Las areniscas tienen una textura rugosa que se debe a que generalmente tienden a fracturarse a través del cemento de unión, alrededor de los granos detríticos que la conforman. Las areniscas que se encuentran a gran profundidad dentro de la corteza terrestre forman los principales reservorios de

petróleo. Cerca de la superficie, las areniscas más porosas y permeables constituyen importantes acuíferos y reservorios de agua subterránea. Las variedades de areniscas se distinguen comúnmente de acuerdo al tipo de material de cementación y los minerales que contienen. Ejemplos de estas son: Areniscas calcáreas, Areniscas arcillosas, Areniscas ferruginosa, Areniscas silicea, Areniscas micácea, etc.

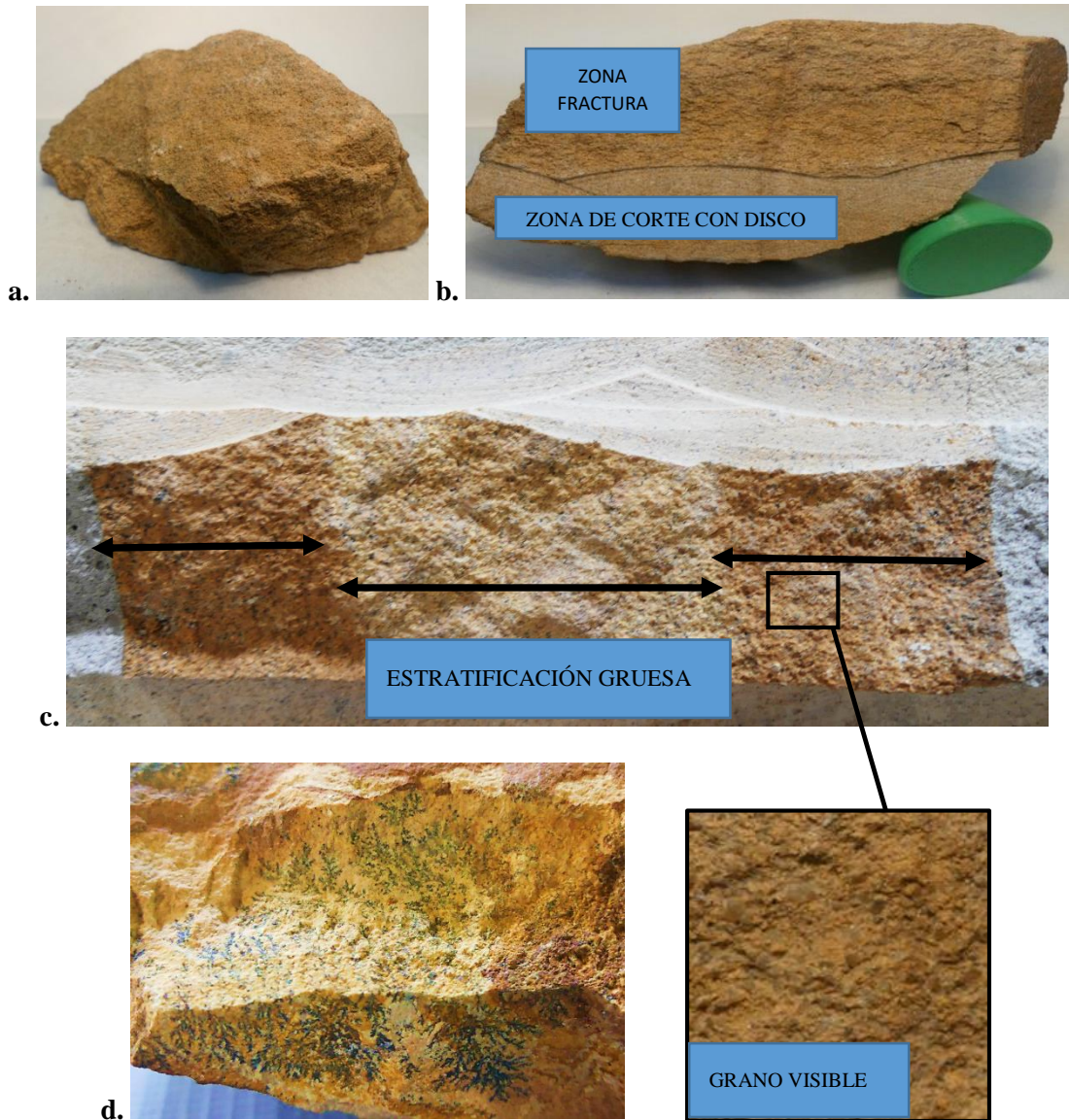


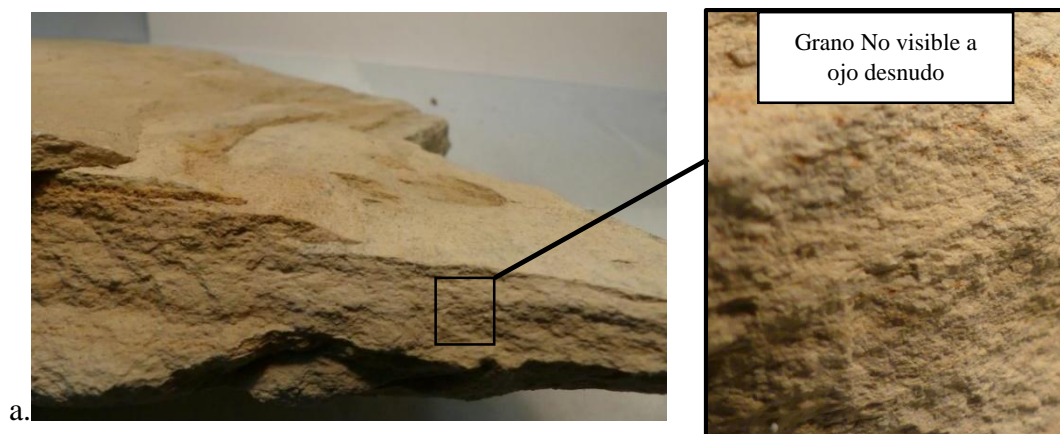
Fig. 3.35. **a.** Vista de un trozo de la Arenisca seleccionada. **b.** Detalle de la parte cortada con disco y posteriormente, ampliación donde se visualiza su fractura rugosa. **c.** Muestra de estratificación gruesa. **d.** Marcas negras y con forma de planta, evidencia la presencia de algunos restos fósiles.

Cuando el cemento aunante, así como el material detrítico es cuarzo, resulta en una roca dura y cristalina que se fractura a través de los granos en vez de alrededor de ellos. Este tipo de

arenisca no tiene porosidad y es llamada cuarcita u ortocuarcita. Estos dos tipos de cuarcitas son difíciles de identificar sin realizar una examinación detallada con microscopio o un conocimiento detallado del terreno en cual se encuentran. Otra variedad de arenisca llamada arenisca impura o sucia está compuesta por fragmentos redondeados o angulares de Shale, pizarra, granito, basalto etc. en adición a los granos de cuarzo y feldespato. Su color es gris, y a veces gris verdoso y negro. Desde un punto de vista tecnológico, este tipo de roca se encuentra frecuentemente en yacimientos de petróleo convencionales y no convencionales lo que hace que cobre importancia a la hora de caracterizar sus propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, fisibilidad, forma de fractura, porosidad, taladrabilidad, y en el caso del presente estudio la forma y características de la EA producida por esta durante el proceso de taladrado.

Roca Sedimentaria tipo Caliza

El material geológico tipo Caliza y comercialmente denominado *Roca Neuquén* (Fig. 3.36) es una roca sedimentaria con coloración blanca - pálida. Se observa que este material es denso debido a que es imposible distinguir los granos que la componen (Fig. 3.36a). Su textura de fractura es finamente rugosa y se puede apreciar que la misma se produce dejando lascas que se desprenden por planos de fractura paralelos a las capas estratificadas. La estratificación que se observa es muy fina con cambios de coloración en el mismo sentido (Fig. 3.36b). También se observan puntos de coloración más oscuros pertenecientes a material biológico (Fig. 3.36c). Su dureza es aproximadamente entre 3 a 4 Mohs debido a que se puede rayar fácilmente con una hoja de corte. En base a lo anterior se llegó a la estimación que la presente roca se trata de una caliza Biogénica. Este tipo de roca al igual que la roca Arenisca es de origen sedimentario.



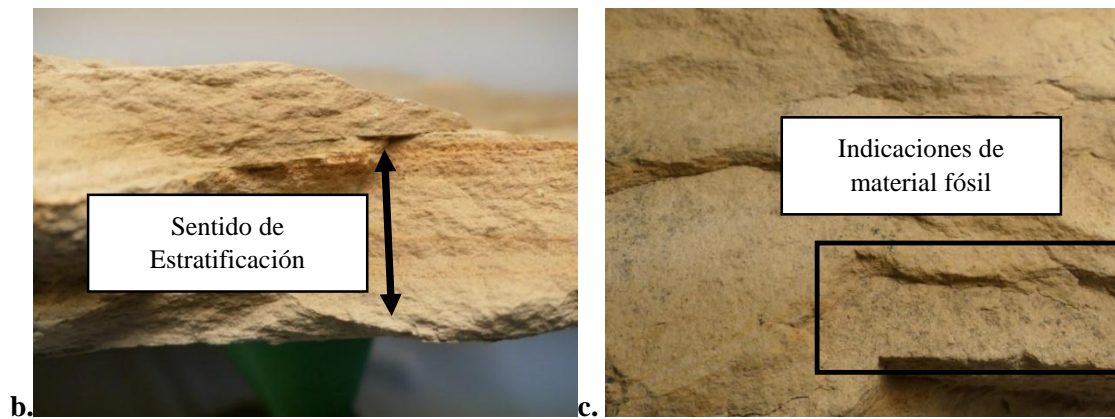


Fig. 3.36. a. Trozo de caliza donde se aprecia la separación de capas paralelas, las cuales se depositan en sentido perpendiculares a la estratificación. **b.** Sentido de estratificación y variación de colores entre diferentes capas. **c.** Leve indicación de contenido de material fosilizado.

En general estas rocas son densas, pudiendo ser finamente granulares en algunos casos y esencialmente no clásticas. Frecuentemente son tan densas que únicamente pueden ser estudiadas mediante el uso de un microscopio. En algunos casos de calizas minerales, se presentan granos que son lo suficientemente grandes para ser vistos a ojo desnudo, no siendo este el caso. La estructura de las calizas se conforma por estratificación, en la cuales se pueden identificar capas que van desde algunos centímetros hasta más de 30 cm de espesor. Algunas variedades de calizas muy densas se fracturan en forma de concha y otras paralelas al sentido de estratificación. Las calizas también pueden aparecer en varias formas como resultado de su fácil solubilidad y subsecuente precipitación en lugares como fracturas y cuevas submarinas. Estalactitas y estalagmitas, fracturas rellenas, y esculturas cristalinas en surgentes de agua caliente y géiseres son ejemplos de estas rocas precipitadas a partir de una solución líquida.

El origen de las calizas puede ser detrítica, química o mediante la acumulación de sedimentos biogénicos de una vasta cantidad de fósiles, siendo estas últimas las más frecuentes y muy utilizadas para propósitos estructurales. También existen calizas con estructura Oolíticas en muchos depósitos químicos. Los colores usuales de estas rocas van desde el blanco hasta el gris oscuro y negro con material orgánico como agente oscurecedor. Los colores amarillos y marrones resultan de los óxidos de hierro que contienen en su interior y es media a fácilmente rayable, por lo tanto, su dureza es intermedia. Estrictamente para que una roca sea considerada caliza debe estar constituida mínimamente en un 50% de calcita (o Aragonita). El resto del material que compone la roca puede ser impurezas como granos de Dolomita, cuarzo, arcilla, hierro, óxidos, o partículas de roca de varios tipos. Una de las

características distintivas de estas rocas es su solubilidad en ácido hidrociorhídrico caliente diluido, acompañado por una enérgica efervescencia debido a la presencia de la calcita que reacciona con este. La piedra caliza frecuentemente no se encuentra en ambientes minerales. Pero debido a su solubilidad en agua subterránea ligeramente ácida, la calcita es redepositada en los lugares con las características apropiadas para su precipitación en forma de cristales bien formados y algunas veces con diminutos cristales de otros minerales contenidos en la solución que le dio origen. Las calizas son susceptibles a alteración por varias soluciones mineralizantes, de manera que algunos depósitos de minerales valiosos están asociados a estas rocas. Ejemplos de minerales formados de esta manera son Baritina, Calcita, Celestina, Fluorita, Galena, Yeso, Marcasita y Esfalerita. Existen varios tipos de calizas, a continuación, detallaremos algunos tipos.

Calizas clásticas: Estas son la menos comunes y están compuestas por fragmentos fracturados de conchas y caparazones, partes de cristales de calcita, y fragmentos de otras calizas.

Calizas químicas: Estas son producto de precipitación en océanos de aguas cálidas, surgentes de agua caliente, lagos salinos, y cuevas de calizas.

Calizas Oolíticas: Típicas de depósitos de agua de mar cálida y playas (de poca profundidad).

Travertino: Es un tipo de caliza de color y bandeada, formada por depósitos cristalinos en cuevas y surgentes de agua caliente.

Calizas Orgánicas o biogénicas: Estas incluyen el mayor número de variedades de caliza, las cuales están nombradas posteriormente en función de los fósiles que contienen de manera mayoritaria como *caliza de coral*, *caliza de algas*, o *caliza foraminífera*.

Caliza de Coquina: Es una caliza marrón pálida, orgánica, porosa y pobremente cementada compuesta por moluscos y conchas marinas o de agua dulce.

Tiza: Es una caliza orgánica blanca, suave, porosa y densa compuesta por caparazones o conchas de organismos microscópicos depositados en aguas marinas poco profundas, pero antes de llegar a contener los detritos existentes en la costa o playa.

La piedra caliza es ampliamente utilizada para propósitos estructurales de interior y exterior. Es también un importante ingrediente en la manufactura de morteros y cemento portland, así

como en las operaciones de fabricación durante el fundido de aceros. Ciertas calizas arcillosas son fundamentales en cementos de tipo hidráulico.

Roca Metamórfica tipo Pizarra

En el caso de la roca Pizarra, se observa que la misma es de color oscuro a negruzco con venas de color más claro. También se observan líneas de laminación paralelas y en el mismo sentido Fig. 3.37a. En la Fig. 3.37b se aprecia una superficie de fractura suave y lustrosa. Su estructura es densa. Los restos fracturados resultan en capas o láminas paralelas a la orientación al igual que el material que la conforma el cual se encuentra orientado. Su dureza es media a dura, aproximadamente 5 ½ Mohs.

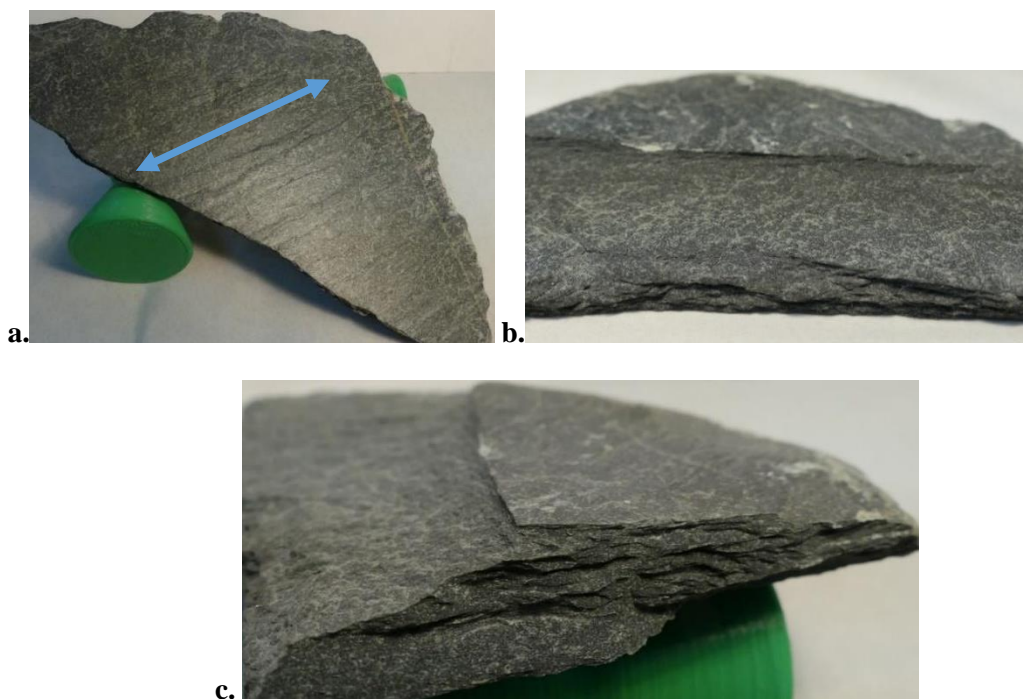


Fig. 3.37. a. Trozo de Pizarra extraído de una roca de mayor tamaño, donde se observa el sentido de laminación. **b.** Detalle de la coloración oscura y venas de color más claro. Fracturada expuesta realizada en sentido transversal a la laminación. **c.** Plano de fractura paralelo al sentido de laminación.

La textura de la Pizarra es densa y cristalina a escala microscópica. La foliación de la pizarra se produce por la alineación de las escamas de mica en planos paralelos a lo largo de la roca lo que produce una fina separación de sus láminas. En ocasiones se pueden observar elementos de rocas padres acumulados en capas visibles como bandas de color a través de la foliación. Los colores usualmente van desde gris oscuro a negro debido al material carbonaceo encapsulado y el grafito. Ocasionalmente puede ser verde debido a la clorita o rojo púrpura, marrón o amarillo debido a los óxidos de hierro. Tiene un lustre distintivo pero

débil en los planos de separación. Si la foliación es de tipo Filita, al tener mica de mayores dimensiones, el plano se observa sedoso y más brillante. Su dureza es baja, fácilmente rayable con lama de corte. Estas rocas se encuentran usualmente en afloramientos inclinados y escarpados con forma irregular o dentada debido a la erosión, que también causa descamación y separación a lo largo de las superficies de foliación. Esta roca es producto de metamorfismo dinamotérmico (regional) bajo tensión compresiva de bajo grado y en el caso de la Filita la tensión compresiva es media en vez de baja. Las rocas padres que dan origen a la Pizarra pueden ser el shale o Mudstone. En su mineralogía constituyente se encuentra mayoritariamente Moscovita y Clorita, las cuales son observables a ojo desnudo sólo en la Filita. El ambiente de gestación de las mismas no corresponde específicamente con algún mineral, esta puede estar intersectado por venas de cuarzo, y pueden contener porfiroblastos de minerales como andalucita. Su uso económico o utilización se centra en el revestimiento de suelos, losas, paredes, etc. En la Tabla 3.4 se detalla la clasificación resultante de los tres tipos de rocas utilizados en nuestros ensayos.

Tabla 3.4 Clasificación y características del material geológico ensayado en las probetas.

Codigo	Nombre comercial	Clasificación Basica	Detalle
Roca 1	Roca Mendoza	Sedimentaria	Arenisca. De granos tamaño arena, gruesa estratificación, fractura alrededor de los granos por su cemento de consolidación, textura rugosa.
Roca 2	Roca Neuquén	Sedimentaria	Lutita - Caliza Biogénica. El tamaño de los granos es muy pequeño, densa de laminación muy fina. Fracura de forma paralela al sentido de laminación, textura finamente rugosa.
Roca 3	Pizarra	Metamorfica	Baja dureza, tamaño de grano muy pequeño, fractura en forma de escama a través de los planos de foliación de la mica., textura suave y sedosa.

3.3.2. Caracterización adicional de las rocas Arenisca, Caliza y Cemento de consolidación.

Sobre algunas muestras de rocas de Arenisca y Caliza, se realizaron ensayos de compresión uniaxial (UCS) de manera de obtener algunos valores que pueden ser representativos de sus propiedades mecánicas. La extracción de muestras se realizó de trozos de roca perteneciente al material utilizado para la construcción de las probetas de ensayo (Fig. 3.38), siendo el diámetro de las mismas de 25.2 mm aproximadamente. Se trató de extraer muestras en sentido paralelo y perpendicular a la orientación de laminación, pero en el caso de la roca Caliza, esto no fue posible, pudiendo extraer solamente muestras en sentido perpendicular a la deposición de las capas.



Fig. 3.38. Extracción de “plugs” sobre muestra de roca caliza perpendicular al sentido de estratificación.

Los ensayos se realizaron sobre las muestras cilíndricas según norma ASTM D7012-14. Estas probetas fueron recubiertas con una camisa termocontraíble y colocada entre dos cabezales metálicos de compresión. Sobre esta montan los sensores de deformación axial y radial de forma ortogonal y posteriormente se coloca la celda de carga. El sistema hidráulico del equipo aumenta la carga axial a una tasa de deformación axial constante de 20×10^{-6} s⁻¹ hasta la falla del espécimen.

Tabla 3.5. Resultado de ensayo de compresión simple para roca Arenisca y Caliza. Ensayos realizados por Y-TEC.

Ensayo de compresion uniaxial	Carga rotura (Kg)	Presion Diferencial (PSI)	Modulo de Young (xE6 PSI)	Poisson	Densidad (gr/cc)	Litología	Orientación de la extracción respecto del sentido de estratificación
R1 arenisca	3312.13	9447,79	1,80	0,310	2,53	Arenisca	Horizontal
R1 arenisca	3648.60	10365,69	1,88	0,222	2,53	Arenisca	Vertical
R2 Caliza	5463.00	15551,63	4,51	0,265	2,52	Caliza	Vertical

En base a los datos presentados, se puede evaluar que la densidad de estos dos tipos de rocas sedimentarias es muy similar, pero el módulo de Young es casi 2.5 veces superior en la caliza respecto de la arenisca lo que repercute en la necesidad de utilizar mayor fuerza compresiva en la caliza para alcanzar la misma deformación elástica que la arenisca. La carga de rotura para la Caliza es aproximadamente 56 % mayor que para la arenisca, esto implica que se necesita una mayor fuerza de avance y torque (lo que compone la fuerza de corte) para alcanzar la fractura de la caliza respecto de la arenisca.

También se realizaron ensayos de compresión al material de cementación para evaluar su curado y propiedades macroscópicas a la compresión. Para esto, se realizaron tres probetas de 60.6 ± 0.05 mm de diámetro y 120 ± 1 mm de alto que fueron ensayadas luego de 40 días de curado. Las mismas se curaron durante 5 días en ambiente húmedo y luego permanecieron bajo agua los últimos 35 días antes del ensayo. Los ensayos de compresión uniaxial fueron realizados en la UTN-FRD en una máquina de tracción/compresión hidráulica de 600 kN (Fig. 3.39). Modelo Amsler 60 con graficador mecánico sobre papel milimetrado y sin poder medir deformación lateral. Estos ensayos no fueron realizados estrictamente bajo la norma de ensayo de hormigones, pero los resultados obtenidos nos brindaron una idea muy clara de la homogeneidad de comportamiento entre las tres probetas analizadas, tiempo de curado apropiado y la carga de rotura en compresión. La carga promedio de rotura arroja un valor de 4550 kg. Esto significa que la tensión de compresión que soporta el material es de 157.7 kg/cm^2 hasta el momento de la rotura. Este valor es bajo en resistencia comparado con los hormigones utilizados en la construcción, pero cabe recordar que el contenido de esta mezcla posee un 20% de cal con el objetivo de disminuir su resistencia.



Fig. 3.39. Probeta de elemento cementación composición 0.8:0.2:3, luego del ensayo de compresión uniaxial a rotura.

En la Tabla 3.6 se muestra una comparación de las tensiones de rotura para los geomateriales de roca arenisca, roca caliza y el cemento de consolidación de las probetas. Este cemento de unión tiene el valor más bajo de resistencia a la compresión, mientras que la roca caliza

muestra la mayor resistencia con un valor comparable a la resistencia a la compresión de los hormigones mayor sollicitación mecánica (>70 Mpa) en construcción civil. Por otro lado, la roca arenisca muestra un valor intermedio de resistencia a la compresión lo que contribuye, conjuntamente con los otros dos materiales, a formar un modelo de probetas con amplio valor tensiones de rotura a compresión y que pueden condicionar el desarrollo del proceso de corte y por lo tanto la EA del proceso.

Tabla 3.6. Comparación de tensión de fractura para tres geomateriales

Tipo de material	Tensión máxima de fractura [Mpa]	Tensión máxima de fractura [atm]
R1 arenisca Horizontal	40.44	399
R1 arenisca Vertical	44.54	439.47
R2 Caliza Vertical	66.70	658.17
Cemento de unión	15.46	152.57

Para la roca Pizarra no se pudo realizar ningún tipo de ensayo de caracterización realizado a los demás geomateriales ya que las dimensiones de la misma prohíben la extracción de algún tipo de muestra para ensayo. Por este motivo, se tomarán valores de referencia según bibliografía especializada que indica que la tensión de compresión para este material varía entre 76 a 11 MPa (S. Panthee et al, 2016) y su dureza es de aproximadamente 5 ½ Mohs.

3.3.3. Modelo de semejanza

Parte del material de ensayo seleccionado y la forma constructiva de algunas probetas fueron ensambladas teniendo como referencia el siguiente modelo de semejanza encontrado en la corteza terrestre. Un análisis detallado de la hoja geológica Nro. 3969-I Zapala, donde se especifican la formación Mulichinco, la formación Vaca Muerta y la formación Tordillo es de interés tecnológico por su utilización como zona productora de gas y petróleo no convencional. Cada una de estas formaciones está compuesta por diferentes rocas sedimentarias como las areniscas y calizas además de otros tipos donde varían la porosidad, composición química, saturación de líquido y estado tensional, en función del rol que cumplen dentro del reservorio. La Fig. 3.40 muestra que el campo de lutitas bituminosas y esporádicas calizas (siendo todas estas rocas sedimentarias de granulometría fina, con estratificación y gran contenido fósil) perteneciente a la formación Vaca Muerta, y están encerradas en la parte superior e inferior por areniscas de grano medio a fino, areniscas calcáreas y con conglomerados gruesos.

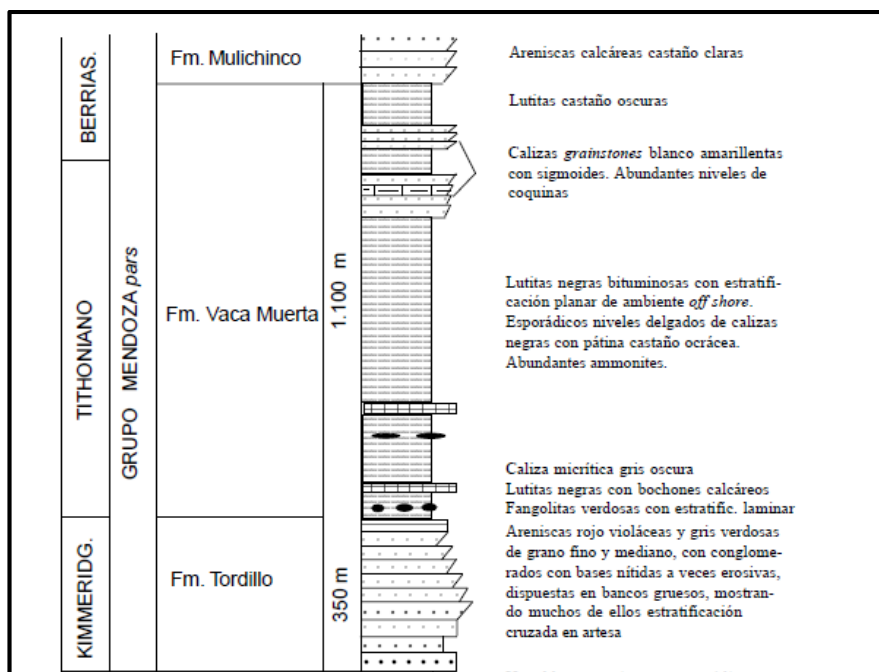


Fig. 3.40. Croquis estratigráfico de las formaciones Mulichinco, V. Muerta, Tordillo.

Es evidente que de querer realizar una perforación hacia la formación Vaca Muerta, primero será necesario atravesar un campo de areniscas al ingreso, atravesar la formación vaca muerta y si se sobrepasa esta formación nos encontraremos nuevamente con roca arenisca. Esto determina límites naturales de la zona de interés donde cambian las propiedades mecánicas de estos materiales. A continuación, se detalla una breve reseña sobre las características de estas tres formaciones según hoja geológica Nro. 3969-I Zapala.

Formación Mulichingo. Conglomerados, areniscas, calcarenitas, coquinas

*Está compuesta por secuencias deposicionales que señalan oscilaciones eustáticas del nivel del mar, las que se inician con areniscas, continúan con pelitas castaño claras y rematan con niveles coquinoideos en los que predominan *Exogyra couloni* y bivalvos trigónidos. Las areniscas son de grano fino y mediano, con cemento calcáreo y tonalidades gris amarillentas y castaño claras, presentando buena estratificación, con bancos gruesos de hasta 1 m de potencia. En correspondencia con una caída global del nivel del mar acaecida durante el Valanginiense medio, en la región del cerro de La Grasa y en el área de Pilmatué, se observan potentes conglomerados y areniscas conglomerádicas con clastos de hasta 5 cm de diámetro, litotopos que se intercalan en el tramo superior de la unidad. A medida que la Formación Mulichinco progresa hacia el norte los litotopos arenosos pierden importancia, incorporándose en su constitución litológica limolitas y arcilitas micáceas fisiles, de color negruzco verdoso. El espesor de esta unidad oscila entre los 380 m en el perfil del Río Agrío (véase figura 3), hasta disminuir a 250 m en la región del cerro Mulichinco.*

Formación Vaca Muerta. Pelitosa, Margas bituminosas, Calizas.

*La Formación Vaca Muerta está compuesta por pelitas y calizas, predominando arcilitas, arcilitas micríticas, micritas arcillosas y micritas, todas ellas con gran cantidad de materia orgánica bituminosa. En general, sus tonalidades son castaño oscuras, ocre y amarillentas. En su parte inferior es frecuente la presencia de bochones calcáreos con gran constancia regional en toda la Cuenca Neuquina, que se desarrollan preferentemente en las Capas con *Virgatosphinctinae* (Leanza, 1980). Al este de Loncopué camino a Huncal*

se observan frecuentes crecimientos secundarios de cristales de aragonita blancos que contrastan fuertemente con las pelitas negras. Las calizas litográficas que se hallan en las cercanías de Zapala han sido mapeadas como Miembro Los Catutos (Leanza y Zeiss, 1990), en tanto que las areniscas intercaladas en las pelitas en el área de los cerros Mocho y Mulichinco han sido carteadas como Miembro Huncal nom. nov. Según Leanza (1973), el espesor de la Formación Vaca Muerta entre el techo de la Formación Tordillo y la base de la Formación Mulichinco en la región norte de la Hoja, entre Cajón de Almaza y Trahuncurá, alcanza los 1.150 metros.

Formación Tordillo, Litología: Conglomerados, Areniscas y Fangolitas.

“Está constituida por potentes bancos de areniscas y conglomerados con estructuras de estratificación cruzada en artesa. En forma subordinada existen arcilitas incluidas en nidos dentro de las areniscas en las cabeceras del cañadón Los Alazanes o en capas en el cerro Mallín Quemado. También se han reconocido calcáreos pardos con pátina herrumbrosa en las faldas del cordón de Cuchillo Curá. Se observaron bancos con abundante material tobáceo (tufitas). En la base de la unidad, en el cerro Manzano Grande existen fragmentos de calcáreos y corales de la Formación La Manga, cuyo estado de conservación muestra que no han sufrido un transporte prolongado. En el techo de la unidad afloran arcilitas verdosas. El color dominante de las areniscas y conglomerados de la Formación Tordillo, corresponde a los tonos verdosos y en menor grado a los pardos y morados. La Formación Tordillo en el cordón de Curymil pasa los 200 m de espesor, mientras que en el cañadón de Mallín Quemado alcanza los 300 m de potencia

Tabla 3.7. Detalle de las edades, distribución estratigráfica, litología y espesor para formación V. Muerta y sus estratos superiores e inferiores según Hoja geológica Nro. 3969-I

ERAS	SIST.	EDADES	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA	ESP.(en m)	Discordanancias principales	
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR	Formación Kayoso (13)	Miembro Quli Malal (13b)	Arcilitas varicolores bandeadas y yeso	470	Mirámica intermedia
			— ? —	Miembro Rincón (13 a)	Areniscas, fangolitas	250	
			Formación Huitrín (12)	Miembro Salina (12b)	Arcilitas varicolores yesíferas, sal de roca	180	Mirámica inicial
				Miembro La Tosca (12 a)	Calizas, dolomitas, yeso	60	
				Miembro Agua de la Mula (11c)	Pelitas, coquinas	489	Coluésquica
			Formación Agrio (11)	Miembro Avilé (11b)	Areniscas, limolitas	20	
		Miembro Pilmatué (11a)	Pelitas, coquinas	577	Catanilítica		
	Formación Mulichinco (10)		Conglomerados, areniscas, calcarenitas, coquinas	350			
		Fm. Picún Leufú (9)	Mb. Huncal (8b)	9) Areniscas, limolitas, calizas, coquinas	1.150	Araucánica	
		Mb. Los Catutos	8) Pelitas, margas bituminosas, calizas				
		Formación Vaca Muerta (8)	8a) Calizas, margas 8b) Areniscas, margas				
	JURÁSICO	MALM	Tithoniano	Formación Tordillo (7)	Conglomerados, areniscas, fangolitas	300	Araucánica
			Kimmeridgiano	Formación La Manga (5)	Fm. Auquilco (6)	Yeso, calizas yesíferas, calizas criptoalgales	
Oxfordiano			Formación Lotena (4)		Calizas, pelitas	10-120	
DOGGER		Calloviano	Formación Lotena (4)		Conglomerados, areniscas, arcilitas	380	Loténica
		Bathoniano	Formación Tábanos (3)		Calizas, pelitas, yeso	5-35	
		Bajociano	Formación Lajas (2)		Areniscas, limolitas, arcilitas, coquinas, calizas	550	
		Aaleniano	Formación Los Molles (1)		Lutitas, areniscas, limolitas, margas	1.000	
LIÁSICO	Toarciano						

En base a la información presentada, se observa que estas tres formaciones tienen características constitutivas bien diferenciadas. Esta variación en la composición de las capas naturalmente depositadas genera estratos geológicos con diferencias en las propiedades mecánicas, variando su resistencia a la compresión, su dureza, ángulo de fractura, taladrabilidad etc. Cualquier proceso mecánico de remoción de material que se realice sobre

estos estratos puede ser afectado en mayor o menor medida por estas variables, así como la EA asociada a estos procesos. Estas diferencias podrían eventualmente ser útiles a la hora de clasificar mediante las señales de EA las litologías que se van perforando sucesivamente.

Estas variables y muchas otras más modifican la forma en que la roca se fractura, esto implica que la energía que imprime la broca para promover el mecanismo de desintegración (sea cual sea) se reparte siempre de diversa manera. Si la fractura es frágil, y en planos bien determinados en general la energía entregada para propagar la fisura es baja, mientras que, si el corte se produce con alta deformación plástica, la energía entregada al sistema debe ser mayor. Para que el proceso de perforación (al igual que cualquier otro) produzca emisión acústica es necesario que la parte de la energía proporcionada por la broca se transforme, mediante algún mecanismo, en ondas elásticas que luego se propagaron por el medio hasta los sensores. La forma, cantidad y características en que esta energía elástica se distribuye depende de los mecanismos que se promuevan entre otras variables. Por ejemplo, las fracturas frágiles tienden a tener gran amplitud, corta duración, corto rise time y altas frecuencias, mientras que fracturas con mayor deformación plástica tienden a producir señales de mayor duración, con frecuencias más bajas y rise time más largos. Eventualmente si el mecanismo de desintegración de un material es por corte, mediante acuñamiento y fractura en planos específicos, las señales serán más parecidas a los tipos explosión, mientras que, si la forma de desintegración es por indentación, arado y molienda, las señales tenderán a ser más continuas en el tiempo. Una vez consideradas estas variables, definido el cortador y su geometría característica, fijado el ambiente y las condiciones de ensayo, si se produce una variación en las características geomecánicas del material a cortar, se producirá un cambio en el mecanismo de fractura, lo que modifica la distribución de la energía acústica involucrada en el proceso y por lo tanto varía la señal de EA. Diferentes rocas tienen diferentes planos de fractura, los cuales, una vez fijada la geometría del cortador, se alinean en mayor o menor medida con la fuerza de corte, modificando la mecánica de fractura.

3.3.4. Disposición de las capas de roca para las probetas de ensayo, conformación de los casos para calibración, ensayo y distribución de perforaciones

Una vez seleccionado los materiales de constitución de las capas de las probetas, se comenzó el proceso de ensamblado y cementación. Las probetas finalizadas quedan como se muestra en la Fig. 3.41, completamente consolidadas en un contenedor plástico es instrumentada con una guía de ondas metálicas.

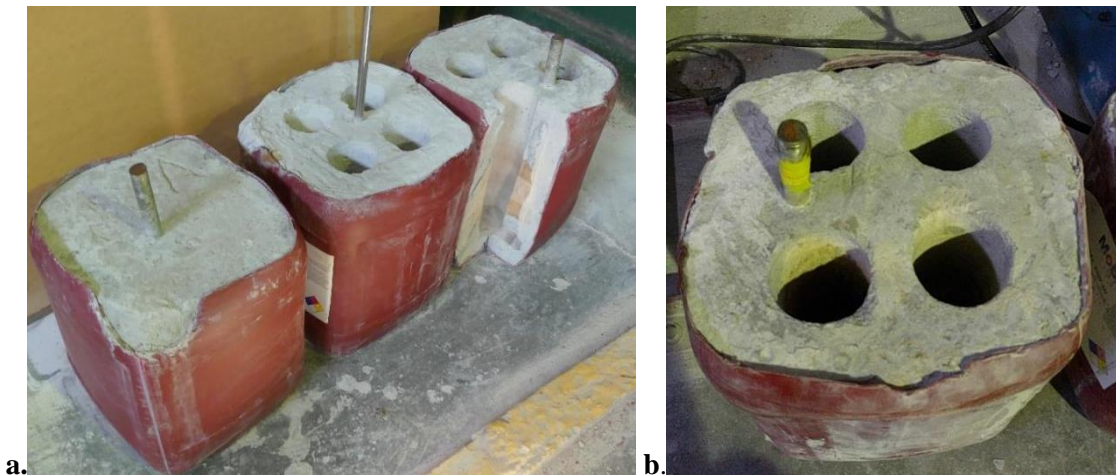


Fig. 3.41. Probetas totalmente ensambladas antes y después de los ensayos. **a.** De izquierda a derecha, probeta sin perforar, probeta con cuatro perforaciones y probeta abierta para examinación. **b.** Probeta con cuatro perforaciones (Vista superior) y posición de guía de onda lateral.

Cada una de las probetas puede ser utilizada cuatro veces. Luego del taladrado, el espécimen queda totalmente perforado (Fig. 3.41b) y en algunos casos han sido cortados para analizar las capas perforadas. Como se mencionó anteriormente, cada probeta y cada perforación es única en su arquitectura de armado debido a la inhomogeneidad intrínseca de la roca en su composición y geometría. Por esta razón, cada perforación realizada en una misma probeta no es idéntica que la anterior. En la Tabla 3.8 se brinda un detalle de la nomenclatura utilizada para identificar las probetas y los ensayos realizados. Las probetas respetan en su conformación el detalle mostrado en la Fig. 3.32, donde se componen de 2 capas de material rocoso cementadas entre sí. Estas dos capas de rocas (R1 y R2), pueden ser o no del mismo material. En el caso de que las dos capas de rocas sean del mismo material, la probeta se denomina con *una sola letra* y si esta contiene dos rocas, de diferente material, la misma se define con *dos letras* donde cada una representa una capa de material rocoso en orden descendente. Posteriormente se define con un número, si es la primera o segunda probeta realizada con esta conformación. Finalmente, también en la codificación se detalla el número de perforación realizado en cada probeta, de manera de que cada ensayo es un código compuesto por el tipo de probeta, el de versión y la perforación realizada.

Tabla 3.8. Codificación de ensayos según tipos de probetas y número de agujero.

<i>Tipo de roca</i>	<i>Codificacion</i>	<i>Nro de probeta</i>	<i>Nro de Agujero</i>
Arenisca	A	1 o 2	a1, a2, a3, a4
Caliza	C		
Pizarra	P		

A modo de ejemplo, el ensayo P2a2 corresponde a la segunda versión de la probeta de dos capas de roca Pizarra y a la perforación número 2 respectivamente. De manera paralela, el ensayo AC1a3, hace referencia a la primera versión de la probeta donde la primera capa es de roca Arenisca (A), y la segunda capa es de roca Caliza (C). Luego específicamente la perforación analizada corresponde el agujero número 3 (a3). La tabla 3.9 brinda un detalle de todas las perforaciones realizadas y una expansión de la misma se encuentra en el **anexo A**.

Tabla 3.9. Detalle de los ensayos de perforación realizados. (Cuadro expandido en Anexo A)

Nro	Probeta / Agujero	Composición	Tipo de broca	Rotura Filo	Observación	Medición de Estratigrafía	Correlación EA con video
1	PIa1	2 capas de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
2	PIa2	2 capas de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Primera pruebas	Si	Si
3	PIa3	2 capas de roca pizarra	Broca de 4 fillos AISI O2	No	Calibración	No	No
4	PIa4	2 capas de roca pizarra	Broca de 4 fillos AISI O2	No	Primera pruebas	No	No
5	CIa1	2 capas de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Calibración	Si	Si
6	CIa2	2 capas de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		No	No
7	CIa3	2 capas de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	SI		SI	SI
8	CIa4	2 capas de roca caliza	Broca de 4 fillos AISI O2	SI	Ensayo interrumpido y recontinuado	SI	SI
9	AIa1	2 capas de roca arenisca	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
10	AIa2	2 capas de roca arenisca	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
11	AIa3	2 capas de roca arenisca	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
12	AIa4	2 capas de roca arenisca	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
13	CP1a1	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	No se registro PR	Si	Si
14	CP1a2	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
15	CP1a3	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
16	CP1a4	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
17	AC1a1	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
18	AC1a2	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Calibración	Si	Si
19	AC1a3	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
20	AC1a4	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
21	AC2a1	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	Si		Si	Si
22	AC2a2	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
23	AC2a3	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno / Broca de 4 fillos AISI O2	Si	Cambio de cortador	Si	Si
24	AC2a4	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 fillos de carburo Tungsteno	SI		Si	Si

3.4. Sistema de EA utilizado para los ensayos

El sistema de emisión acústica utilizado es marca Physical Acoustics Corporation (PAC), modelo DISP-4, de cuatro canales. Consiste en una placa PCI instalada en una computadora tipo PC de escritorio. También se utilizaron sensores y preamplificadores de la misma marca. La señal eléctrica generada por el sensor piezoeléctrico en la conversión de la onda elástica recibida es acondicionada por el preamplificador que envía la señal hacia la placa a través de un cable coaxial que cumple las funciones de transportar la señal medida y de proveer una tensión de +28 Voltios al preamplificador. El equipo de EA tiene una resolución en amplitud de 16 bits y la capacidad de adquirir, digitalizar, parametrizar y almacenar la información de las señales de EA, además de hasta ocho parámetros analógicos externos. Este equipo se controla a partir de un software del mismo fabricante denominado AE Win

DISP-4 que permite también la visualización de los parámetros medidos a tiempo real y el almacenamiento de los datos como archivos en ascii. En el capítulo introductorio de EA de la presente tesis se muestra una descripción de los bloques o unidades de procesamiento del equipo de EA utilizado en el presente trabajo.

3.5. Ensamble final del prototipo y configuración de parámetros de ensayo

En la Fig. 3.42 se observa el equipo completo ensamblado con todos los componentes en funcionamiento. El equipo fue instalado en el laboratorio de soldadura de la facultad UTN – FRD de la Ciudad de Campana, mediante 5 puntos de anclaje y pernos de 25.4 mm de diámetro. También se tuvo que proveer al lugar de conexión de agua, desagüe, modificación de la red eléctrica y un sistema de sujeción de probetas al suelo del edificio.



Fig. 3.42. Montaje del equipo de perforación. De izquierda a derecha, variador de velocidad, alimentación de equipos periféricos, equipo de control de avance y fuente de potencia regulable, perforadora, unidad hidráulica.

3.6. Parámetros mecánicos y niveles de ajuste de equipos para perforación

3.6.1. Parámetros de perforación

Los parámetros de perforación básicos que deben ser considerados en cada perforación se detallan a continuación y son comunes para todos los ensayos.

Presión de avance directo de bomba: 51 at +/- 5

Velocidad de avance promedio para todos los ensayos: 0.289 +/- 0.326 mm/s (1.73 cm/min)

Rpm promedio para todos los ensayos: 27 +/- 2

Todos los ensayos (salvo mención específica) fueron realizados con lubricación forzada, monitoreo de las presiones hidráulicas de empuje y de retención y registro por video de la posición de la broca durante la perforación.

Cámara de video grabación: Panasonic DMC-FZ300 25-600 mm 1:2.8/4.5-108

3.6.2. Configuración del equipo de EA

La siguiente configuración de la cadena de medición de EA representa los parámetros generales de instrumentación y de las variables del sistema de EA. Esta configuración se utilizó en todos los ensayos analizados en la presente tesis y dio como resultado la información para el procesamiento mediante diferentes técnicas de análisis. En las probetas de calibración se utilizó una gama más amplia de configuraciones que definió el presente modelo optimizado.

Canal 1: Guía de ondas hidráulica montada en la broca.

Canal 2: Guía de ondas cementada en la probeta.

Sensor 1: Sensor de EA marca PAC modelo WD de banda ancha.

Sensor 2: Sensor de EA marca PAC modelo WD de banda ancha.

Preamplificadores: preamplificadores marca PAC modelo 2/4/6 de ganancia variable ajustado en 20 dB.

Frecuencia de muestreo: 10×10^6 muestras/s.

Filtros pasa banda entre 20 kHz y 2 MHz para ambos canales.

Pre-trigger: 300 μ s.

Longitud máxima de la señal: 10 ms.

PDT: 500 μ s, HDT: 1200 μ s, HLT: 500 μ s, para ambos canales.

Líquido de acople hidráulico: Aceite Hidráulico.

Canales paramétricos 1 y 2 activados por hit y contador cíclico para registro de las presiones de avance (PA) y de retención (PR).

Transductores de presión piezoeléctricos: Marca TECSIS – OEM 3297 0- 250 bar – Salida 4-20 mA

Procesamiento de datos: Computadora portátil marca HP, con procesador i5-7200U, 2.5 GHz y 8 GB de memoria RAM.

La Fig. 3.43. muestra un diagrama del esquema experimental completo y los puntos importantes de medición y procesamiento.

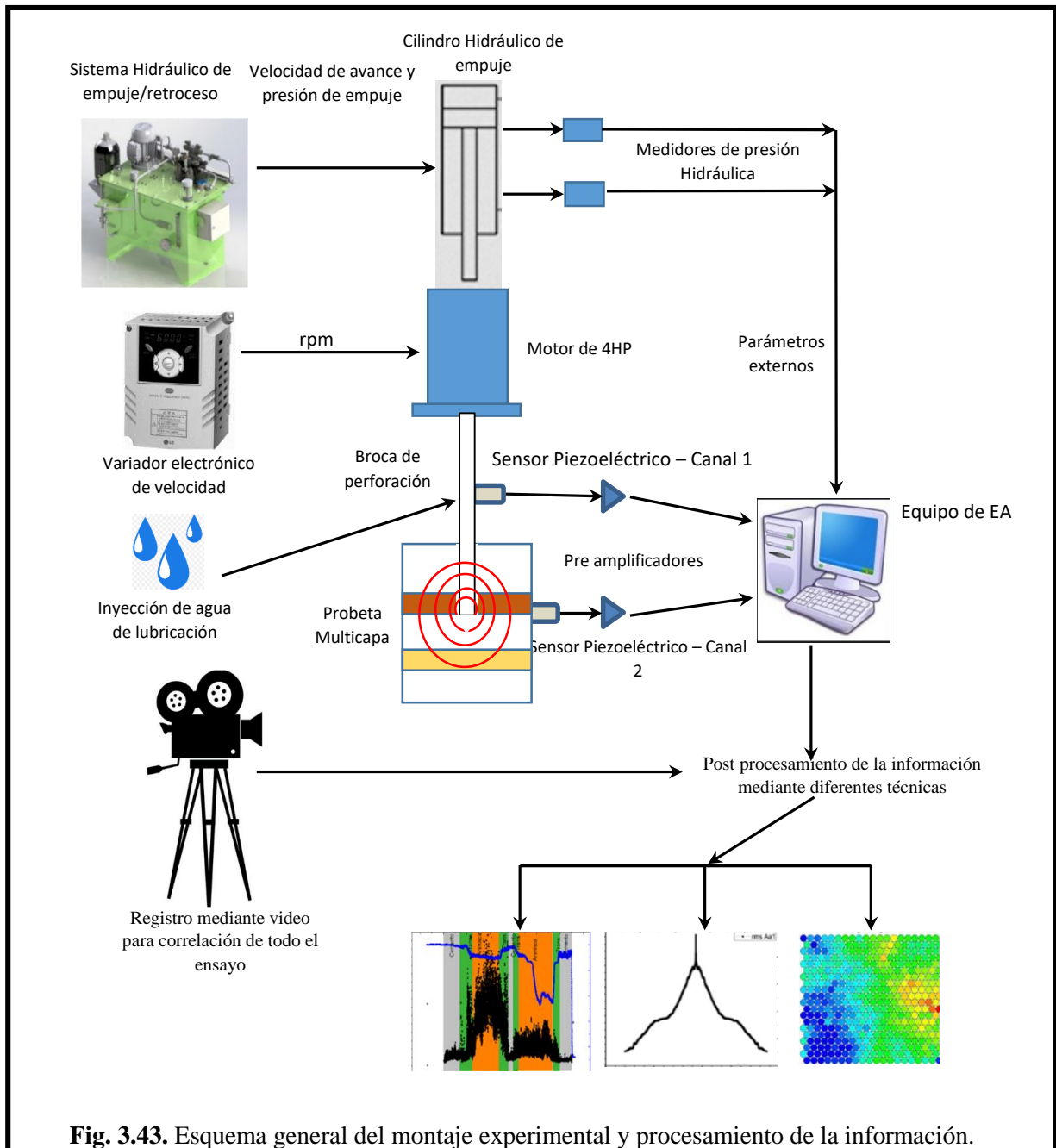


Fig. 3.43. Esquema general del montaje experimental y procesamiento de la información.

3.7 Forma de procesamiento y análisis de la información

El procesamiento de la información de EA y de los parámetros externos realizado comprende la utilización de diferentes herramientas de análisis que se aplicaron e interrelacionaron para obtener los resultados y formular las interpretaciones de los casos. En esta sección se brinda un basamento teórico de las herramientas utilizadas y se exponen los procedimientos de procesamiento de la información para todos los ensayos analizados.

3.7.1. Presiones de Avance (PA) y de Retención (PR)

Durante la realización de los ensayos se observa que la PA es prácticamente constante durante todo el ensayo y para todos los casos estudiados. Esto es producto de la presión constante que ejerce la bomba hidráulica y cuyo máximo es regulado por la válvula diferencial. Contrariamente, la PR mostró grandes variaciones durante el proceso de taladrado, debido a que está relacionada con la resistencia que ejerce el material sobre la broca, frenándola o no, según estos materiales sean más o menos fáciles de taladrar. En la Fig. 3.44 se observan las presiones PA y PR durante el proceso de taladrado de una probeta de calibración con dos capas de material rocoso cementado. La PA muestra una leve variación durante la realización del ensayo en los mismos intervalos de tiempo en donde la PR muestra importantes variaciones en la amplitud de la señal, las cuales posteriormente serán relacionadas con las diferentes partes (capas) de la probeta que se está taladrando. En base a lo anterior, entre estas dos presiones del sistema, se selecciona como mejor descriptor, al parámetro Presión de Retención (PR) como mejor descriptor del proceso, Este parámetro tiene salida en (V), donde a mayor presión se observa una salida mayor en voltaje. Esta salida en voltaje digitalizada por la placa de EA será correlacionada con la información de EA y los videos de posicionamiento de la herramienta.

3.7.2. Medición de la posición de la broca y correlación con la presión de retención (PR)

La posición de la broca se registró durante todo el proceso de perforación mediante una regla graduada colocada en el lateral de la máquina y un indicador solidario al carro de avance (Fig. 3.45) y por lo tanto a la broca. Este sistema fue filmado durante el desarrollo del ensayo con una cámara Panasonic Lumix DMC-FZ300. Posteriormente mediante Hits de calibración registrados en el sistema de EA y el sistema de video, se pudieron sincronizar los tiempos del video y de la EA para relacionar la información de la EA con la posición del cortador. Ulteriormente, sobre cada perforación practicada, se realizó un relevamiento

estratigráfico de cada sustrato respecto del extremo superior de la probeta fijando ese nivel como el cero de profundidad y el final del recorrido de la perforadora como la profundidad máxima alcanzada (Fig. 3.45).

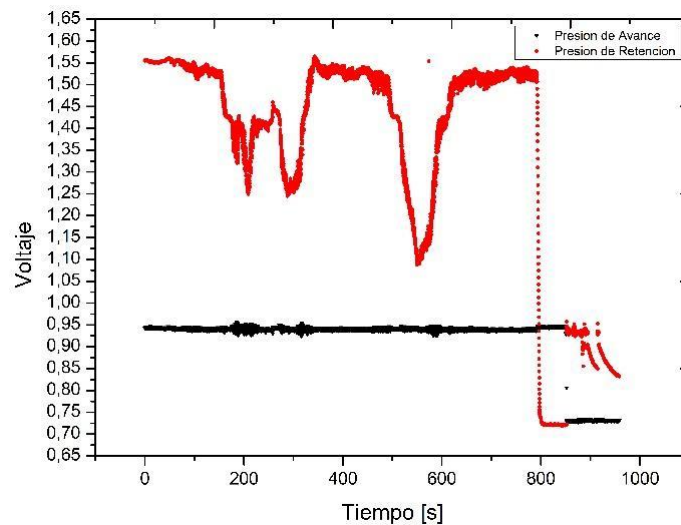


Fig. 3.44. Salida en Voltios de los sensores de presión de avance y presión de retención.

De esta manera, utilizando todas estas mediciones en conjunto, se puede relacionar la EA con la posición del cortador y el sustrato que está en contacto con el cortador en cada momento.



Fig. 3.45. Fotograma de filmación de la taladradora para registro de la posición del cortador.

El posicionamiento mediante medición de los estratos de cemento y roca conlleva una incertidumbre que se atribuye a varios factores que se detallan a continuación. El primer factor es el espesor irregular de las rocas como se ve en la estratigrafía del agujero 1 de la segunda probeta Arenisca Caliza (AC2), Fig. 3.46. Esta variación de espesor se replica aleatoriamente en toda la circunferencia del agujero por la naturaleza de la roca, lo que hace difícil determinar prolijamente el inicio y fin de una capa específica ya que depende de en qué parte de la circunferencia se tome la medida. Otra consecuencia de la incertidumbre

está relacionada con el cortador, donde existe la posibilidad de que una parte de la herramienta esté cortando un tipo de material y otra parte otro. Por lo tanto, la EA que emita el proceso y las presiones de trabajo relacionadas con esta zona de transición entre los dos materiales no estarán prolijamente discriminadas. El segundo factor considerado es la inclinación de las capas respecto al cortador. Durante la conformación de la probeta y el proceso de llenado, algunas capas pueden haberse movido, inclinándose respecto al cortador y produciendo un aumento aparente del espesor produciendo los mismos efectos que la variación real de espesor. Un detalle de los relevamientos estratigráficos de las perforaciones analizadas se encuentra incluida en el **anexo A** al final de la presente tesis.

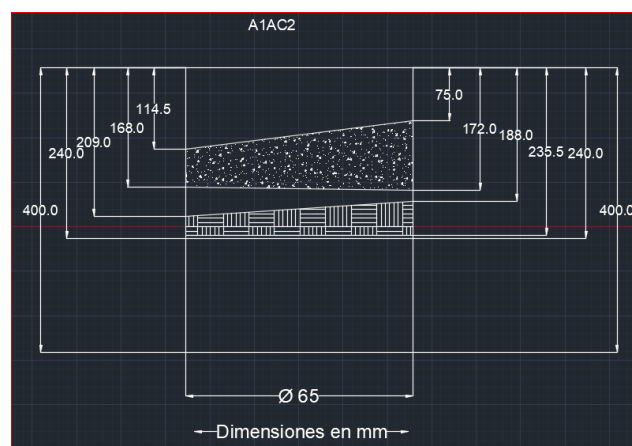


Fig. 3.46. Croquis de relevamiento estratigráfico para la probeta 2 de arenisca y caliza, agujero 1 donde en el diámetro del taladro de 65 mm se observa variación del espesor en cada sustrato entre un lado y otro del agujero.

Otro factor adicional para considerar entre la correlación de la EA, la PR y la posición del material geológico es el filo del cortador. Este tiene una diferencia de altura entre el filo de la punta y el filo de la periferia de aproximadamente 3.5 mm debido al ángulo de punta de diseño de la herramienta. Esto implica que cuando la punta está en un sustrato, los filos periféricos pueden estar cortando todavía el estrato anterior. Esto produce una gran variación de la PR a pesar de que la herramienta no traspasó completamente la capa de material que estaba cortando.

Por último, la forma de medición de la posición relativa de los materiales dentro de la probeta también contribuye a una fuente de incertidumbre. Debido a la cantidad de agujeros taladrados se optó por realizar las mediciones desde la parte superior de la perforación con escuadras y reglas de profundidad, sin cortar transversalmente los agujeros. Esto presenta un plano desfavorable para determinar el inicio y la finalización de las diferentes capas ya que

se pretende distinguir diferencias en altura con una vista de planta. Todos estos factores hacen que la correlación entre la EA, la PR y la posición relativa entre los materiales y el cortador tengan una incertidumbre máxima de ± 15 mm. Por lo tanto, las zonas de cambio de los geomateriales serán consideradas zonas de transición, las cuales dependiendo el tipo de análisis y procesamiento de la información, eventualmente pueden ser desestimadas. Los intervalos determinados entre las zonas de transición se establecen como zonas *efectivas de taladrado* donde el cortador está posicionado íntegramente en un estrato en particular claramente identificado, sin los efectos del borde de las interfaces. La Fig. 3.47 muestra la correlación gráfica, para una perforación genérica, del tiempo del ensayo de EA respecto de la variación de la PR y la posición relativa de los materiales perforados con las zonas de transición entre los mismos. Donde C es el cemento de unión, R1 y R2 son las capas de rocas y T corresponde a la zona de transición entre cemento y roca con su correspondiente incertidumbre.

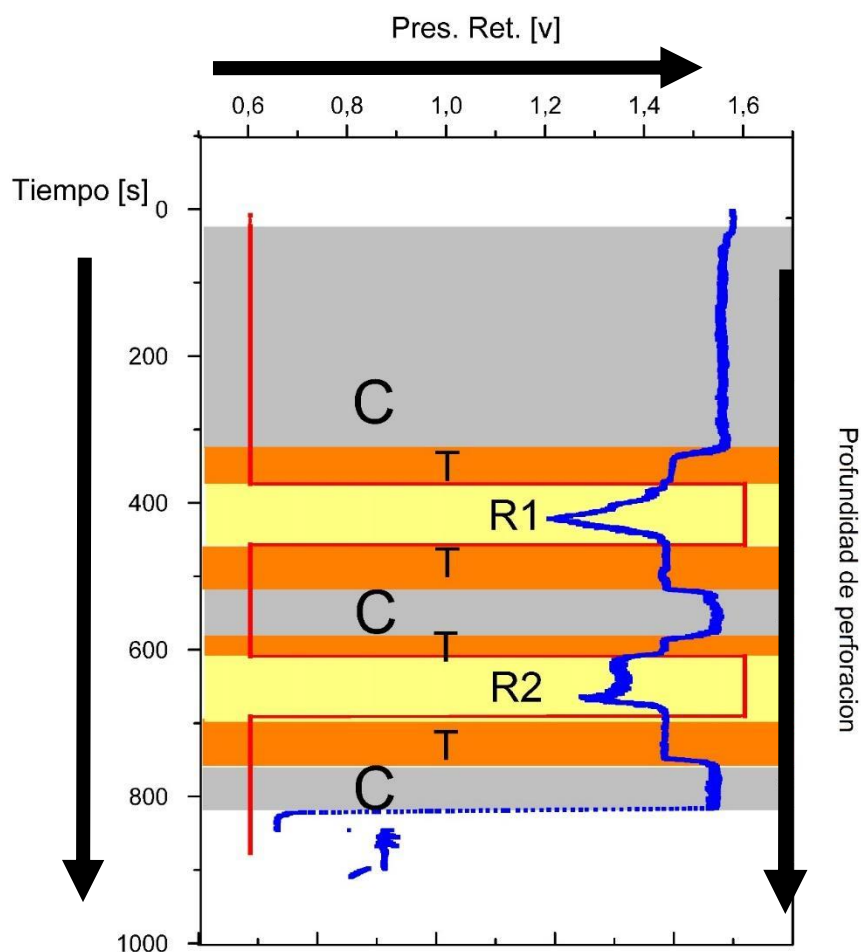


Fig. 3.47. Correlación entre tiempo del ensayo, salida del sensor piezoeléctrico de presión de retención (PR) y posición de los estratos dentro de la probeta.

Las variaciones de la PR se relacionan con las propiedades mecánicas de las rocas respecto del cemento de unión. El avance de la broca depende de un equilibrio dinámico entre las presiones de empuje y de retención. Cuando la broca se encuentra con un material más duro o resistente que el material de cemento, la penetración disminuye, por lo tanto, el trabajo de retención del sistema hidráulico disminuye y así también la presión de retención. Cuando la capa rocosa es traspasada, y se taladra nuevamente el cemento de consolidación, la PR se eleva por la menor resistencia al avance impuesta por este sustrato. Por lo tanto, la correlación entre la posición, tiempo y la PR permite seleccionar temporalmente la información de la EA del intervalo de interés. Parte importante del procesamiento de la información corresponde a la selección de intervalos con condiciones de corte semi-estables donde el cortador esté taladrando íntegramente una capa de material particular. La Fig. 3.48 muestra otros ejemplos de los resultados de las correlaciones entre estas tres variables.

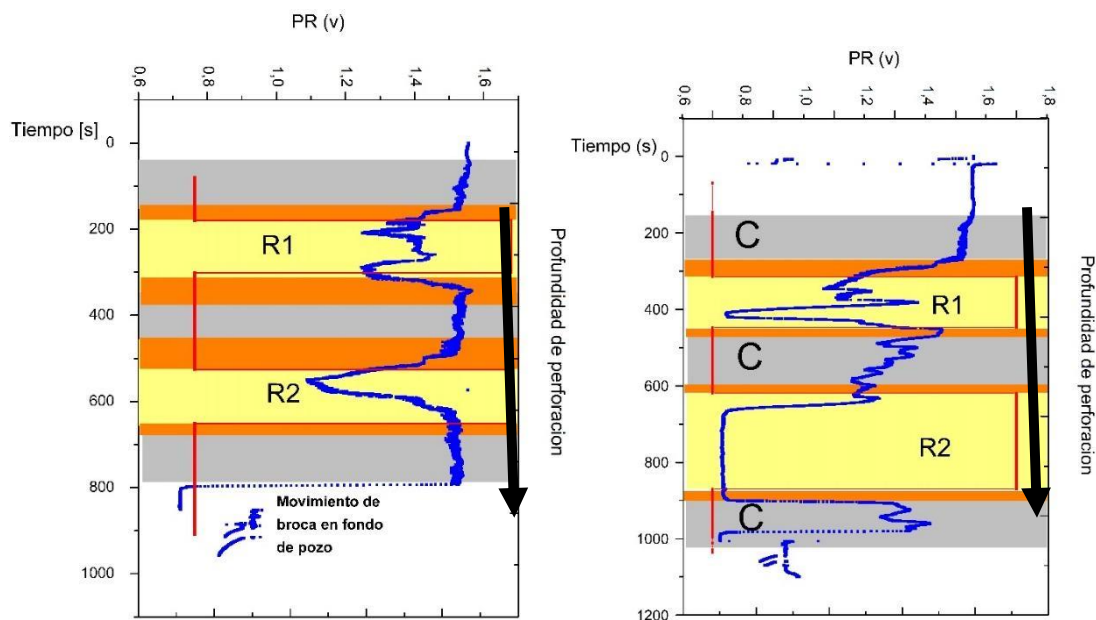


Fig. 3.48. Correlación gráfica entre el tiempo del ensayo, la PR y la posición del cortador para diferentes ensayos de calibración donde se pueden determinar las zonas donde efectivamente está posicionado en una capa en particular.

Esta correlación entre la PR y la medición de la posición del cortador y de las capas dentro de la probeta permitió establecer los intervalos temporales, comprendidos entre las zonas de transición (T), donde la señal de EA es estable y representativa del proceso de corte dentro de un material especificado y en una condición conocida. En los análisis posteriores se incluirá la información de la EA dentro de los anteriores gráficos.

3.7.3. Análisis de correlación de Pearson

La herramienta de correlación estadística de datos de Pearson es utilizada con el fin de evaluar cuáles de los parámetros de EA están linealmente relacionados durante el desarrollo del ensayo de perforación. El equipo de EA puede calcular de manera simultánea a tiempo real más de 15 parámetros tomados de la digitalización de la forma de onda. Hay parámetros primarios que son características directas de la forma de onda y otros secundarios que son resultados de la combinación de los primarios. Por ejemplo, el parámetro rms depende de la medición de la amplitud máxima en función del tiempo, o la frecuencia media que vincula el número de cuentas con la duración de cada Hit. En general, algunos parámetros suelen estar física y matemáticamente vinculados con otros. Un detalle de estos se encuentra en el capítulo introductorio de EA.

La construcción de modelos empíricos como el entrenamiento de redes neuronales requiere el procesamiento de parámetros descriptores del proceso que provean a la red de información sobre el fenómeno que se desea estudiar. Estos descriptores deben ser seleccionados de manera de optimizar su aporte evitando información redundante que llevará a sobrecargar inútilmente el proceso de cálculo. Dos parámetros de EA que muestran una alta correlación lineal estadística indican que varían de manera semejante durante el ensayo, aportando aproximadamente la misma información. Al aplicar Pearson, se evalúan los parámetros de EA y se eliminan los que se comparten información redundante. De esta manera se reduce a los necesarios para los procesos de entrenamiento y predicción de la RNK. Esto hace que el proceso de entrenamiento sea optimizado permitiendo utilizar una amplia variedad de descriptores que aporten información diferente no correlacionada entre sí.

La fórmula de cálculo de la correlación de Pearson para variables aleatorias X e Y está definida como:

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde cov es la covarianza, σ_X e σ_Y , n es la desviación estándar de las muestras X e Y respectivamente. El cálculo de la correlación aplicada a una serie discreta se puede expresar de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2}} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde r_{xy} son los coeficientes de Pearson de la correlación para las señales evaluadas. Luego n es el número de puntos de la muestra, x_i y y_i son los puntos i individuales de la muestra y \bar{x} e \bar{y} Se define como el promedio de las muestras X o Y.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \text{y su análogo } \bar{y}. \quad \text{Ec. 3.16}$$

Los valores que pueden asumir los coeficientes de correlación varían de -1 a 1, siendo 1 una correlación total entre las señales y -1 cuando el comportamiento está simétricamente invertido. Para este tipo de cálculo se utilizaron rutinas asociadas a las librerías Numpy de Python. Esta utiliza para el cálculo de la correlación de Pearson la función `numpy.corrcoef` que devuelve una matriz del producto del momento de los coeficientes de correlación de Pearson. La relación entre la matriz R de los coeficientes de Pearson y la matriz C de covarianza es:

$$R_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{(C_i * C_{ij})}} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Una vez obtenidos los valores de todas las correlaciones cruzadas entre las variables de EA para un ensayo en particular, se procedió a seleccionar el valor mayor de cada serie de correlación y generar una matriz diagonal con los valores máximos de correlación para cada par de parámetros de EA evaluados. En la Tabla 3.8 se muestra como ejemplo del procedimiento la matriz diagonal de correlación de Pearson para el ensayo A2a2 y 15 parámetros de EA. La diagonal de valores 1 queda generada por la autocorrelación del parámetro.

Tabla 3.8. Ejemplo de la matriz de valores máximos de correlación de Pearson para el ensayo A2a2 donde se resaltan los valores de correlación iguales o superiores a 0.8.

A a2	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG-STRNGTH	ABS-ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1	0.286703	0.395126	0.3161819	0.531097	-0.21203	0.300104	0.302617	0.832014	0.100537	-0.3578843	0.27732541	0.228504523	0.008277	-0.0173822
COUN	0.286703	1	0.852576	0.9841721	0.625554	-0.0741	0.539288	0.439299	0.344698	0.093734	-0.1173845	0.987829286	0.914655735	0.028978	0.01467717
ENER	0.395126	0.852576	1	0.8834981	0.788144	-0.11704	0.62044	0.53992	0.46075	0.110774	-0.1745927	0.834893514	0.733197945	0.032784	0.0145601
DURATION	0.316182	0.984172	0.883498	1	0.65683	-0.0993	0.552661	0.46362	0.349876	0.087052	-0.1425365	0.969436008	0.872226526	0.030236	0.01321341
AMP	0.531097	0.625554	0.788144	0.6568298	1	-0.27863	0.565353	0.530262	0.61286	0.150326	-0.3872123	0.618995232	0.549646942	0.001999	-0.01982703
A-FRQ	-0.21203	-0.0741	-0.11704	-0.0992967	-0.27863	1	-0.10463	-0.12022	-0.14033	-0.09305	0.6394222	-0.074124578	-0.0531947	0.017011	0.02246037
RMS	0.300104	0.539288	0.62044	0.5526606	0.565353	-0.10463	1	0.940838	0.341324	0.081892	-0.1512827	0.546181991	0.50999162	0.011268	-0.01532704
ASL	0.302617	0.439299	0.53992	0.46362	0.530262	-0.12022	0.940838	1	0.330044	0.073319	-0.1692894	0.436021619	0.3850187	-0.0325	-0.06877804
PCNTS	0.832014	0.344698	0.46075	0.3498758	0.61286	-0.14033	0.341324	0.330044	1	0.10068	-0.2438219	0.331451313	0.289177627	0.012029	-0.00877297
R-FRQ	0.100537	0.093734	0.110774	0.087052	0.150326	-0.09305	0.081892	0.073319	0.10068	1	-0.1586282	0.088873177	0.080640858	-0.00334	-0.0024054
I-FRQ	-0.35788	-0.11738	-0.17459	-0.1425365	-0.38721	0.639422	-0.15128	-0.16929	-0.24382	-0.15863	1	-0.114981134	-0.087717484	0.026327	0.03311339
SIG-STRNGTH	0.277325	0.987829	0.834894	0.969436	0.618995	-0.07412	0.546182	0.436022	0.331451	0.088873	-0.1149811	1	0.961202119	0.026319	0.01416203
ABS-ENERGY	0.228505	0.914656	0.733198	0.8722265	0.549647	-0.05319	0.509992	0.385019	0.289178	0.080641	-0.0877175	0.961202119	1	0.021523	0.01346901
C-FRQ	0.008277	0.028978	0.032784	0.0302355	0.001999	0.017011	0.011268	-0.0325	0.012029	-0.00334	0.0263275	0.02631941	0.021522735	1	0.98234894
P-FRQ	-0.01738	0.014677	0.01456	0.0132134	-0.01983	0.02246	-0.01533	-0.06878	-0.00877	-0.00241	0.0331134	0.014162028	0.01346901	0.982348	1

3.7.4. Análisis de autocorrelación y correlación cruzada para los Hits de EA

Los parámetros extraídos de los Hits de las señales de EA medidas durante los ensayos de las perforaciones permitieron realizar un análisis de correlación de los hits de EA. Los parámetros analizados son Amplitud, Energía MARSE, RMS, Frecuencia promedio, ASL y Cuentas. Los ensayos seleccionados para los análisis de autocorrelación y correlación cruzada son los *A1a1*, *A1a2*, *A1a3* y *CP1a1*, *CP1a2*, *CP1a3*. En el caso de la correlación cruzada se realizó una reducción dimensional del número de puntos (Hits) del ensayo de mayor tamaño respecto al más chico y de esa manera igualar la cantidad de puntos Hits por ensayo.

Este proceso de decimación se realizó de manera iterativa mediante la extracción de puntos en función de la relación de tamaño de las muestras. Una vez realizada la decimación, y con señales compuestas por igual cantidad de puntos (Hits), cada una de las señales fue graficada nuevamente para corroborar la similitud entre la señal original y la reducida. La Fig. 3.49 muestra el parámetro ASL (para el ensayo CP1a2) el cual sufrió una reducción de 5072 hits tomados a lo largo del ensayo. Los ajustes del número de Hits entre los ensayos oscilaron entre los 3000 a 10000 puntos. Allí se observa que la decimación reduce el número de muestras, pero no modifica significativamente la tendencia general de la señal ni la duración total del ensayo.

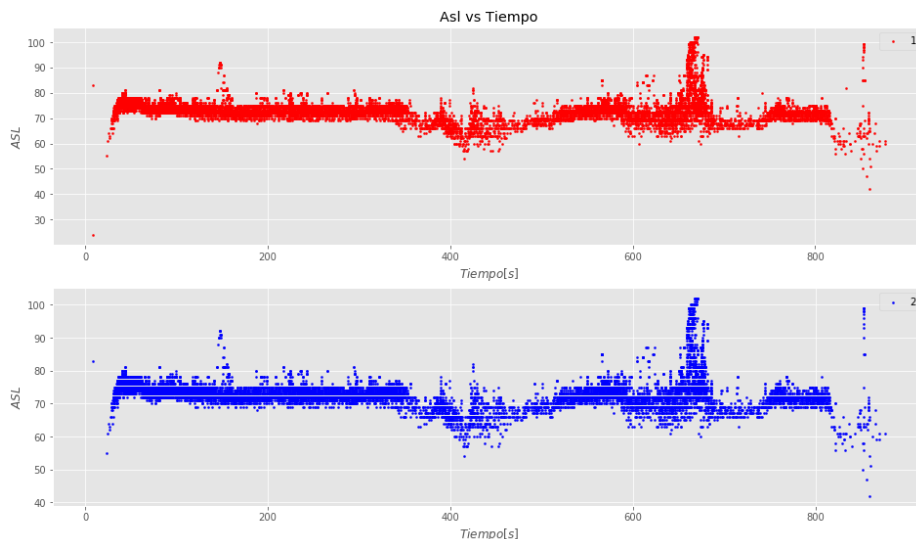


Fig. 3.49. Gráfico de señal del parámetro ASL de un ensayo de perforación sin reducción (roja) y luego del proceso de decimación (azul). La decimación reduce el número de muestras, pero no modifica la tendencia general de la señal.

En la Tabla 3.9 a se especifica la combinación de las correlaciones realizadas entre los ensayos de perforación. Luego en la Tabla 3.9 b se muestran los valores finales en cantidad de Hits utilizados para cada ensayo en la correlación A*B. Algunos ensayos pueden haber sido modificados en su cantidad de Hits más de una vez según las señales que se necesitaron comparar.

Tabla 3.9. a. Resumen de operaciones de autocorrelación y correlación cruzada entre ensayos. **b.** Número final de hits de EA para los ensayos de perforación que serán analizados mediante correlación estadística de la señal.

Señal A de correlación	Señal B de correlación	Ensayo	Cantidad de Hits reducidos para correlación
Aa1	A 1a1	A1a1	103169
	A 1a2	A1a1	95223
	A 1a3	A1a2	103169
A1a2	A 1a2	A1a2	95223
	A 1a3	A1a3	95223
A1a3	A1a3		
CP2a1	CP2a1	CP2a1	30695
	CP2a2	CP2a2	35867
	CP2a2	CP2a2	30695
	CP2a3	CP2a3	30695
	CP2a3	CP2a3	35867

Las operaciones de adaptación de las señales, cálculo de correlación y análisis gráficos se realizaron con varios programas, entre ellos Matlab, Origin Pro y la librería Numpy de Python. Para la operación de cálculo de la correlación de señales se utilizó específicamente la función `numpy.correlate`, la cual correlaciona dos secuencias unidimensionales. Este cómputo se puede definir de manera general como se define en los textos de procesamiento de señales.

$$C_{\{av\}}[k] = \sum_n^k a[n+k] * v^*[n] \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde a y v representan las secuencias de datos, n y k son los números de puntos de cada secuencia y v^* representa el conjugado de v . Las rutinas de cálculo utilizadas para compilar y procesar la información de EA fueron programadas por personal del grupo de trabajo del GEA de la UTN. A modo de ejemplo en la Fig. 3.50 se muestran las figuras de autocorrelación del ensayo A1a1 para los parámetros Amplitud, ASL, RMS, Energía MARSE, Duración, Cuentas, Frecuencia promedio y Rise Time. La información de todos los parámetros correlacionados se encuentra disponible en el anexo A.

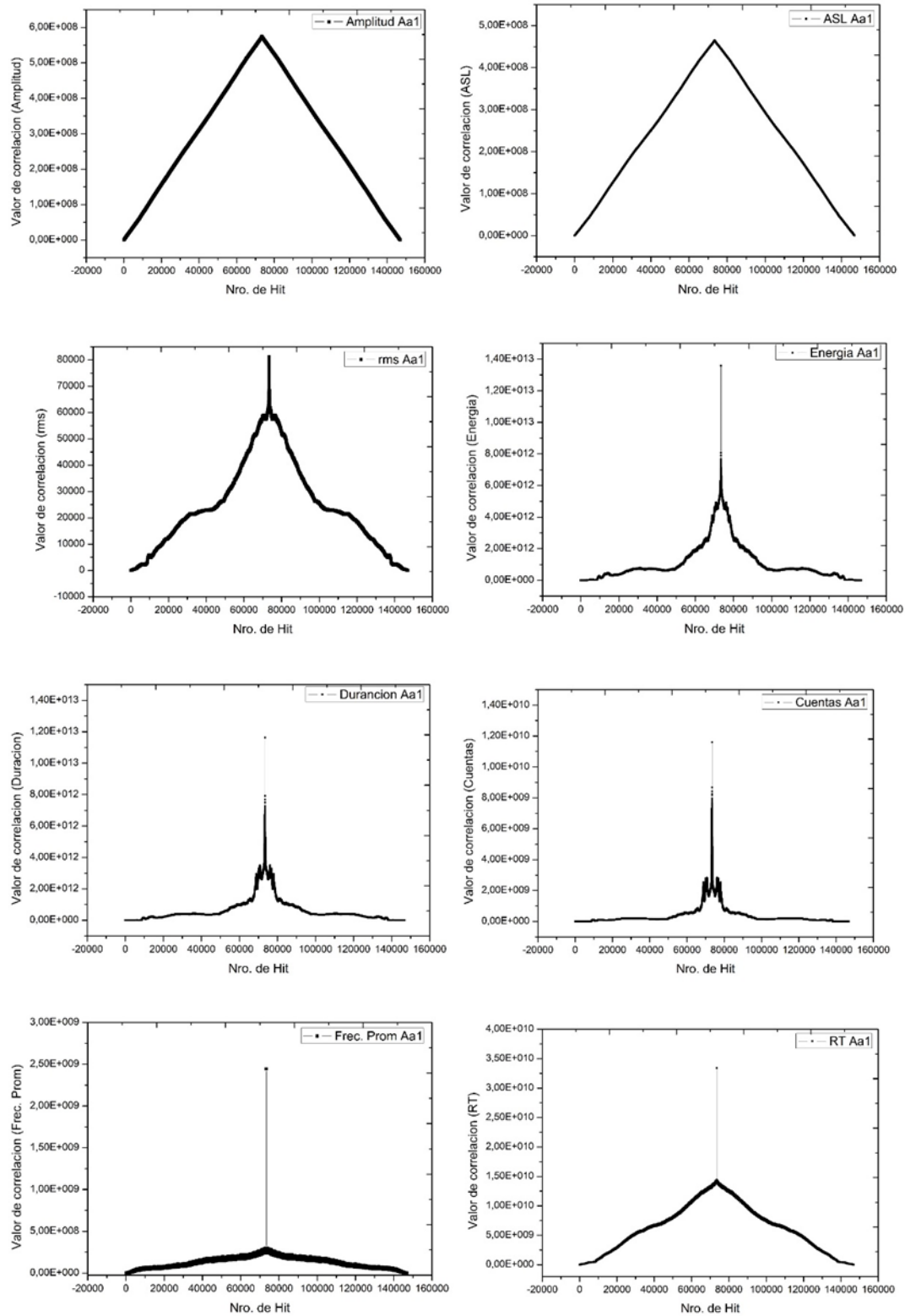


Fig. 3.50. Gráficos de la autocorrelación de la señal paramétrica de EA para el ensayo A1a1.

Una vez obtenidos los resultados de los gráficos de correlación, se comenzó con el proceso de identificación de los puntos de correlación (Hits) seleccionados y el tiempo que estos representan para el ensayo de perforación. Para esto, se identificaron parámetros de EA que indicaban cambios de correlación marcados o variaciones apreciables. En la Fig. 3.51 se

muestran como un ejemplo las ampliaciones de la correlación para el parámetro cuentas de EA del ensayo A1a1 donde se demarcan zonas de variación de la señal que luego serán analizadas en los resultados.

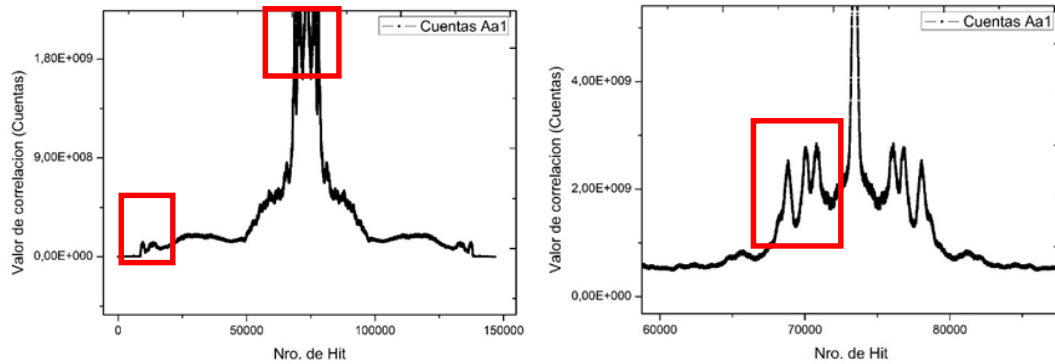


Fig. 3.51. Demarcación de posibles puntos de análisis sobre gráficos de autocorrelación de cuentas de EA para ensayo A1a1.

Como las variables correlacionadas están evaluadas en las mismas unidades, no se establece como necesario normalizar la información antes de realizar la operación entre los datos. Una vez definidos los puntos de correlación a analizar se procedió a identificarlos temporalmente para establecer las posiciones relativas de las dos señales correlacionadas, ahora en escala temporal. Esto se puede realizar debido a que cada Hit recolectado por el sistema de EA está asociado a un tiempo respecto de un reloj interno del equipo. Este tiempo puede o tener una relación lineal con el número de Hit. Cuando se mide una emisión estacionaria en la frecuencia de vibraciones mecánicas, para alineación y balanceo de equipos rotantes, por ejemplo, la frecuencia de muestreo suele ser constante y en un número de veces superior, lo suficientemente alejado de la frecuencia de Nyquist para evitar Aliasing. Esto permite mediante el cálculo de correlación, establecer diferencias de tiempo o desfase de dos señales correspondientes a la misma fuente. En este sentido, el muestreo de los Hits de EA no es constante y depende en parte de la actividad de la fuente y la configuración del sistema de medición. Este tiempo asociado a cada dato de información o “Hit” puede ser utilizado para sincronizar las dos señales de EA comparadas mediante el método de correlación buscando en la tabla de datos, el tiempo correspondiente a la posición (o Hit) de correlación especificada. Una vez determinados los valores equivalentes en tiempo para los dos ensayos correlacionados, se puede utilizar el tiempo de los ensayos y superponer los mismos para observar las partes de las señales involucradas al momento de una dada correlación y así analizar si están relacionadas con la condición de perforación en ese instante. Esto puede

observarse en la superposición de la Fig. 3.52 donde se muestra la relación entre un punto de la correlación y el posicionamiento relativo de los ensayos en ese momento.

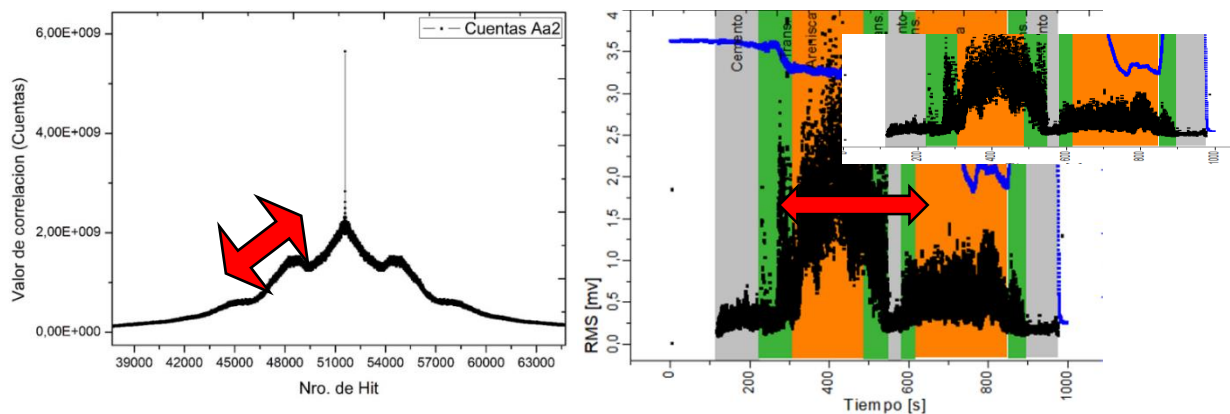


Fig. 3.52. Comparación de la autocorrelación del parámetro cuentas de EA del ensayo A1a2 y la correspondiente relación en tiempo para el parámetro rms del mismo ensayo. A medida que nos movemos en el gráfico de autocorrelación, es como deslizar el ensayo temporal A1a2 sobre diferentes partes del tiempo.

3.7.5. Pre-procesamiento de datos y configuración general de las RN Kohonen

Los vectores de información ingresados las RNK se componen de 5 variables de EA seleccionadas en función de los análisis de correlación de Pearson

$$V_{entrada\ 5\ variables} = [amplitud - rms - nro.de\ cuentas - rise\ time - frecuencia\ promedio]$$

Los tramos de señales seleccionados en los diferentes ensayos sobre los cuales se toman los vectores de información debieron ser sometidos a un pre-procesamiento con el fin de **normalizar los valores** de las variables (debido a su diferencia en valores absolutos y unidades de medición) e igualar aproximadamente la dimensión de los archivos.

La información paramétrica correspondiente a los intervalos de tiempo especificados (intervalos de interés), se someten, en algunos casos, a un proceso de reducción de cantidad de datos para los archivos más largos a fin de ingresar con una cantidad de información comparable en cada lote. El proceso de adquisición y registro de la EA considera la tasa de emisión de los Hits, donde en función del umbral establecido, y la cantidad de señal que supere dicho umbral, la tasa de emisión puede ser alta o baja. Es debido a esto que en cierta parte de los ensayos de perforación pueden encontrarse tramos con una cantidad de datos mucho mayor que otras partes del mismo agujero perforado. Este proceso de reducción también conocido como decimación (aunque no precisamente debe ser en base 10) se realizó para todos los lotes de información que se iban a comparar en una red determinada cuando

la cantidad de datos de un segmento es significativamente mayor que el resto. Se evaluó el tamaño relativo de los archivos de mayores dimensiones respecto de los de menor dimensión y se pudo identificar la relación de reducción en cada caso. Esto dio como resultado lotes de archivos que promedian 1004 (+- 77) datos y lotes que promedian 515 (+- 18) datos. Una vez que los lotes de archivos se encuentran en relaciones de tamaño comprobables, se procede a la normalización, donde los datos dentro de cada archivo son escalados o normalizados. Los tipos de escalados utilizados en el caso de la presente tesis son *auto escalado* y escalado tipo *min-máx*.

Escalado auto escalado:

$$x_{escalado} = \frac{x_{promedio} - x_i}{s_{muestra}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde $x_{promedio}$ y $s_{muestra}$ corresponden al promedio (media aritmética) y la varianza respectiva de la muestra. El Auto Escalado da una distribución de datos centrada en el promedio.

Escalado min-máx:

$$x_{escalado} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Donde x_{max} y x_{min} representan los valores máximos y mínimos de la serie de datos ingresada. El escalado *min-máx* da como resultado una estandarización de los valores entre 0 y 1. Una vez escalados los datos, estos son mezclados de manera aleatoria dentro de cada lote y separado en dos partes, de manera de crear un lote de entrenamiento y un lote de predicción con igual cantidad de puntos. La tabla 3.10 presenta un resumen de todos los lotes de datos procesados donde figura la forma de escalado, tamaño original y reducido de los VD para cada tramo de archivo seleccionado.

Los parámetros de EA pueden ser utilizados para entrenar RNK con el fin de clasificar la información. El proceso de entrenamiento y simulación de este tipo de RNK requiere generar la arquitectura de la red para el procesamiento de la información paramétrica correspondiente a los diferentes ensayos. Estos tramos de información de EA son representativos de características propias de la perforación (tipo, forma y condición de corte de la herramienta) y de la probeta (materiales) que está siendo taladrada. En base a lo anterior, los casos de entrenamiento se fueron realizando de manera progresiva donde inicialmente se aplicó el entrenamiento de la RNK al análisis de dos procesos de perforación con diferente condición de corte debido a la geometría del cortador y posteriormente el entrenamiento se orientó a reconocer diferentes condiciones de corte en función de los

materiales perforados. Los primeros tipos de arquitecturas y entrenamientos se orientaron a reconocer dos condiciones de filo de la broca de corte de carburo de tungsteno. Una condición se clasificó como filo bueno (FB) y la otra como filo fracturado (FF) donde los efectos y detalles de las condiciones de estos filos se exponen la sección 3.2.4. del presente capítulo. Durante la segunda etapa, el entrenamiento se orientó a reconocer las condiciones de corte sobre diferentes litologías para el mismo tipo de cortador (carburo de tungsteno). Toda la información procesada por las redes en esta etapa pertenece a perforaciones en condición de *filo FB*.

De esta manera, en el ejemplo se muestra cómo se pueden comparar dos ensayos de la misma probeta en condiciones muy similares de corte hasta el momento de la fractura. A partir de ello, se establecen dos grandes grupos de clasificación, que son corte con FB y FF. Con esta información seleccionada se pueden individualizar los Hits pertenecientes a cada condición y luego del post procesado se puede comenzar con el entrenamiento de diferentes arquitecturas de RNK. En la Fig. 3.53 se observa el resultado del entrenamiento de una de las arquitecturas de red probadas donde además de las etiquetas FB y FF se asocian colores verde y rojo a los respectivos estados de la herramienta para más facilidad de interpretación de los resultados. Estos mapas topológicos, demarcan zonas de clasificación donde la información semejante se agrupa por similitud, formando clústeres de clasificación. Los casilleros “vacíos” representan neuronas que no han resultado ganadoras en el proceso de competencia durante el entrenamiento, pero aun así tienen sus pesos ajustados debido al proceso de ajuste de sus neuronas vecinas. Una vez realizado el proceso de entrenamiento se procede a la verificación de la eficiencia de la red corriendo el lote de datos de predicción separado con antelación. Estos datos nunca fueron vistos por la red, por lo que son totalmente nuevos, y en nuestro caso tienen las mismas dimensiones que el lote de entrenamiento.

La segunda fase de entrenamiento se aplica al reconocimiento de la EA perteneciente al proceso corte en condición FB sobre las diferentes litologías (materiales). Al igual que en la etapa anterior los datos fueron seleccionados temporalmente, pero esta vez según las condiciones de corte que se crean cuando se taladran materiales con diferentes propiedades geomecánicas. La información corresponde a taladrado en cuatro litologías diferentes. Estos son, taladrados en roca Arenisca (A), roca Caliza (C), roca Pizarra (P) y en el cemento de unión entre todas las capas (M). Para esto, se utilizaron dos redes diferentes que clasificaron la información dentro de cada lote (Lote 1 y Lote 2).

Tabla 3.10. Información general de VD para procesos de entrenamiento y simulación para las RNK.

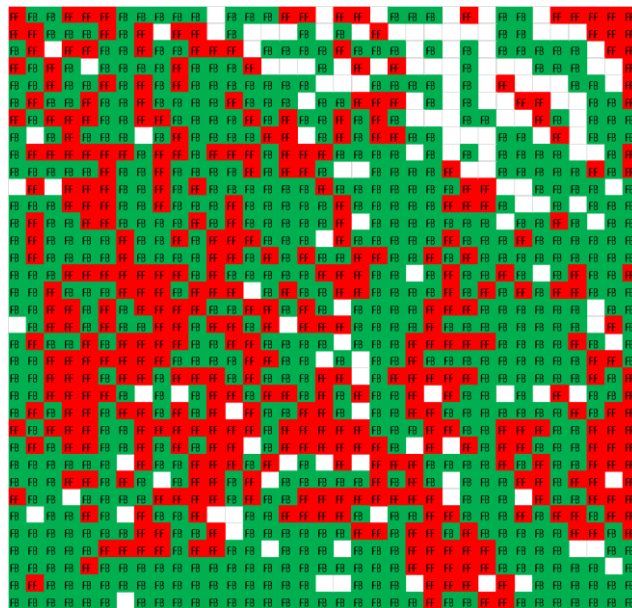
Variables	Ensayo	T. Inicio (\$)	T. Fin (\$)	Identificador en mapa RNK	Numero de VD Original	Numero de VD Final (reducidos)	Cantidad Total de Vectores Datos	Tipo de escalado utilizado	Utilización del lote de información	Numero de VD
V5 (cinco variables de EA)	C1a2	187	294	FB	4191	1048	7358	Autoescalado	Entrenamiento	3679
	C1a2	515	601	FB	1915	938				
	C1a2	356	450	FB	5637	1128				
	C1a2	670	768	FB	2667	1334				
	C1a3	315	427	FF	2286	1143				
	C1a3	693	868	FF	2268	1134				
	C1a3	507	616	FF	540	540				
	C1a3	926	971	FF	73	73				
	C1a1	256	337	M	2008	501				
V5 (cinco variables de EA)	A1a1	434	695	A	19412	607	7456	Autoescalado	Entrenamiento	3728
	A1a1	753	817	M	5776	578				
	A1a1	871	1017	A	17627	551				
	A1a1	1100	1165	M	898	580				
	A1a2	119	218	M	2235	559				
	A1a2	313	477	A	9041	754				
	A1a2	552	576	M	199	199				
	A1a2	626	841	A	22437	561				
	A1a2	902	968	M	133	133				
	A1a3	49	218	M	4425	554				
	A1a3	288	422	A	4893	612				
	A1a3	472	565	M	576	576				
	A1a3	622	840	A	24387	555				
	A1a3	930	944	M	136	136				
	CP1a1	103	332	M	5461	547				
	CP1a1	393	511	C	680	680				
	CP1a1	543	613	M	338	338				
	CP1a1	653	752	P	6795	567				
CP1a1	800	918	M	447	447					
CP1a2	42	296	M	8325	521					
CP1a2	353	495	C	1149	575					
CP1a2	525	572	M	1083	542					
CP1a2	618	729	P	2587	518					
CP1a2	785	805	M	296	296					
CP1a3	121	355	M	13295	512					
CP1a3	413	590	C	1418	473					
CP1a3	622	645	M	835	835					
CP1a3	683	789	P	3166	528					
CP1a3	826	885	M	1853	618					
V5 (cinco variables de EA)	CP1a1	393	511	C	680	680	7997	Autoescalado	Entrenamiento	3998
	CP1a1	543	613	M	338	338				
	CP1a1	653	752	P	6795	567				
	CP1a1	800	918	M	447	447				
	CP1a2	42	296	M	8325	521				
	CP1a2	353	495	C	1149	575				
	CP1a2	525	572	M	1083	542				
	CP1a2	618	729	P	2587	518				
	CP1a2	785	805	M	296	296				
	CP1a3	121	355	M	13295	512				
	CP1a3	413	590	C	1418	473				
	CP1a3	622	645	M	835	835				
	CP1a3	683	789	P	3166	528				
	CP1a3	826	885	M	1853	618				

Tabla 3.11. Selección de tiempos para los ensayos C1a2 y C1a3, donde, para este último, a partir de los 315s el ensayo se desarrolla en condición de FF.

	CEMENTO 1 (s)		ROCA 1 (s)		CEMENTO 2 (s)		ROCA 2 (s)		CEMENTO 3 (s)		Material Perforado
C a2	69	142	187	294	356	450	515	601	670	768	CALIZA
C a3	179	258	315	427	507	616	693	868	926	971	CEMENTO



Perforación con filo fracturado (FF)
para ensayo C a3



FB	Filo Bueno
FF	Filo Fracturado

Fig. 3.53. Ejemplo de mapa de entrenamiento para condiciones de corte FB y FF.

También se estableció un código de letras y colores con el fin de interpretar rápidamente los resultados. Los ensayos e intervalos temporales seleccionados para la clasificación de las condiciones de corte en diferentes materiales se muestran en la Tabla 3.12

Tabla 3.12. Intervalos de tiempo para la clasificación de la perforación en diferentes estratos rocosos.

ENSAYO	CEMENTO 1 (s)		ROCA 1 (s)		CEMENTO 2 (s)		ROCA 2 (s)		CEMENTO 3 (s)		Lote de entrenamiento	MATERIAL	Código para RNK
A a1	253	337	434	695	753	817	871	1017	1100	1165	Lote 1	ARENISCA	A
A a2	119	218	313	477	552	576	626	841	902	968		CALIZA	C
A a3	49	218	288	422	472	565	622	840	930	944		PIZARRA	P
CP a1	103	332	393	511	543	613	653	752	800	918	Lote 2	CEMENTO	M
CP a2	42	296	353	495	526	572	618	729	785	805			
CP a3	121	355	413	590	622	645	683	789	826	885			

Las características de las arquitecturas de las RNK utilizadas en cada caso, así como los parámetros de ajuste de estas se explican en el capítulo introductorio correspondiente. En la sección de resultados se muestra al lado de cada red entrenada los valores de los parámetros de configuración para cada caso.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen primeramente los resultados correspondientes a la validación de la instrumentación de la herramienta, mediante la guía de ondas hidráulica, para la adquisición de la EA de la perforación. Posteriormente se exponen y discuten los resultados de la EA adquirida durante los ensayos de perforación de probetas de geomaterial y su correlación con la posición de la broca, la PR y los relevamientos estratigráficos de las perforaciones. Finalmente, la discusión se extiende al análisis de diferentes técnicas para la interpretación de la información.

4.1 Resultados de la caracterización de la cadena de medición de EA

4.1.1. Resultado de calibraciones primarias

La caracterización de la cadena de medición comprende una parte fundamental del sistema de perforación debido a que la EA es conducida mediante un camino sónico que comprende la emisión producida por el *filo cortador* hacia el *cuerpo cilíndrico de broca* y posteriormente al *Anillo líquido* donde se aloja el sensor piezoeléctrico. Esta cadena de medición permite el libre giro de la herramienta y la capacidad de hacer un monitoreo continuo del proceso. Una vez construido el sistema de acople sensor –perforadora, se debió analizar los posibles caminos sónicos, su efectividad en la transmisión de las señales de EA, el nivel de atenuación en función de la distancia, y otras variables de importancia para caracterizar el sistema. En base a la Fig. 4.1 se muestra un esquema de algunos caminos sónicos entre la fuente en el extremo del filo de corte y el sensor de EA.

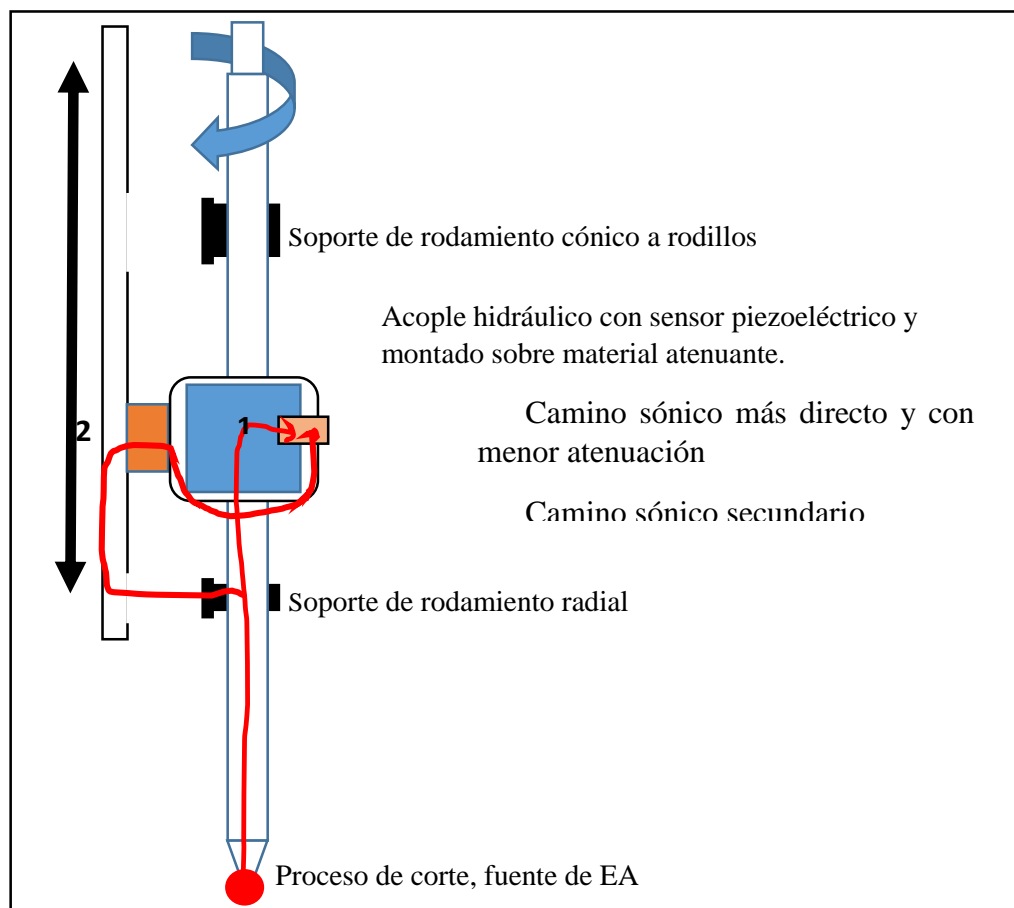


Fig. 4.1. Esquema de posibles caminos sónicos para la EA proveniente de la punta de la herramienta, donde el camino 1 es el camino directo al sensor a través del sistema de acople hidráulico y el camino 2 es un camino alternativo a través de los anclajes de los rodamientos radiales y sistema de acople hidráulico.

En el proceso de caracterización se comprobó que la EA transmitida al sistema de medición de EA, mediante el canino secundario marcado en la Fig. 4.1 que comprende los anclajes del rodamiento radial y los de soporte del sistema de acoplamiento hidráulico es extremadamente bajo. El procedimiento de ensayo contempló la aplicación de múltiples fuentes simuladas de EA en diferentes partes y componentes de la máquina. Esta estimulación controlada se realizó mediante el método Hsu Nilsen (Asociación Mercosur de normalización, NM 303 2005). Las emisiones medidas para el camino sónico secundario no lograron pasar a través de los materiales atenuadores colocados entre la fuente y el sensor de EA los cuales fueron considerados en la fase de diseño inicial del prototipo, implementando materiales como madera, goma y viton en las interfaces de unión que absorben y atenúan la emisión de gran manera en comparación con el metal. Otros caminos de EA fueron también evaluados, como las emisiones que podrían producirse y viajar por los soportes de rodamientos cónicos, el motor, la caja de reducción y el carro de traslación. Estas resultaron ser todas más atenuadas que las provenientes de la punta de la broca, la cual se encuentra a más del doble de distancia que los componentes anteriormente citados.

La Fig. 4.2 muestra uno de los ensayos de caracterización, donde se observan tres diferentes grupos de fuentes de ondas elásticas correspondientes a golpes mecánicos, fuentes simuladas (Hsu Nielsen) y emisiones naturales relacionadas al funcionamiento de la perforadora.

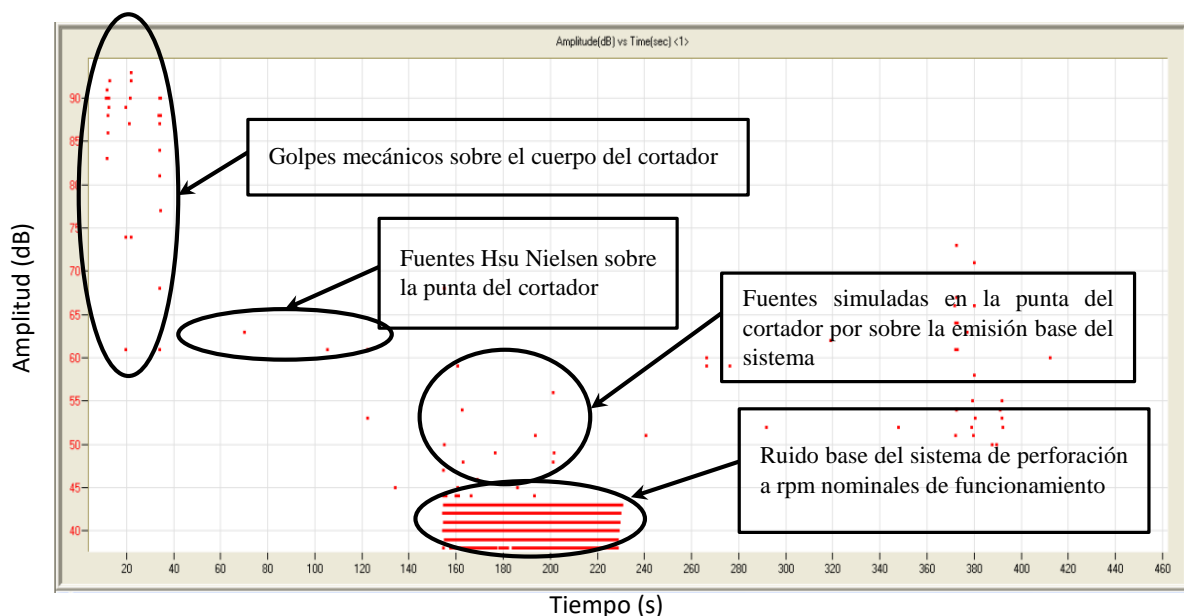


Fig. 4.2. Amplitud de la EA correspondiente a diferentes fuentes realizadas sobre la punta de la broca.

La emisión del sistema en funcionamiento corresponde a la cadena cinemática del motor, lumbrera, caja reductora y rodamientos que está por debajo de los 45 dB como se aprecia en

la Fig. 4.2. Esta emisión es la natural del sistema por el simple hecho de estar en funcionamiento. Cualquier emisión producto de la perforación por debajo de este límite no podrá ser claramente identificada debido a que se mezcla con la emisión natural del sistema, haciendo muy dificultoso reconocer su origen. Las fuentes Hsu Nielsen realizadas en el extremo del cortador muestran valores promedios de 63 dB de amplitud, los cuales son relativamente altos si se considera que este evento es producto de la rotura de una mina de lápiz de 0.5 mm de espesor a una distancia apreciable del sensor. La atenuación desde la punta del cortador hasta el sensor es de aproximadamente 34 dB para la fuente Hsu Nielsen, la cual tiene una amplitud promedio de 99 dB cuando se ejecuta al lado del sensor. Una comparación directa, indica que la EA de la caja de reducción, el motor eléctrico y otros componentes está siendo atenuada fuertemente ya que el Hsu Nielsen que se produce a más del doble de distancia que estos componentes tiene una amplitud aproximadamente diez veces mayor que el ruido de fondo del sistema.

La Fig. 4.3 muestra el registro en tiempo (forma de onda) y espectro de potencia de la emisión de una fuente simulada Hsu Nielsen realizada en la punta de la herramienta de corte y siendo captada por el sensor luego de recorrer todo el camino sónico. Esta señal tipo explosión se muestra con la distorsión propia provocada por el camino y las diferentes interfases que debe atravesar antes de llegar al sensor. La misma es discreta en tiempo, y muestra un rápido aumento de la señal hasta la máxima amplitud (aprox. 250 μ s) y un lento decaimiento posterior (más de 3500 μ s). Adicionalmente se observa gran parte de la energía se conserva en el rango de 80 kHz a 550 kHz. Este tipo de emisión tipo explosión está relacionada con procesos de corte, fractura, y otros mecanismos, los cuales, según la tasa de emisión de estas señales discretas, pueden eventualmente formar un patrón continuo de forma compleja.

Las Fig. 4.4 muestra un tipo de emisión continua y periódica y su correspondiente espectro de potencia. Esta emisión corresponde al ruido de fondo del sistema producto del funcionamiento del motor eléctrico, la caja de reducción y los rodamientos de soporte. Adicionalmente parte de esta señal puede ser inducida por el variador de velocidad electrónico el cual produce gran cantidad de emisión electromagnética

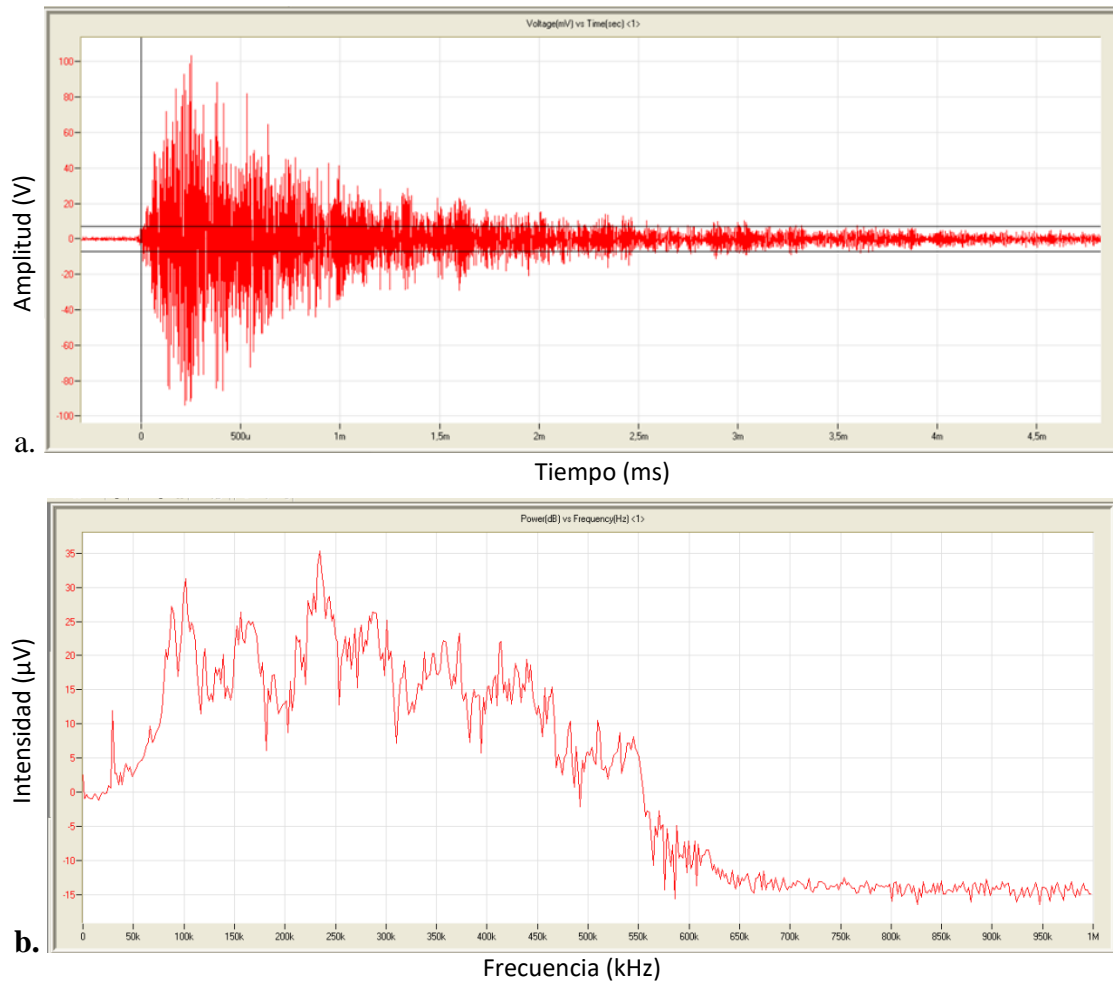


Fig. 4.3. Registro de la fuente Hsu Nielsen en la punta de la broca. **a.** Amplitud respecto al tiempo. **b.** Espectro de potencia.

. Estos tipos de señales continuas y periódicas concentran la mayor parte de la energía en el rango de 120 a 140 kHz y 170, 250, 275 kHz y su naturaleza no es completamente estocástica, sino que está relacionada con componentes mecánicos giratorios los cuales tiene una emisión cíclica por periodo de giro, por el contrario, las señales pertenecientes al proceso de perforación están más relacionadas con fenómenos aleatorios y eventualmente podrían tener componentes con menor periodicidad. A pesar de ello, cualquier señal que esté superpuesta dentro de este tipo de emisión es difícil de individualizar, y por lo que lo más recomendable es que el proceso que se desea monitorear este separado en amplitud de la presente emisión.

Finalizada la fase de caracterización de la cadena sónica de medición y el comportamiento de la misma, se procede a realizar los ensayos de perforación de las probetas de diferentes rocas cementadas en capas. Estas perforaciones se utilizaron para calibrar las variables del sistema de perforado, como ser las rpm y la presión de avance, establecimiento del equilibrio

dinámico entre las presiones de empuje y de retención, la velocidad de muestreo, la pre amplificación, la validación de datos de la guía de ondas durante el perforado, etc. Estos ensayos no serán analizados en la presente tesis, pero fueron de vital importancia para conocer y calibrar el sistema para los ensayos posteriores.

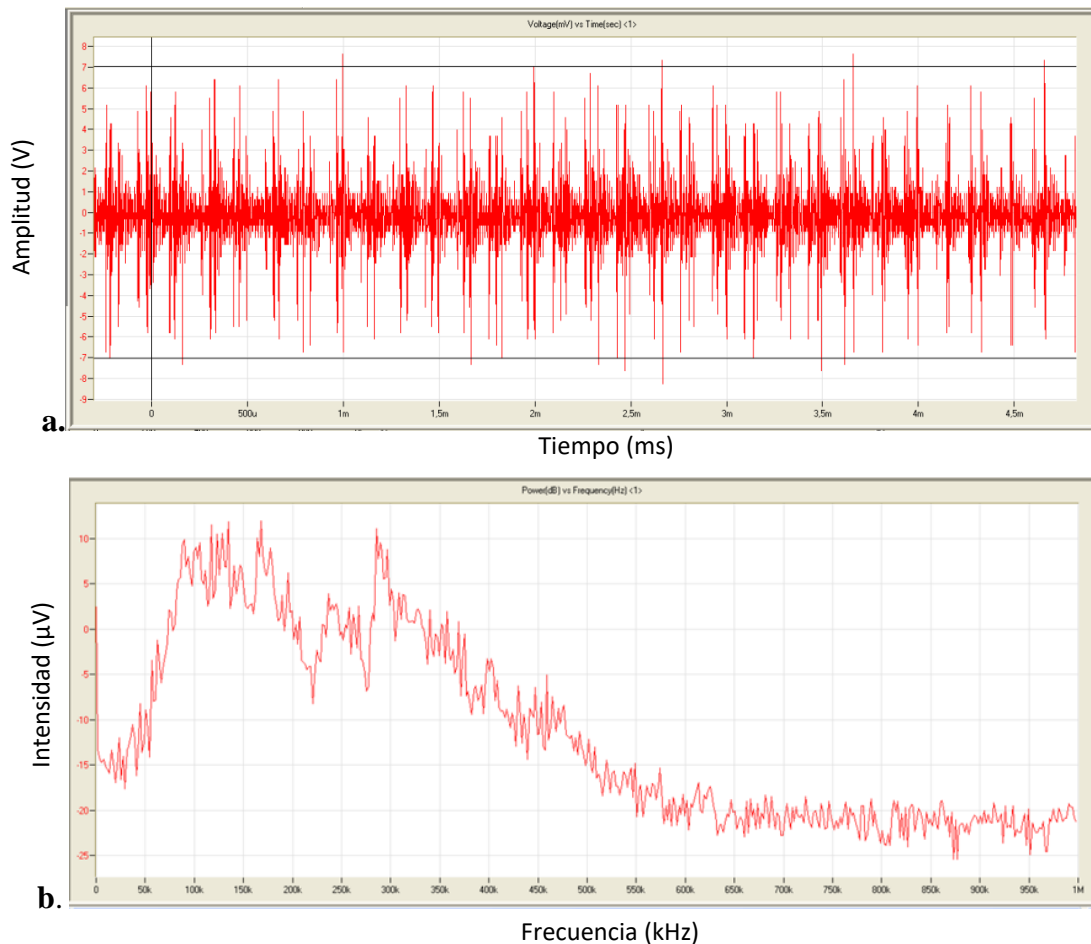


Fig. 4.4. Señal correspondiente al funcionamiento de la perforadora. **a.** Amplitud respecto del tiempo. **b.** Espectro de potencia.

4.1.2. Resultados de validación de la guía de ondas hidráulica respecto de la guía de onda cementada dentro de la probeta

En este apartado se busca evaluar los resultados de la adquisición de información de EA mediante la guía de onda hidráulica en comparación con una guía de onda cementada en el interior de la probeta. Estas mediciones fueron realizadas sobre las probetas de calibración donde el *canal 1* y *canal 2* representan la información proveniente de la guía de ondas hidráulica y la cementada en la probeta respectivamente.

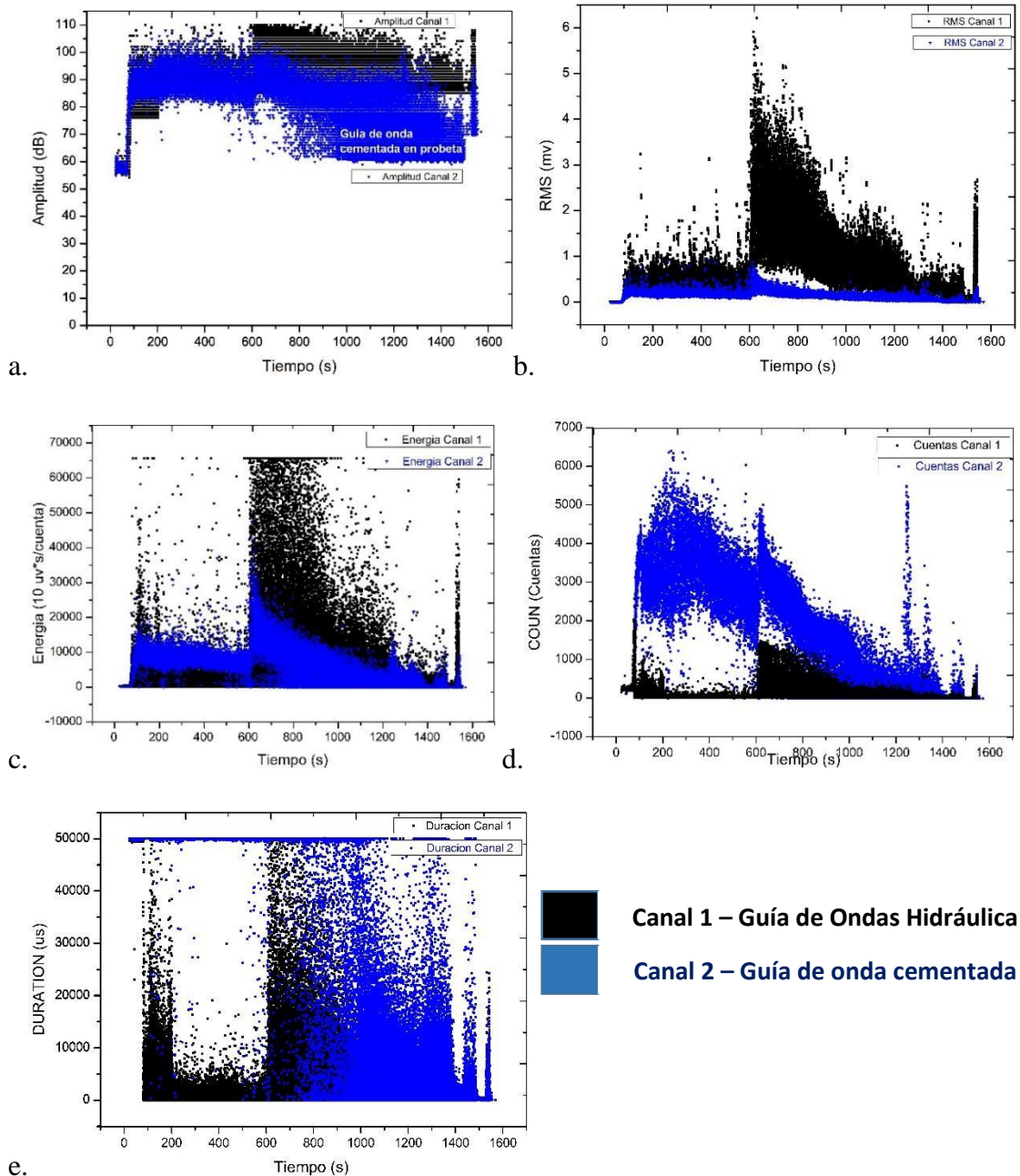


Fig. 4.5. Comparación de parámetros de EA para guía de ondas hidráulica (negro) y guía de onda cementada en probeta de calibración (azul). a. Amplitud. b. rms. c. Energía MARSE. d. Cuentas de EA. e. Duración máxima.

La Fig. 4.5 corresponde al monitoreo de la perforación en una probeta de calibración. Los canales 1 y 2 adquieren información de forma simultánea durante el proceso de perforación, y muestran cambios de la EA a medida que las capas de rocas y cemento son atravesadas por el cortador. Ambos canales manifiestan una correlación gráfica de los registros de Hits de EA durante el proceso de perforación. Esto implica que la guía de ondas hidráulica responde de manera similar ante las variaciones del proceso de corte cuando se la compara

con la guía de ondas cementada en la probeta. Esta última, es una forma tradicional de instrumentar estructuras mediante EA, pero en el presente estudio hace que sea necesario instalar una guía de ondas en cada una de las muestras a ensayar, mientras que, mediante la guía de ondas hidráulica, solamente se instrumenta la broca, pudiendo ensayar una gran cantidad de muestras con una misma configuración, lo que asegura que las propiedades del camino sónico se mantengan constantes a través del tiempo.

Tabla 4.2 Cálculo de valores promedio de parámetros de EA para perforación en probeta de calibración AC1.

	Cantidad de Hits	Amplitud promedio	rms promedio	Energía promedio	Nro de cuentas promedio	Duración promedio
	[Hits]	[dB]	[mV]	[10 uv*s/cuenta]	[Cuentas]	[us]
Canal 1	115759	88,86	0,9481	5525,34	56,21	3344,18
Canal 2	82260	73,89	0,0986	2318,76	677,03	14535,49

La tabla 4.1 muestra los valores de los parámetros de EA promediados respecto de la cantidad total de Hits del ensayo de prueba. La cantidad de emisión, la amplitud, el rms y la energía de EA del canal uno muestra valores superiores que los correspondientes al canal 2 (Fig. 4.5 a, b, c), lo que indica que canal 1 recibe la señal de la perforación con mayor potencia, y menor atenuación que el canal 2. La cantidad de hits y el rms de la señal muestran que el canal uno fue disparado un 40 % más de veces que el canal dos y la amplitud integrada en función del tiempo de la señal (RMS) es aproximadamente un orden de magnitud superior que la correspondiente al canal dos. Estas propiedades benefician el proceso de monitoreo mediante EA, ya que la guía de ondas hidráulica tiene la capacidad de registrar leves variaciones de emisión dentro del proceso de perforado que serán menos afectadas por la atenuación, es decir, tiene mayor sensibilidad que la guía de ondas cementada dentro de la probeta. Las variables cuentas y duración de EA muestran valores más altos en el canal dos, guía de ondas cementada, respecto del canal uno. La variación de los parámetros de EA en los resultados del canal uno y dos, está en parte relacionada con la dispersión que sufre la señal cuando atraviesa los diferentes caminos sónicos y de los sistemas de acoplamiento respectivo de cada camino.

El canal 1 tiene el sensor acoplado hidráulicamente sobre la herramienta que realiza el trabajo y que es la fuente de la EA durante el corte. Las ondas elásticas se propaguen desde el extremo de la broca a través del cuerpo metálico (de poca atenuación) para luego pasar al agua y finalmente al sensor del canal uno. En el caso del canal dos, las ondas se propagan desde el punto de corte entre el material y la herramienta a través del cemento o la roca (de

mayor atenuación que el metal) para luego pasar a la varilla metálica y posteriormente al sensor piezoeléctrico mediante un acoplante tipo grasa, que tiene el fin de igualar la impedancia acústica entre el sensor y el metal. Esto genera un camino con mayor atenuación para el sensor del canal dos, a pesar de estar montado a una distancia mucho menor que el sensor del canal uno colocado en la guía de ondas hidráulica. Otra diferencia observada entre los canales uno y dos, es que el canal dos recibe señales de mayor duración y número de cuentas que el canal uno (Fig. 4.5 d y 4.5 e). Esto puede estar relacionado con la dispersión que sufre la onda elástica al momento de atravesar los diferentes materiales. Los materiales poco homogéneos como la roca y el cemento, así como las diferentes interfaces de unión entre los elementos de la cadena de medición, constituyen un camino dispersivo para las ondas. Estos medios dispersivos distribuyen la energía de la onda sobre un ancho de banda de frecuencia más amplia y producen un desfase entre la velocidad de grupo respecto de la velocidad de fase de la onda. Como resultado un paquete de energía determinado en tiempo y frecuencia sufre una distorsión temporal donde en general aumenta en longitud, en frecuencias excitadas, modificando el número de cuentas y duración de la señal.

Los análisis llevados a cabo las probetas de calibración muestran que, tanto por la practicidad de implementación como por la sensibilidad del sistema de acoplamiento, la guía de ondas hidráulica puede ser utilizada para el monitoreo del proceso de perforado mediante la técnica de EA en la presente escala. Si bien para todos los ensayos la adquisición se realizó de manera paralela con los dos canales, los resultados y análisis posteriores, expuestos en la presente tesis, corresponden únicamente a la información perteneciente a la guía de ondas hidráulica ya que parte del objetivo del presente trabajo consiste en considerar la instrumentación de la herramienta rotante para el monitoreo del proceso de manera sencilla y efectiva.

4.2 Resultados del monitoreo de las perforaciones mediante Emisión Acústica, Presión de Retención (PR) y Registro de Video (RV)

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos mediante el monitoreo continuo de la EA generada durante el proceso de perforación de diferentes probetas (Ver tabla general de ensayos 3.8, Cap. 3). En los gráficos analizados se representa la evolución temporal de los parámetros de EA respecto del proceso de perforado a medida que la broca de corte penetra en la probeta atravesando las diferentes interfaces de la misma. Adicionalmente se grafica también la presión de retención hidráulica del sistema (PR) para cada perforación. Finalmente, mediante el análisis de las filmaciones, el registro de la posición del carro de

avance y el relevamiento estratigráfico del agujero taladrado, se establece la posición relativa entre el cortador y los estratos del geo material de cada probeta en cada instante de tiempo.

4.2.1. Resultados de perforación en probeta Caliza (C1), agujeros a2-a3-a4

En la tabla 4.2 se muestran las características generales de las perforaciones elaboradas en la probeta compuesta por dos capas de roca *Caliza* cementadas denominada C1, tabulándose para cada agujero el tipo de filo cortador (broca), la velocidad de avance promedio y otros datos característicos del ensayo. En las Fig. 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los parámetros de EA y las PR que resultaron del monitoreo de cada una de las perforaciones. Todos los parámetros muestran variaciones importantes a medida que la broca aumenta la profundidad de penetración, debido a que, con esta variación de la profundidad, se van atravesando distintos materiales. En la parte **a** de las Figs. 4.6, 4.7 y 4.8, se puede observar que el parámetro Amplitud de EA se comporta de manera regular durante todo el ensayo donde las diferencias mostradas entre la base de la emisión y sus máximos eventualmente llegan a 20 dB de diferencia. Dado que la escala de la Amplitud es logarítmica, las variaciones mostradas no son claramente marcadas como en otros parámetros (valor rms, Fig. 4.6b, 4.7b, 4.8b). El rms muestra variaciones puntuales más marcadas durante el desarrollo de la perforación. Cuando el rms de la señal muestra un aumento de su valor es porque existe una tendencia verdadera de aumento de amplitud en la señal de EA. Los parámetros energía MARSE, cuentas y duración (Fig. 4.6 c, d, e, 4.7 c, d, e, 4.8 c, d, e) también exhiben diferentes zonas de marcada emisión, mientras que las Fig. 4.6f, 4.7f, 4.8f que corresponden a la PR muestra zonas de importante disminución y recuperación del valor de la presión de retención.

Tabla 4.2 Resumen de características generales de los ensayos en probeta C1.

Ensayo	Filo cortador	Velocidad promedio	Observaciones
C1a2	2 Filos / CT	0.368 mm/s	
C1a3	2 Filos / CT	0.309 mm/s	Fractura de Filo
C1a4	4 filis / SAE O2	0.3308 mm/s	Ensayo interrumpido

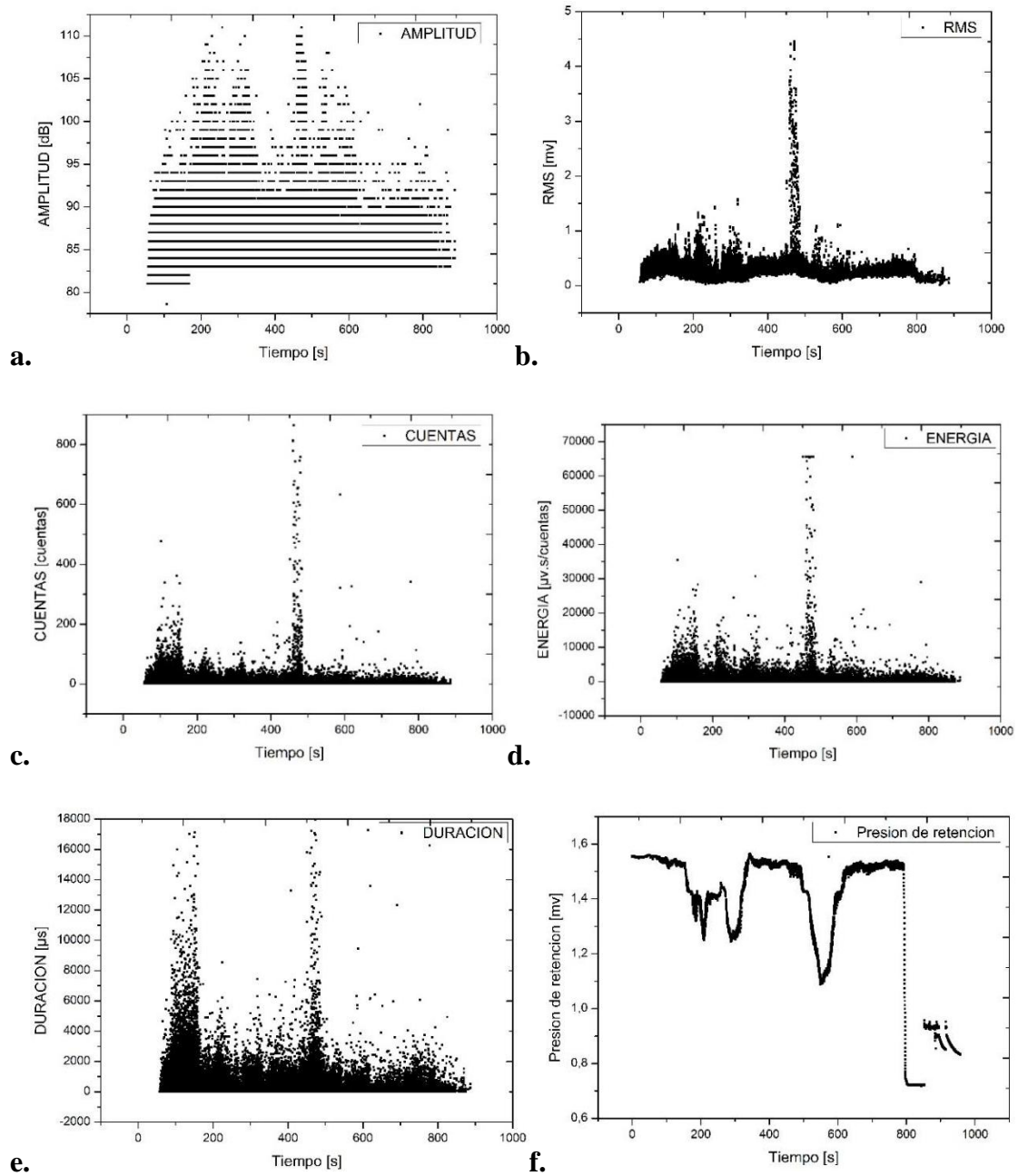


Fig. 4.6. Parámetros de EA y PR para ensayo C1a2. **a.** Amplitud máxima de EA. **b.** rms de EA. **c.** Nro. de cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

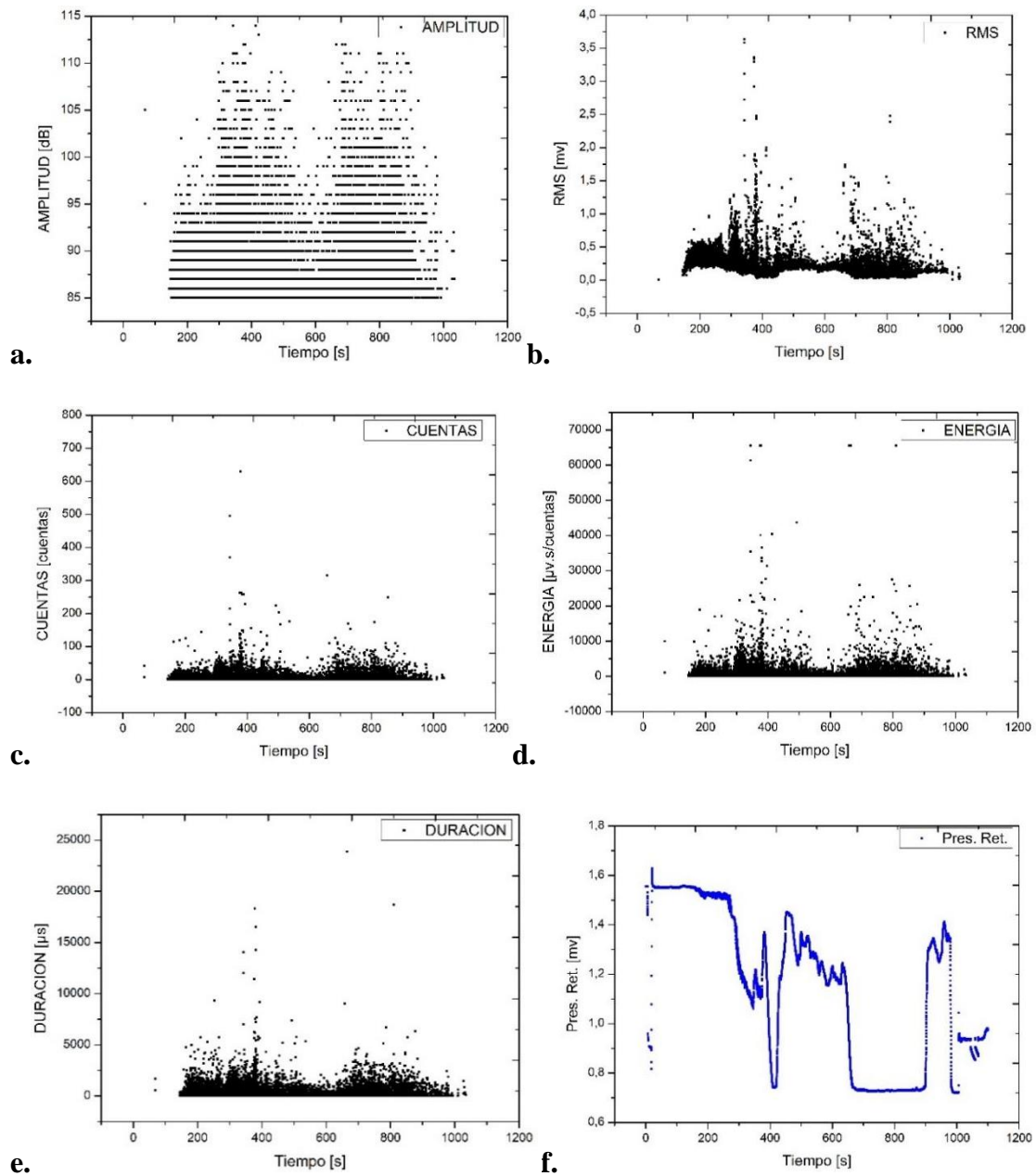


Fig.4.7. Parámetros de EA y PR para ensayo C1a3. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

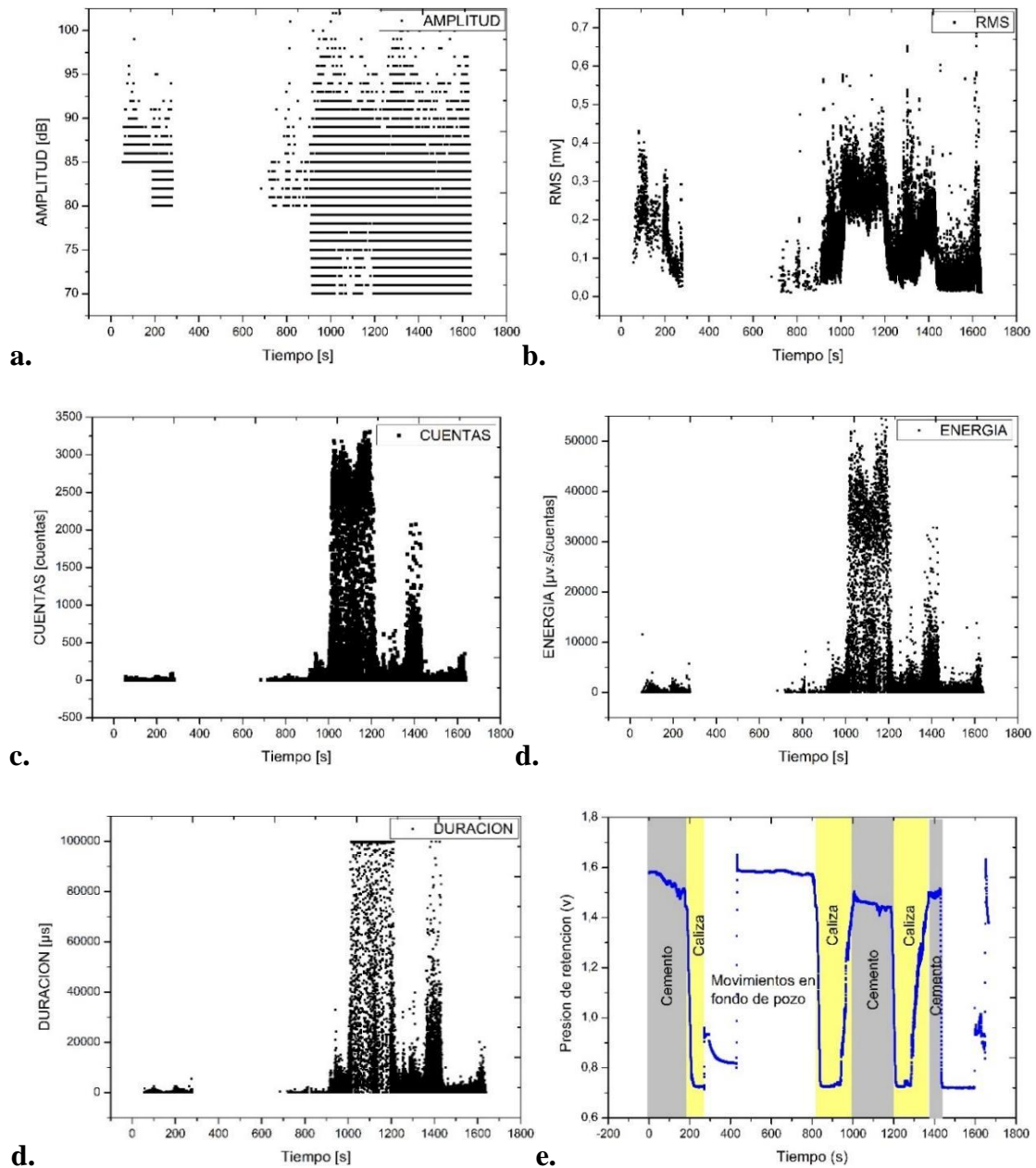


Fig. 4.8. Parámetros de EA y PR para ensayo **C1a4**. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

Una vez obtenida la información perteneciente a la EA y la PR para cada perforación, es posible relacionarla con el registro de video y el relevamiento estratigráfico con el objetivo de definir la posición relativa de la broca en cada instante. Esto permite generar gráficos tomando como base el parámetro rms (u otro) de la EA y definir intervalos de tiempo de perforación donde se individualiza la posición del cortador respecto de los materiales que conforman la probeta. Las Figs. 4.9 a, b y c muestran la correlación grafica para la variable rms de la EA, la PR y la posición de la broca en función del tiempo, estableciéndose zonas

de transición y perforación *efectiva* en cada estrato de geo material. De esta manera se pueden definir los intervalos de tiempo de perforación efectiva (tabla 4.3), que hacen posible la extracción de la información de la EA utilizada para los procesos de post procesamiento y entrenamiento de sistemas inteligentes.

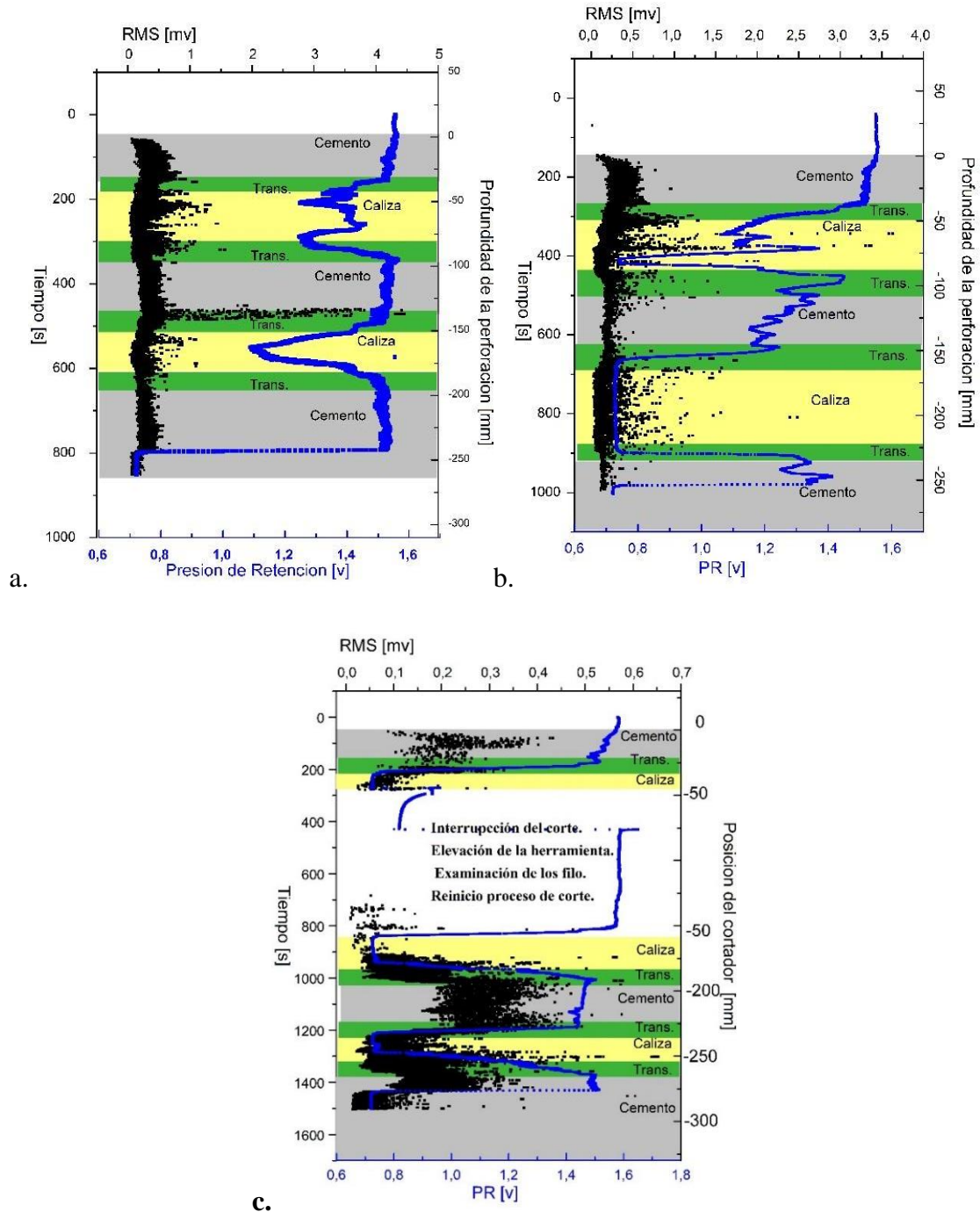


Fig. 4.9. Correlación entre rms de EA, PR, posición del cortador y capa de material para probeta de dos capas de roca caliza (C1). Los ensayos son: **a.** C1a2 y **b.** C1a3 realizados con el cortador de CT. **c.** Ensayo C1a4 realizado con el cortador de cuatro filos.

Se describen en la Fig. 4.9c detalles del proceso de corte como la interrupción del mismo para la evaluación del estado de la herramienta en una etapa intermedia. Los análisis y procedimientos expuestos para las perforaciones de la probeta C1 son replicados para las probetas A1, AC2 y CP1 a posteriori.

Tabla 4.3. Intervalos de tiempo de la EA donde se identifica la **perforación efectiva** de la broca en cada estrato geológico para las perforaciones de la probeta C1.

	CEMENTO 1	ROCA 1	CEMENTO 2	ROCA 2	CEMENTO3	Observaciones
C1a2	69-142s	187-294s	356-450s	515-601s	670-768s	
C1a3	179-258s	315-427s	507-616s	693-868s	926-971s	Fracturación filo
C1a4	71-143s	221-270s/845-927s	1033-1154s	1231-1304s	1389-1418s	Cortador 4 Filos

4.2.2. Resultados de perforación en probeta Arenisca (A1), agujeros a1, a2, a3

En la tabla 4.4 se detallan las características generales de las perforaciones para la probeta A1 compuesta por dos capas de roca Arenisca cementadas. Las velocidades de perforación son levemente inferiores en comparación con los ensayos C1 y no se produjeron fracturas del filo del cortador de WC en ninguna de las perforaciones.

Tabla 4.4. Resumen de características generales de los ensayos en probeta A1.

Ensayo	Filo cortador	Pre amplificación	Velocidad promedio	Observaciones
A1a1	2 Filos / CT	20 dB	0.2986 mm/s	
A1a2	2 Filos / CT	20 dB	0.320 mm/s	
A1a3	2 Filos / CT	20 dB	0.314 mm/s	

Las Figs. 4.10 a, b, c, d, y e, muestran varios de los parámetros de la EA y la PR durante la perforación de las dos capas de material de roca y cemento de unión. Se identifican zonas de alta emisividad por periodos determinados de tiempo los cuales una vez realizada la correlación gráfica de la EA con el registro de video de la posición de la broca y la estratigrafía de la perforación (Fig. 4.13 a, b, y c) se observan que pertenecen a zonas de *transición* durante la perforación de geo materiales con diferentes propiedades mecánicas. También se verifica al igual que en los ensayos de la probeta C1, una disminución de la amplitud de la señal durante la perforación de la segunda capa de material geológico. Este fenómeno se atribuye a la modificación de la señal transmitida a través del cuerpo de la broca, producto de la inmersión de la herramienta dentro del taladro perforado y rodeado de líquido con sedimentos de corte. Una explicación más detallada del proceso se discutirá mas adelante.

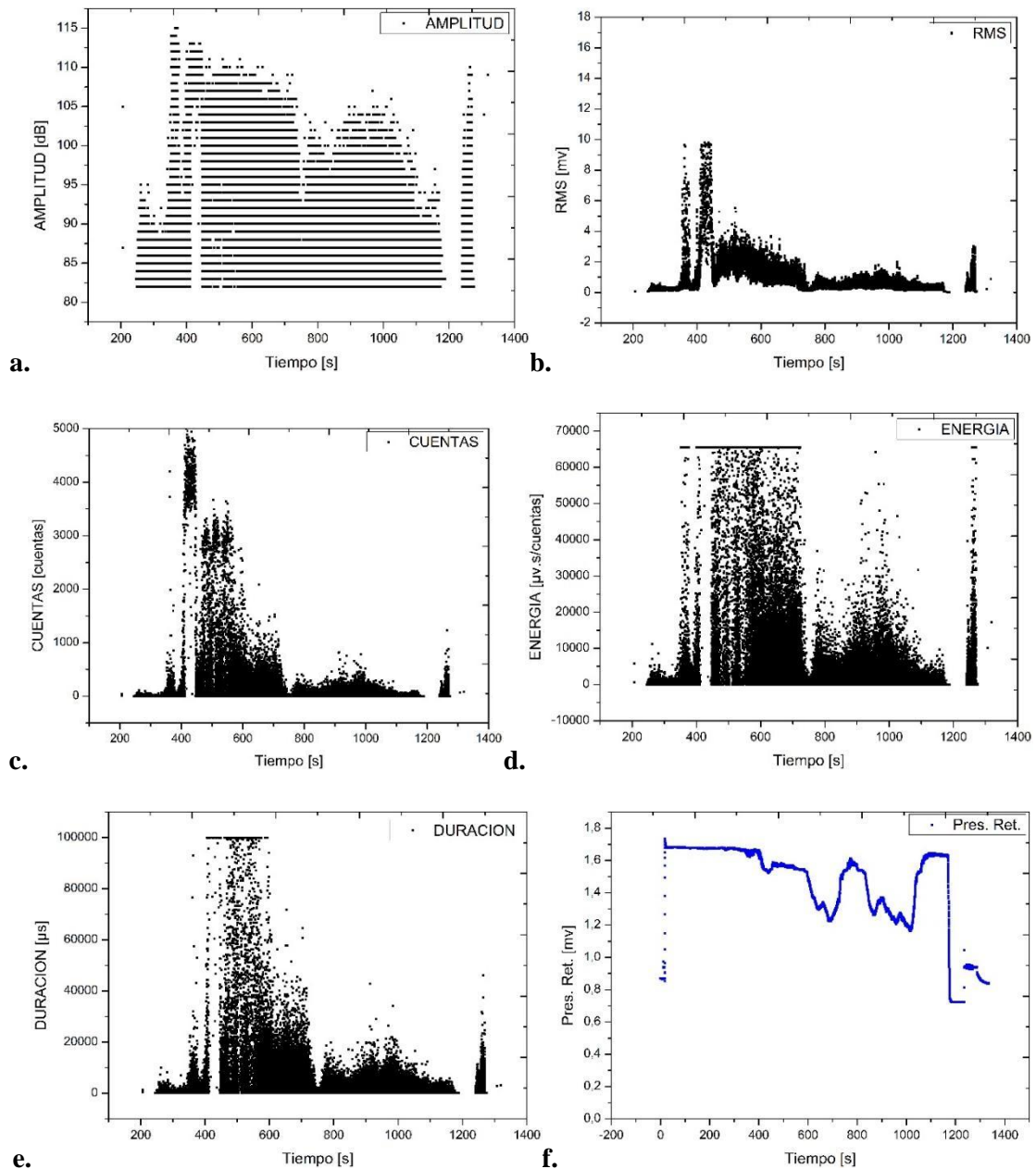


Fig.4.10. Parámetros de EA y PR para ensayo A1a1. **a.** Amplitud de EA. **b.** Valor rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

En las Fig. 4.11 y 4.12 se representan los parámetros correspondientes a las perforaciones A1a2 y A1a3. En ambos casos la emisión acústica durante el inicio del periodo de corte de la primera capa de roca arenisca muestra altos valores de rms, cuentas, energía, duración y PR (Fig. 4.11 y 4.12 a, b, c, d y f). El alto valor de la PR indica que durante ese segmento de corte de material, el sistema hidráulico realiza gran parte de la fuerza de retención para frenar el avance de la herramienta. Este aumento en la PR puede interpretarse como el resultado de que el material que está siendo cortado es más blando respecto del material anterior. Esto

también puede observarse en la segunda capa de roca, a pesar de ser “idealmente” el mismo material de Arenisca, pero debido a la inhomogeneidad característica de estos geo materiales, la dureza puede variar respecto un mismo tipo de roca.

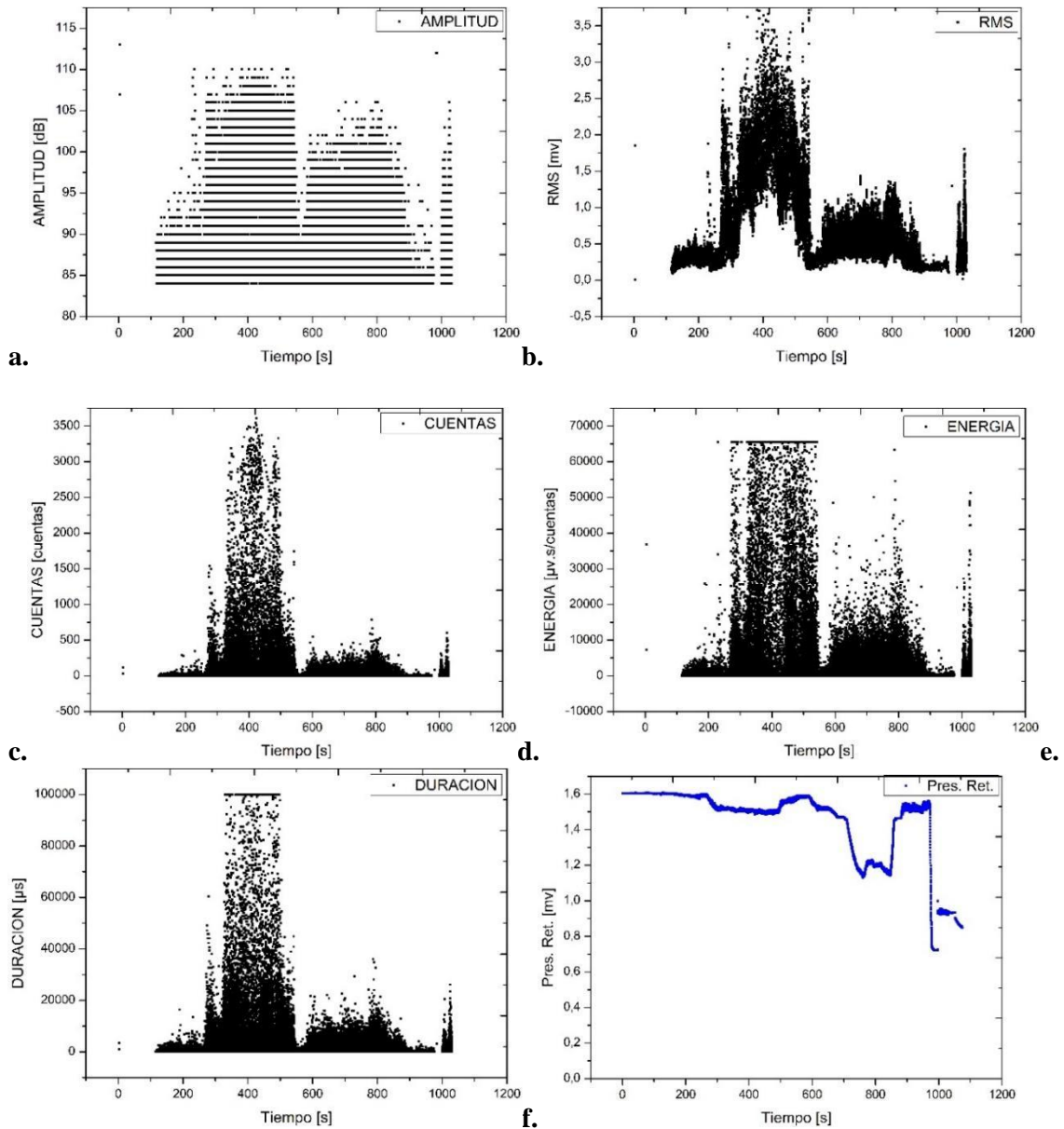


Fig.4.11. Parámetros de EA y PR para ensayo A1a2. **a.** Amplitud de EA. **b.** Valor rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

El alto valor de los parámetros de EA durante la perforación de la primera capa de roca puede ser atribuido a la diferencia en las propiedades mecánicas mostrada por el material de manera indirecta por la PR. El geomaterial que ofrece menor resistencia al proceso taladrado se perfora de manera más rápida, con una mayor tasa de avance por revolución, posiblemente mediante fracturas de mayor tamaño, lo que puede ser asociado a una EA mayor.

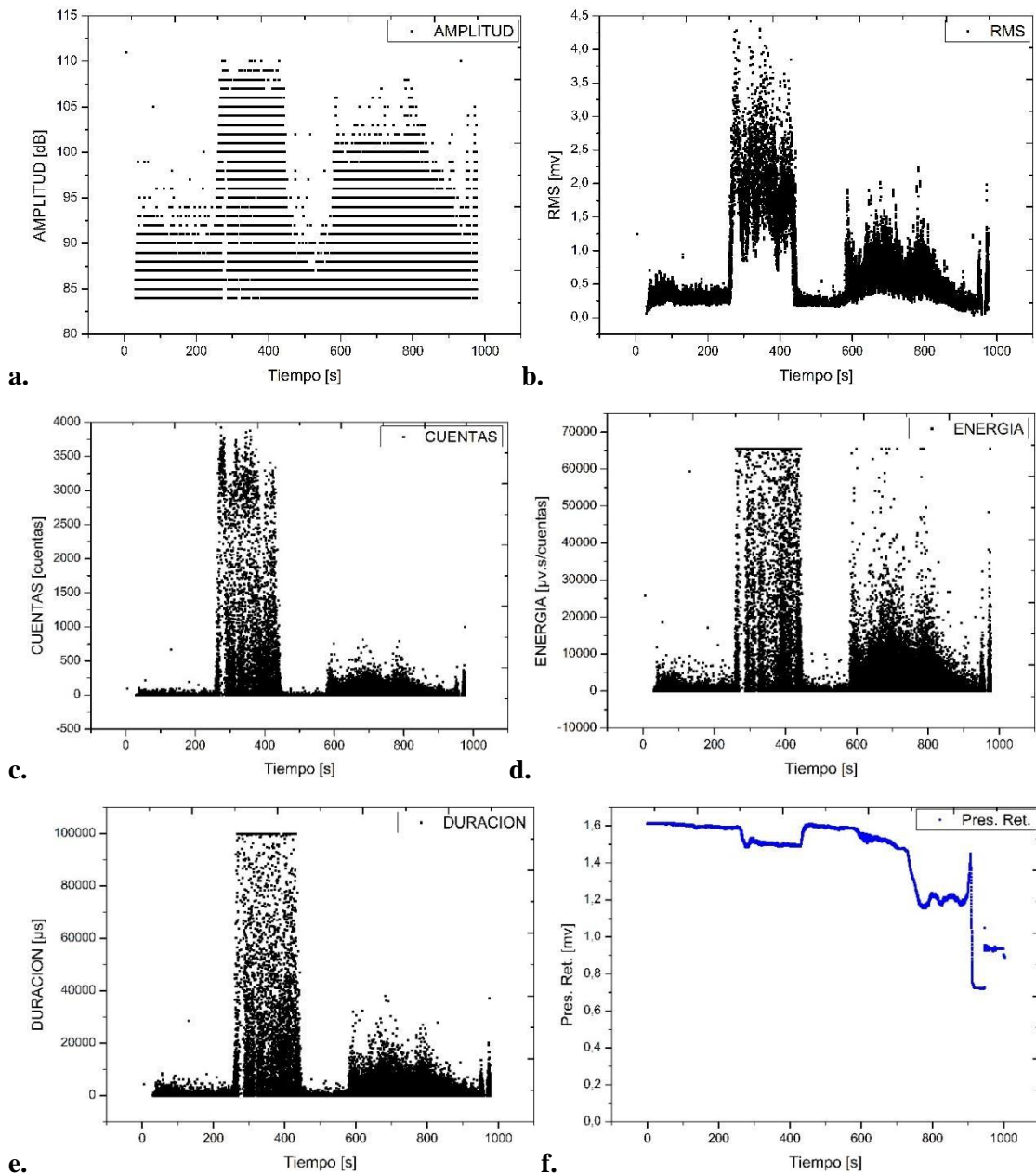


Fig. 4.12. Parámetros de EA y PR para ensayo A1a3. **a.** Amplitud de EA. **b.** Valor rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

En las Figs. 4.13 a, b y c se muestran los resultados de la PR, la posición del cortador y el geomaterial de la probeta respecto del parámetro de rms de EA: En la tabla 4.5 se exponen los intervalos de tiempo de **perforación efectiva** para la probeta A1.

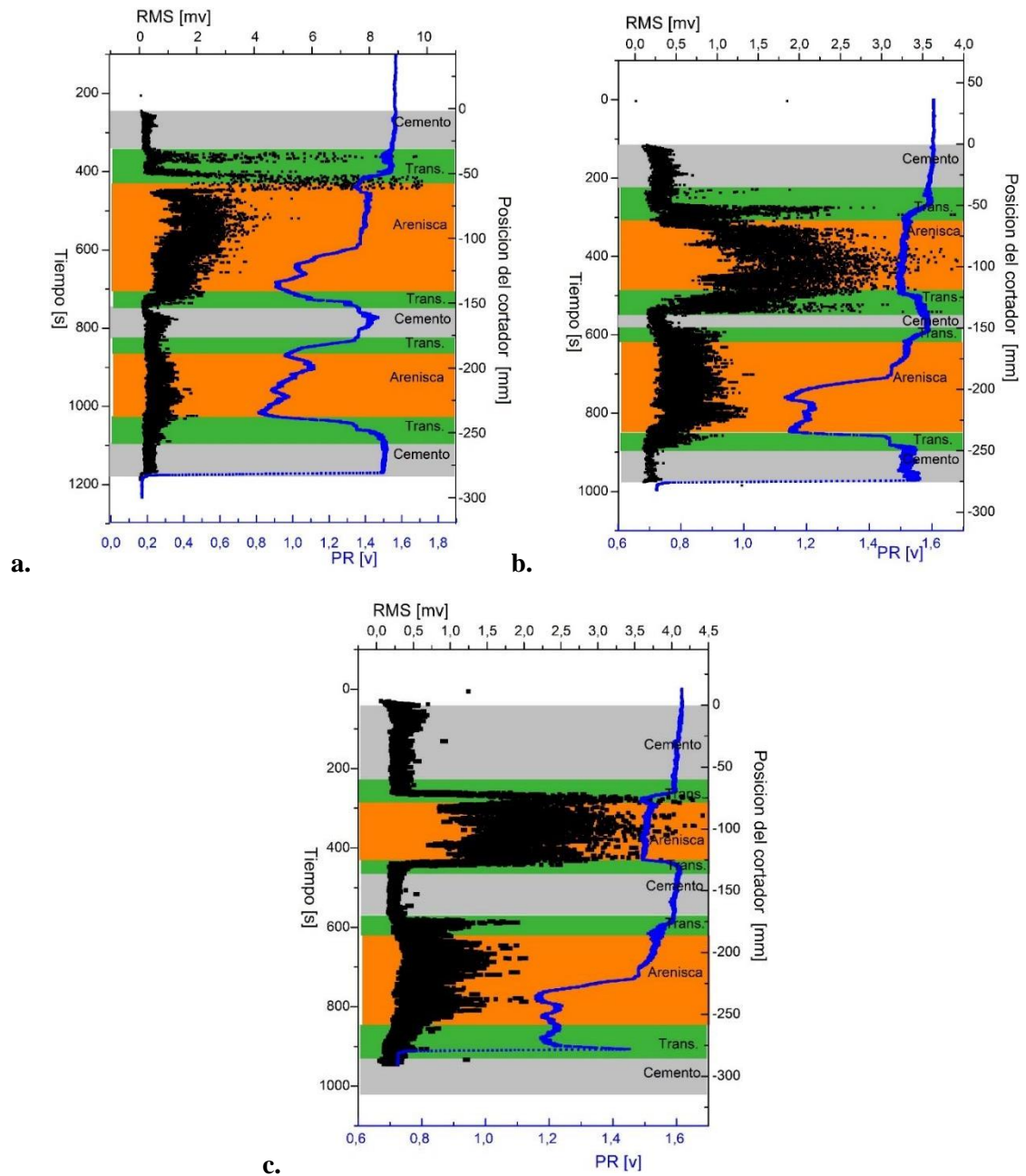


Fig. 4.13. Correlación entre rms de EA, PR, posición del cortador y capa de material para probeta A1 y perforaciones a1, a2, y a3 respectivamente.

Tabla 4.5. Intervalos de tiempo de la EA donde se identifica la *perforación efectiva* de la broca en cada estrato geológico para las perforaciones de la probeta A1.

	CEMENTO 1 (s)		ROCA 1 (s)		CEMENTO 2 (s)		ROCA 2 (s)		CEMENTO 3 (s)		Observación
A1a1	253	337	434	695	753	817	871	1017	1100	1165	
A1a2	119	218	313	477	552	576	626	841	902	968	
A1a3	49	218	288	422	472	565	622	840	930	944	

A continuación, se exponen las tablas 4.6 y 4.7 que muestran las características generales de las perforaciones pertenecientes a las probetas AC2 y CP1. Estas probetas están compuestas por una capa de roca arenisca y una de roca caliza para la probeta AC2 y una capa de roca caliza y una de pizarra para la probeta CP1.

4.2.3. Resultados de perforación en la probeta Arenisca Caliza AC2, agujeros a1-a2-a3-a4

La tabla 4.6 muestra las características generales de la probeta AC2 compuesta por una capa de roca Arenisca y una de roca Caliza unidas por cemento de consolidación. En estos ensayos se evidenció la fractura del filo de WC, donde, en algunos casos se continuó con la perforación hasta finalizar el taladro con la herramienta en este estado defectuoso. Eventualmente para el ensayo AC2a3, luego de la fractura del cortador de WC, se continuó la perforación con el cortador de 4 filos de acero AISI O2.

En las Figs. 4.14, 4.15, 4.16, 4.18 se representan los parámetros de las perforaciones AC2a1, AC2a3, AC2a4 respectivamente se produjo la fractura del cortador de WC. En las Fig. 4.19a, 4.19c, 4.19e se muestra el rms de las perforaciones correlacionado con el estrato que se taladra y se demarco con una línea de punto, el momento de la fractura sobre la figura. A posteriori, se analizarán los resultados pertenecientes al suceso de fractura y sus consecuencias en la calidad de terminación del taladro.

Tabla 4.6. Resumen de características generales de los ensayos en probeta AC2.

Ensayo	Filo cortador	Preamplificación	Velocidad promedio	Observaciones
AC2a1	2 Filos / CT	20 dB	0.326 mm/s	Fractura de Filo
AC2a2	2 Filos / CT	20 dB	0.253 mm/s	Fractura de Filo
AC2a3	2 Filos / CT	20 dB	-----	Fractura de Filo
	4 Filos / AISI O2	20 dB	-----	Se continuo preforación
AC2a4	2 Filos / CT	20 dB	0.19 mm/s	Fractura de filo

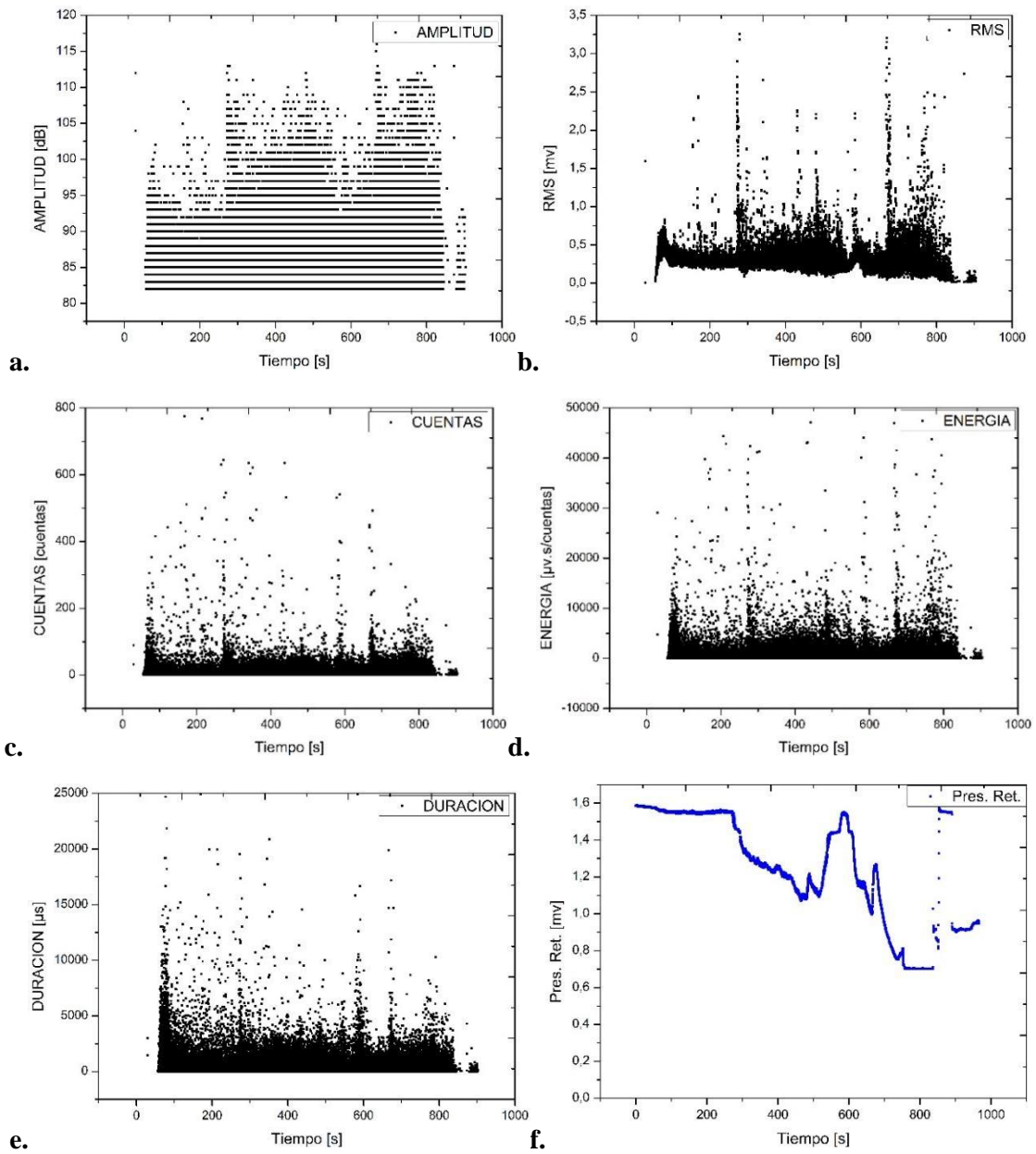


Fig. 4.14. Parámetros de EA y PR para ensayo AC2a1. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

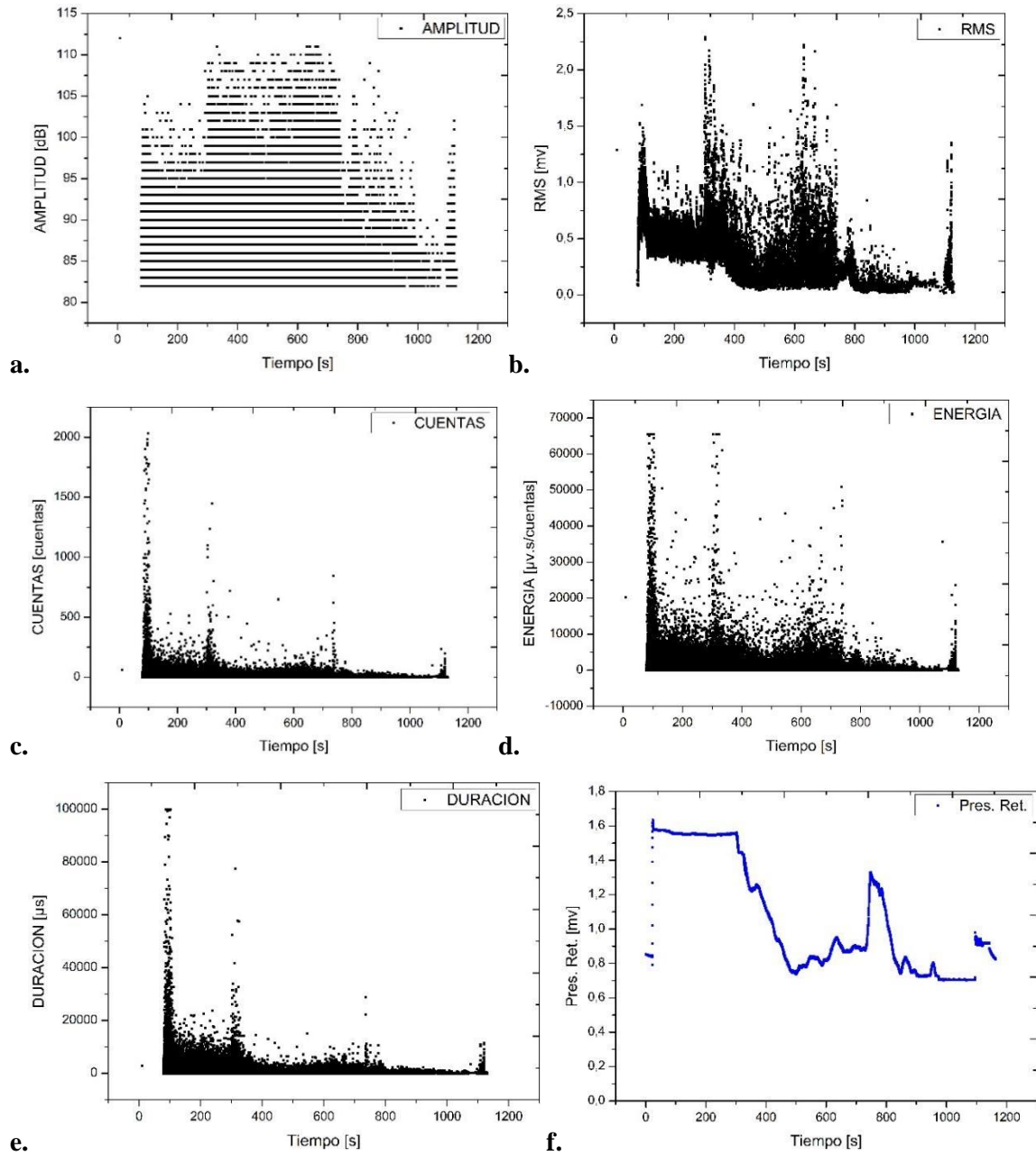


Fig.4.15. Parámetros de EA y PR para ensayo AC2a2. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

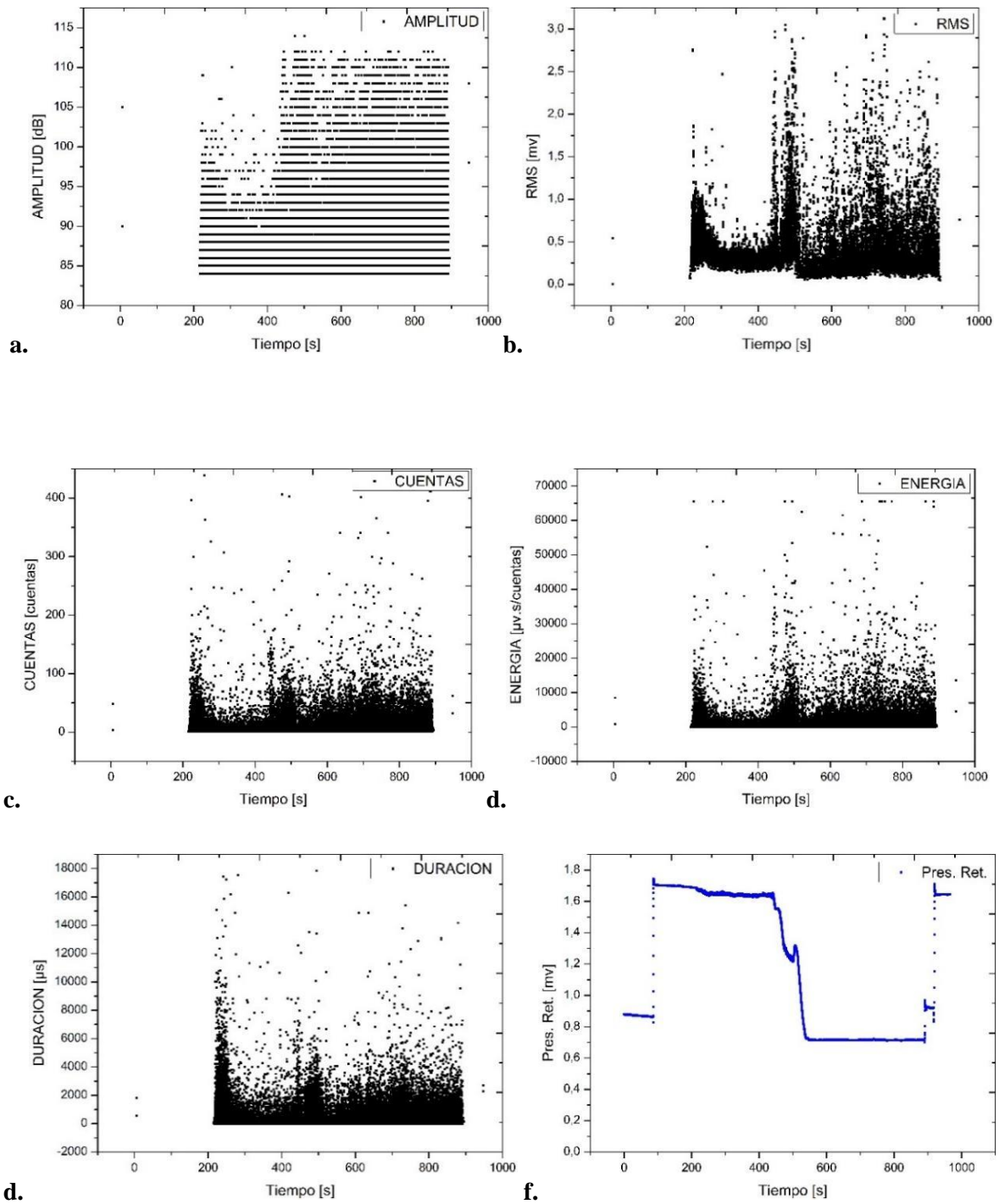


Fig. 4.16. Parámetros de EA y PR para ensayo AC2a3, primera parte con broca de WC.

a. Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

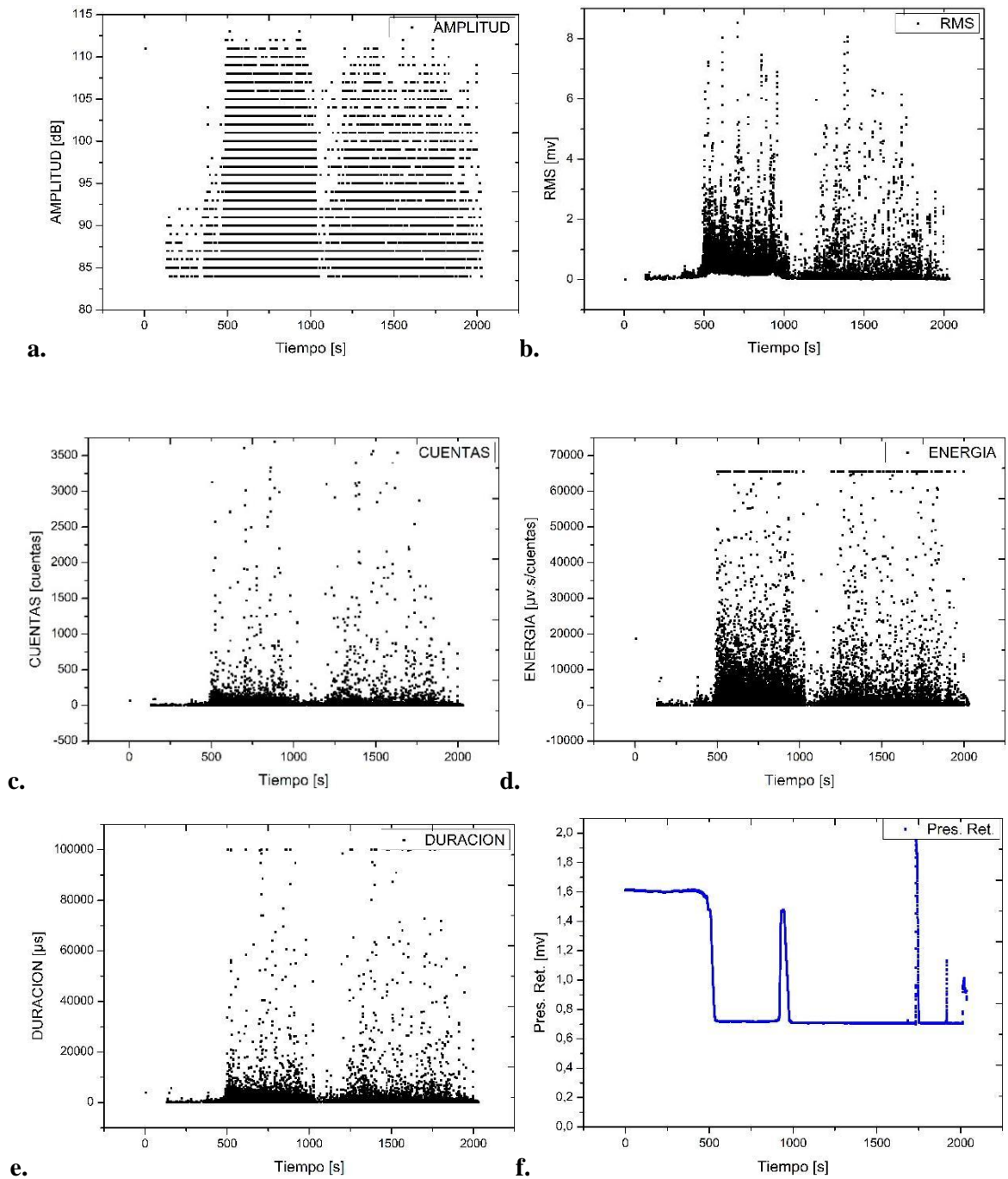


Fig.4.17. Parámetros de EA y PR para ensayo AC2a3, continuación con broca de cuatro fillos de acero. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

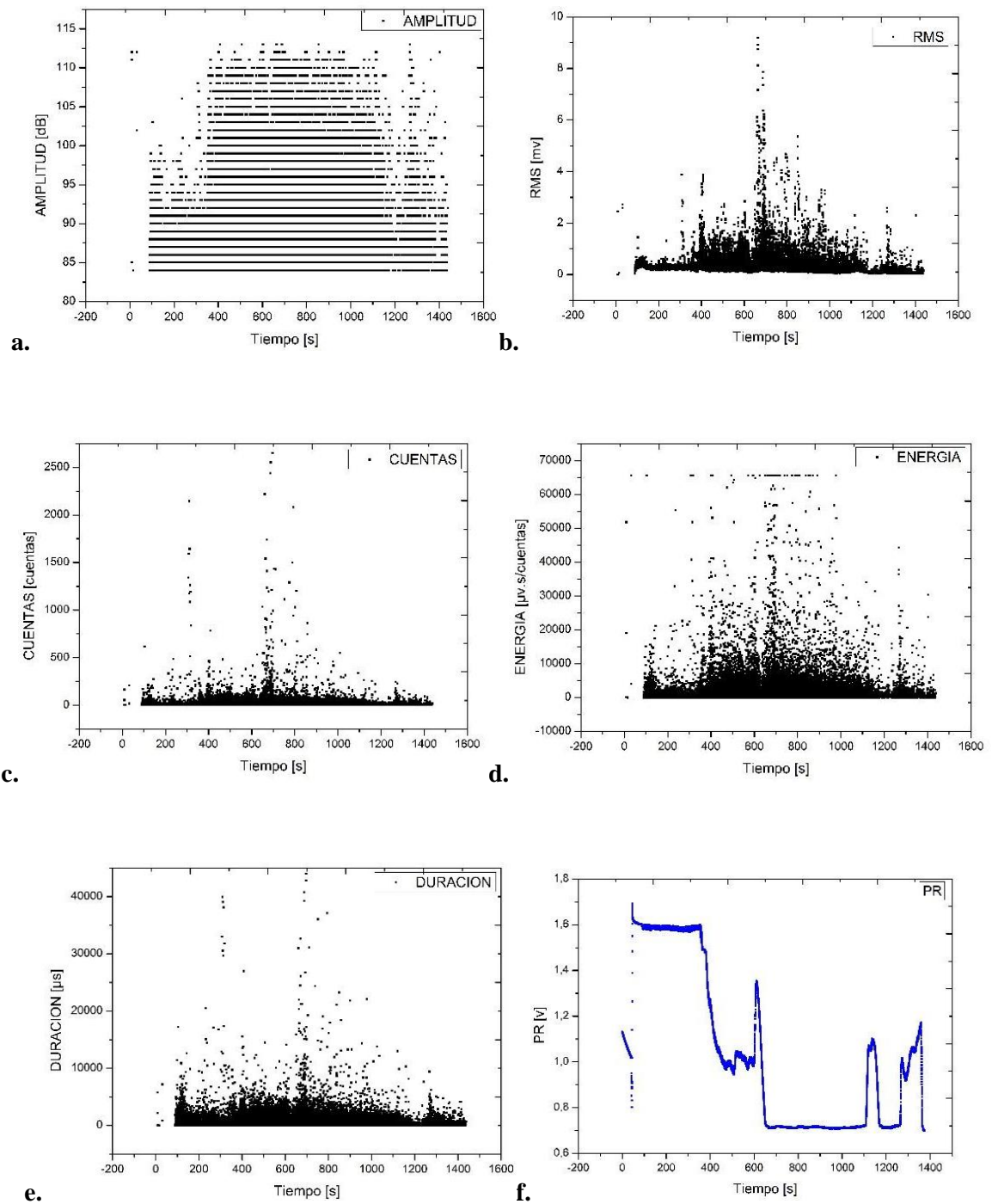


Fig. 4.18. Parámetros de EA y PR para ensayo AC2a4. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

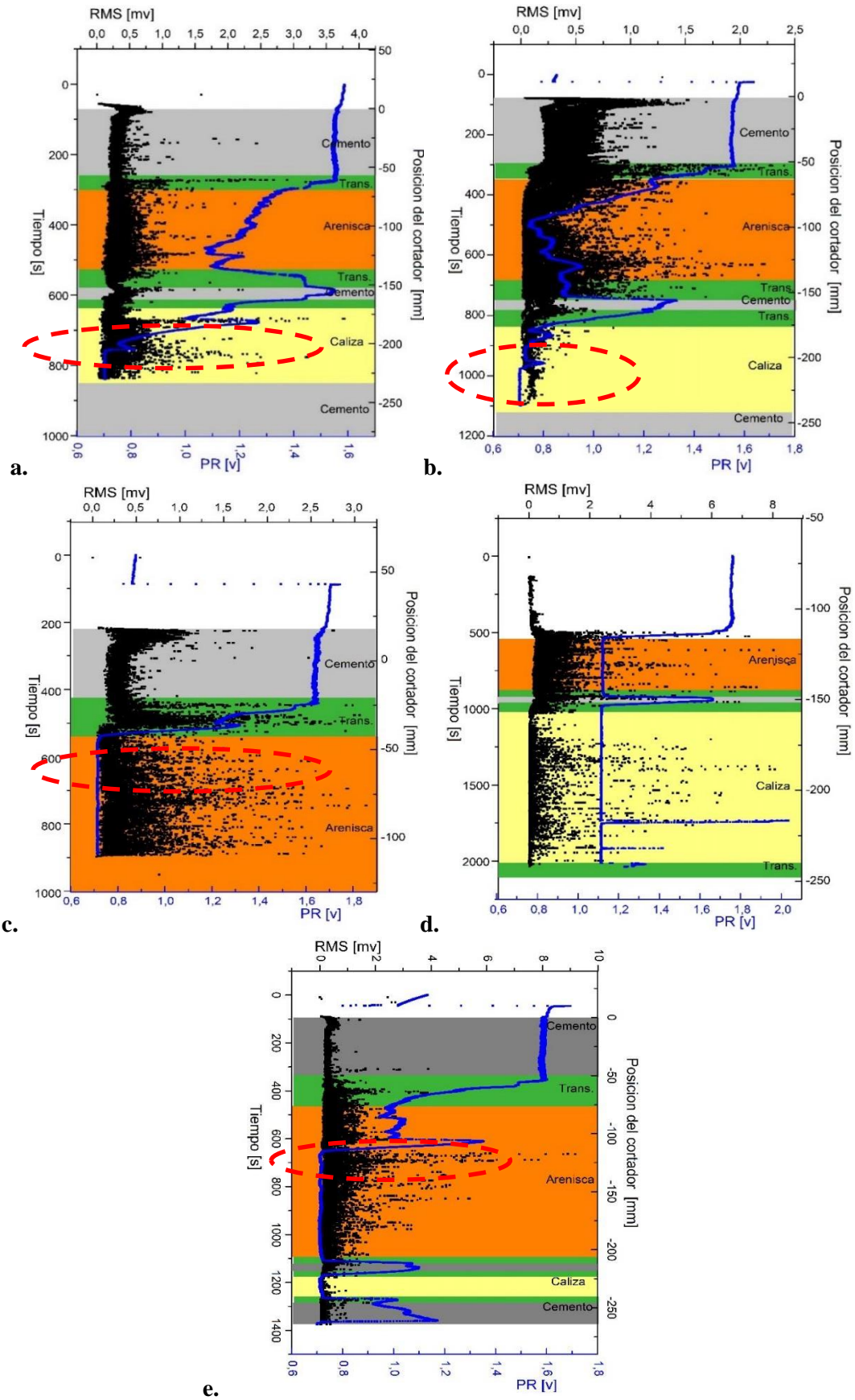


Fig. 4.19. RMS EA, PR, posición del cortador y capa de material para probeta AC2. **a.** AC2a1, **b.** AC2a2. **c.** AC2a3 cortador de CT, **d.** AC2a3 cortador de de acero, **e.** AC2a4.

Para esta serie de ensayos la tabla 4.7 muestra los intervalos de tiempo del rms de la EA y las posiciones de **perforación efectiva** para los 4 ensayos de la probeta AC2.

Tabla 4.7. Intervalos de tiempo de EA donde la broca realizo perforación efectiva en cada estrato para la probeta AC2 en las diferentes perforaciones.

	CEMENTO 1 (s)		ROCA 1 (s)		CEMENTO 2 (s)		ROCA 2 (s)		CEMENTO 3 (s)		Observación
AC2a1	92.2	251.9	305	521.3	581	609	638	832	---	----	Fractura de filo
AC2a2	112.11	289	347.8	678	749.5	774.6	843	1095	----	----	Fractura de filo
AC2a3	260	420	553	889	---	----	----	----	---	----	Cortador 2 filos
	----	----	548.1	857.5	----	----	1067	1688	----	----	Cortador de 4 filos
AC2a4	100	323	470	1082	----	----	1182	1254	1299	1364	Fractura de filo

4.2.4. Resultados de perforación en la probeta Caliza Pizarra CP1, agujeros a1-a2-a3

Los últimos resultados presentados en esta sección corresponden a la serie de perforaciones realizadas en la probeta CP1 que está compuesta por una primera capa de roca Caliza y una segunda capa de roca Pizarra. La tabla 4.8 muestra el detalle de las perforaciones realizadas, donde para el ensayo CP1a1 se observa la carencia de la medición de PR debido a problemas relacionados con el sistema de medición. El resto de los ensayos se desarrollaron de manera normal. Las Figs. 4.20, 4.21 y 4.22 muestran los parámetros adquiridos para los tres ensayos y en ellos se pueden distinguir claramente sectores con una muy alta emisión en diferentes periodos de tiempo. Posteriormente las Fig. 4.23 a, b, y c muestran que estas zonas de alta emisión en parte pertenecen a zonas de la perforación del cemento y de la roca Pizarra. Esta última tiene características morfológicas y de gestación diferentes en comparación con la Arenisca y la Caliza. Una de sus diferencias principales está relacionada con su formación metamórfica, lo que significa que esta roca es producto de la transformación de otra roca (metamorfismo), debido a las altas temperatura y presión en el seno terrestre, lo que promovió la modificación de su estructura original. Esta mecánica de formación dista mucho del origen sedimentario de la Caliza y de la Arenisca, la cuales están compuestas por material particulado, rodeado y consolidado por otro elemento de unión. Los granos de la Pizarra crecieron en base a la transformación de otros elementos, además de ser laminados por las presiones a las cuales estuvo sometida. Todos estos factores hacen que su forma de fractura sea muy diferente a la de las rocas sedimentarias, a pesar de que su dureza es comparable con ellas. Como resultado, la EA que emana el proceso tiene características diferentes.

Tabla 4.8. Resumen de características generales de los ensayos en probeta CP1.

Ensayo	Filo cortador	Preamplificación	Velocidad promedio	Observaciones
CP1a1	2 Filos / CT	20 dB	0.288 mm/s	No se registró PR
CP1a2	2 Filos / CT	20 dB	0.295 mm/s	
CP1a3	2 Filos / CT	20 dB	0.295 mm/s	

Nuevamente la correlación de la información de EA, la PR, el posicionamiento en video y el relevamiento estratigráfico, permitió extraer los tiempos del taladrado estable en función de la profundidad de la broca para cada ensayo expuestos en la tabla 4.9.

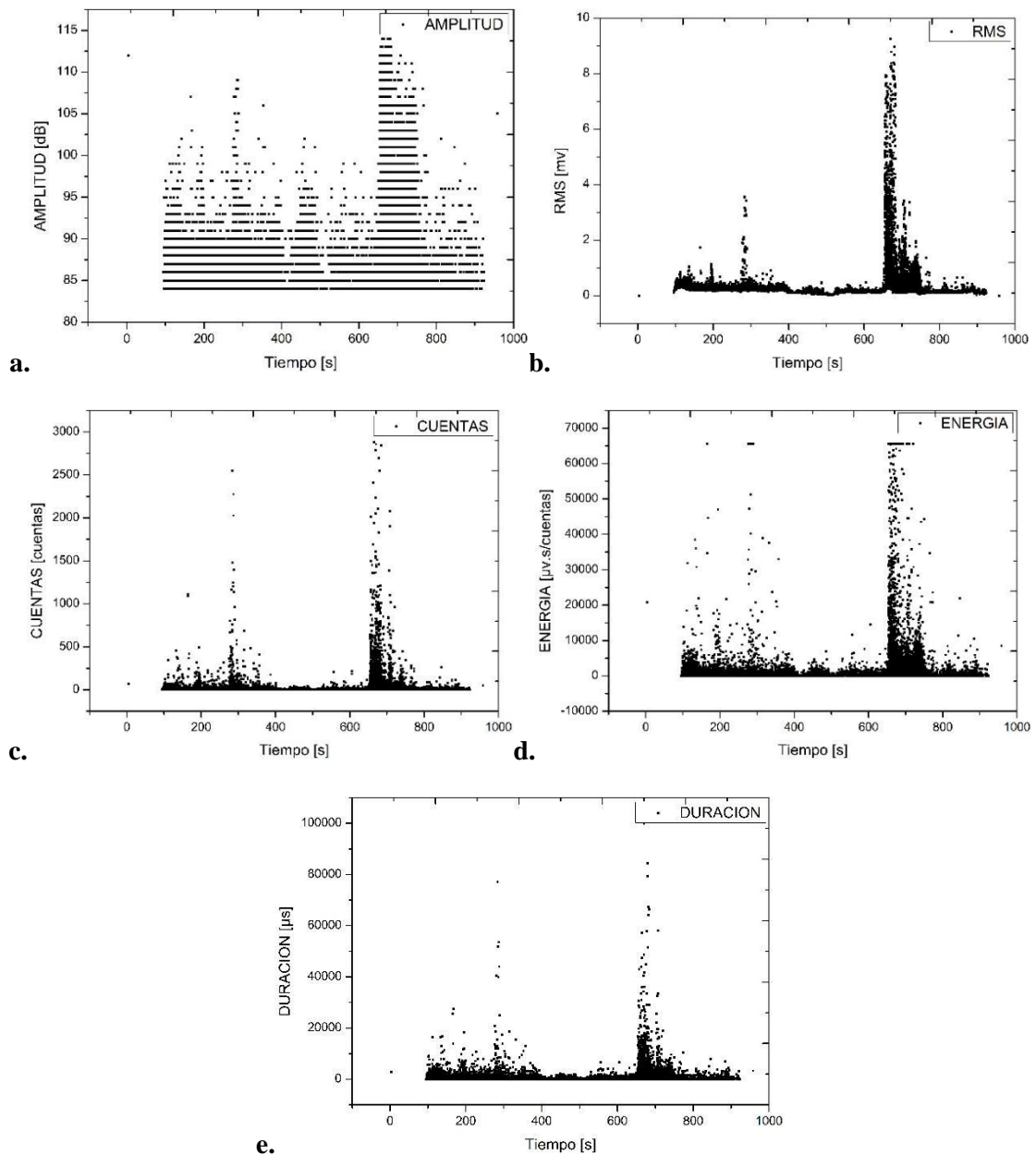


Fig. 4.20. Parámetros de EA y PR para el ensayo CP1a1. **a.** Amplitud de EA. **b.** rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de las señales de EA.

Tabla 4.9. Intervalos de tiempo de EA donde la broca realizó **perforación efectiva** en cada estrato para la probeta CP1 en las diferentes perforaciones.

	CEMENTO 1 (s)		ROCA 1 (s)		CEMENTO 2 (s)		ROCA 2 (s)		CEMENTO 3 (s)		Observación
CP1a1	103	332	393	511	543	613	653	752	800	918	
CP1a2	42	296	353	495	526	572	618	729	785	805	
CP1a3	121	355	413	590	622	645	683	789	826	885	

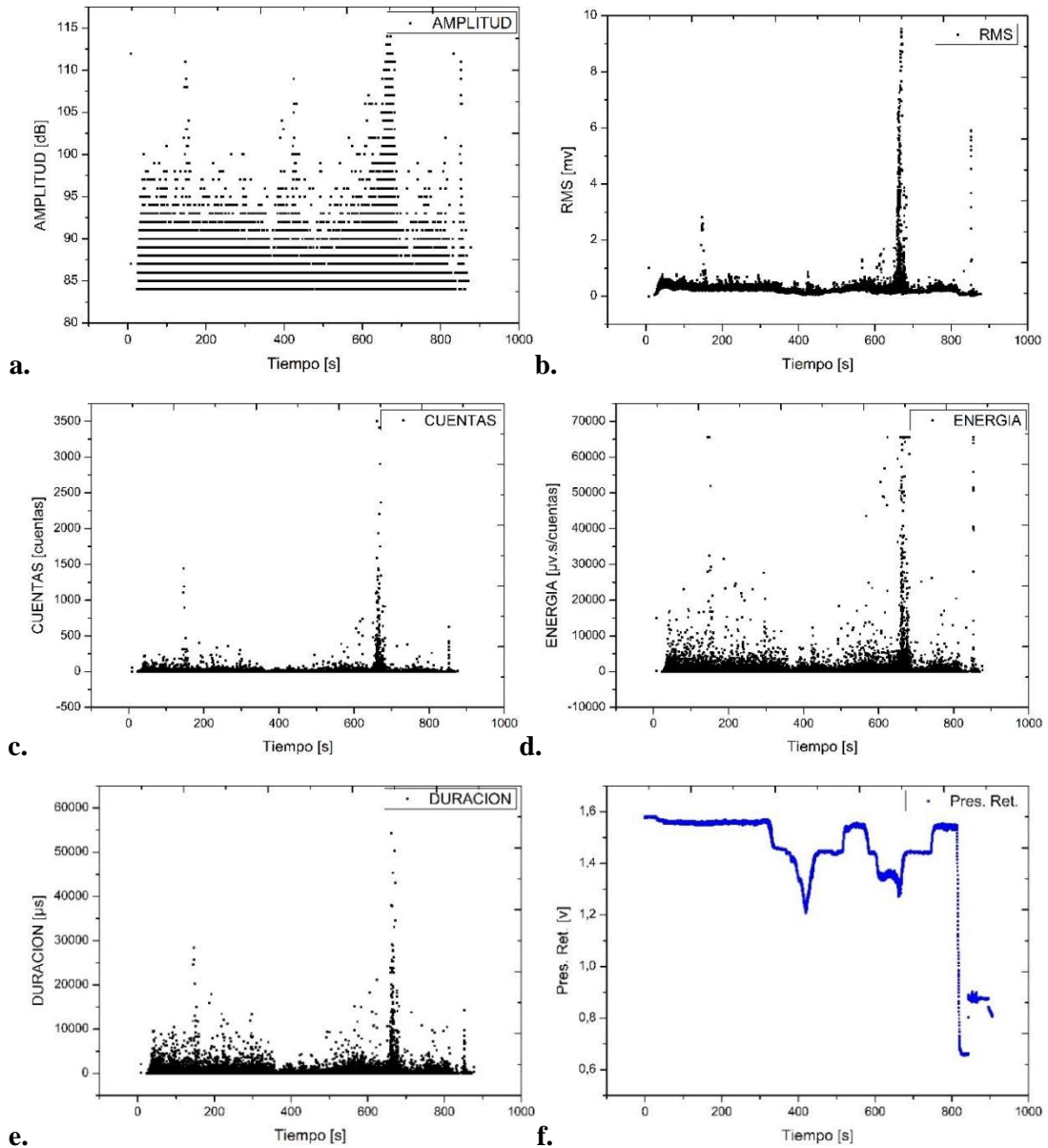


Fig. 4.21. Parámetros de EA y PR para el ensayo CP1a2. **a.** Amplitud de EA. **b.** Valor rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

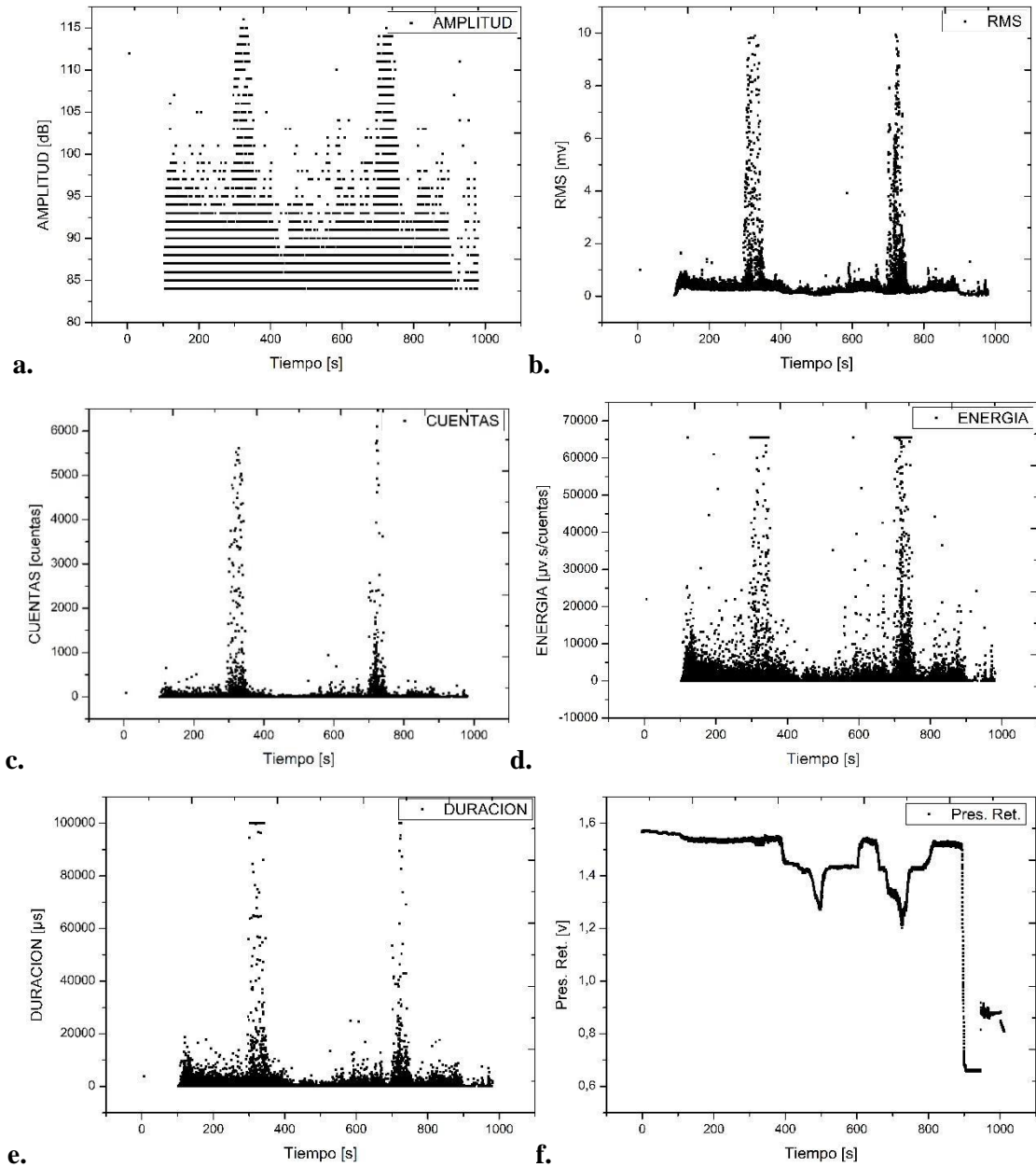


Fig.4.22. Parámetros de EA y PR para el ensayo CP1a3. **a.** Amplitud de EA. **b.** Valor rms de EA. **c.** Cuentas de EA. **d.** Energía de EA. **e.** Duración de la señal de EA. **f.** Presión de retención del sistema hidráulico.

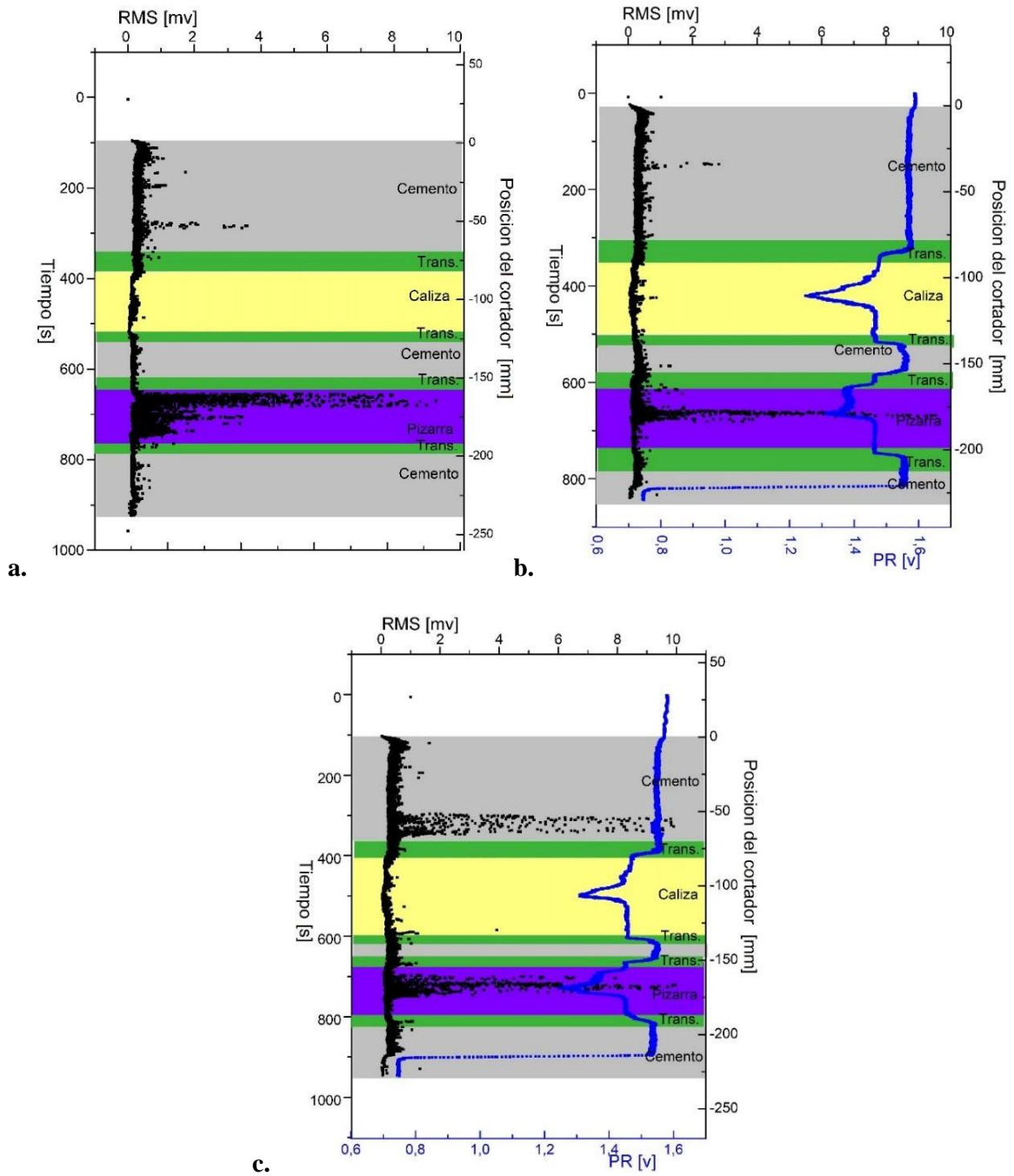


Fig.4.23. Correlación entre rms de EA, PR, posición del cortador y capa de material para probeta CP1. **a.** CP1a1, **b.** CP1a2. **c.** CP1a3.

4.3 Discusión de los resultados extraídos a partir de la información obtenida mediante la EA, la PR, el relevamiento estratigráfico y el registro de la posición del cortador.

Los resultados del monitoreo continuo de la EA durante cada una de las perforaciones de las probetas realizadas muestran sustanciales diferencias a medida que la broca penetra dentro de la probeta y se encuentra con las diferentes litologías o la condición de corte es modificada por el cambio de la geometría del cortador ante una fractura. La relación entre la EA, la PR y el posicionamiento relativo de la broca condujo a reconocer en qué momento del ensayo se produce un intervalo EA determinado. Desde un punto de vista de análisis de señales, la información paramétrica obtenida mediante EA es aleatoria, y no estacionaria, cuando se observa el desarrollo del ensayo completo. Sin embargo, el ensayo podría ser descrito como un ensamble de partes parcialmente estacionarias para propósitos de medición y análisis. Es entonces muy importante poder realizar una correcta identificación y selección de información de EA que posteriormente será utilizada en los procesos de análisis mediante RNK. Adicionalmente la correlación entre la EA y el posicionamiento mediante el video permitió identificar eventos particulares que serán analizados a continuación.

4.3.1. Caída de amplitud en función de la profundidad

Un comportamiento observado en varios de los ensayos realizados en diferentes probetas es la disminución progresiva de la amplitud de la EA con el aumento de la profundidad la perforación, esto se muestra de manera esquemática en las Fig. 4.24 para los ensayos en la probeta A1 y C1. Para poder observar de manera más definida este comportamiento se aplicó, como se muestra en las Figs. 4.25 la media móvil al parámetro rms de AE. De esta manera el comportamiento de la señal es promediada de manera sectorizada, eliminando pequeños transientes que pueden eventualmente modificar el aspecto de la señal.

Los promedios fueron calculados sobre intervalos de 200 hits de EA. En los casos de taladrado de la probeta A1, Fig. 4.25a, los valores de la media móvil del rms correspondientes al intervalo de perforación estable para la segunda capa de material de Arenisca son siempre inferiores respecto de la primera capa del mismo material. Para la probeta C1 (Fig. 4.25b) se observa que los intervalos de perforación de la primera capa de roca Caliza y Cemento muestran una disminución de amplitud respecto de las capas posteriores de los mismos materiales. Se excluyeron del análisis las zonas de transición y las

interfaces de fino espesor que eventualmente pueden superponerse con las zonas de transición de alta emisión e inestabilidad.

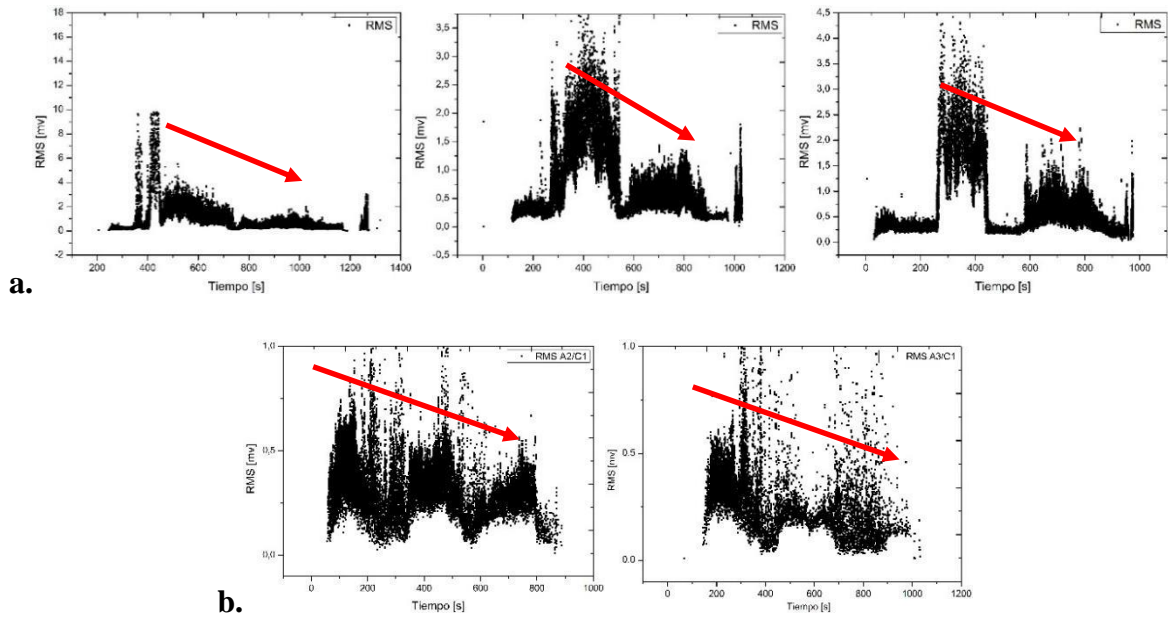
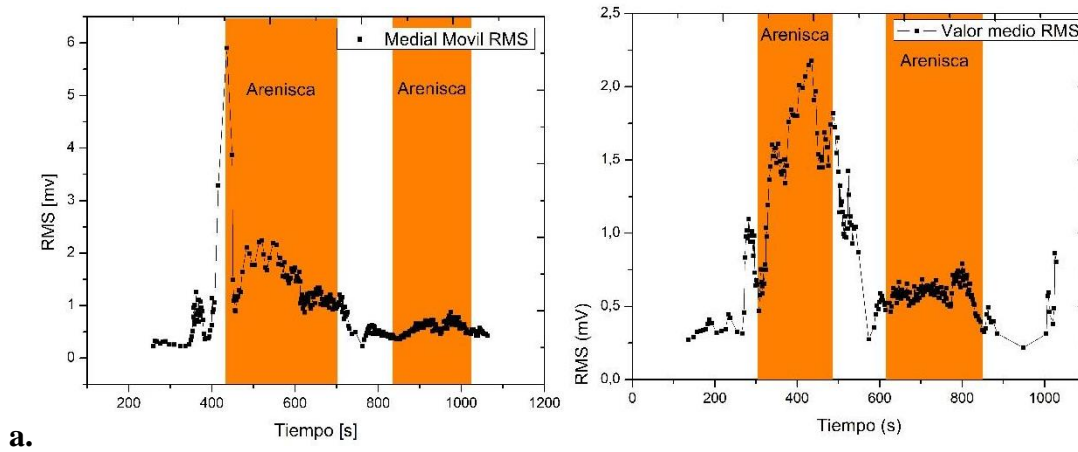


Fig. 4.24 Disminución de la amplitud de la señal para el parámetro rms de la EA en función de la profundidad de penetración y debido a la atenuación del camino sónico por inmersión de la broca.

a. Perforaciones A1a1, A1a2, A1a3. **b.** Perforaciones C1a2 y C1a3.



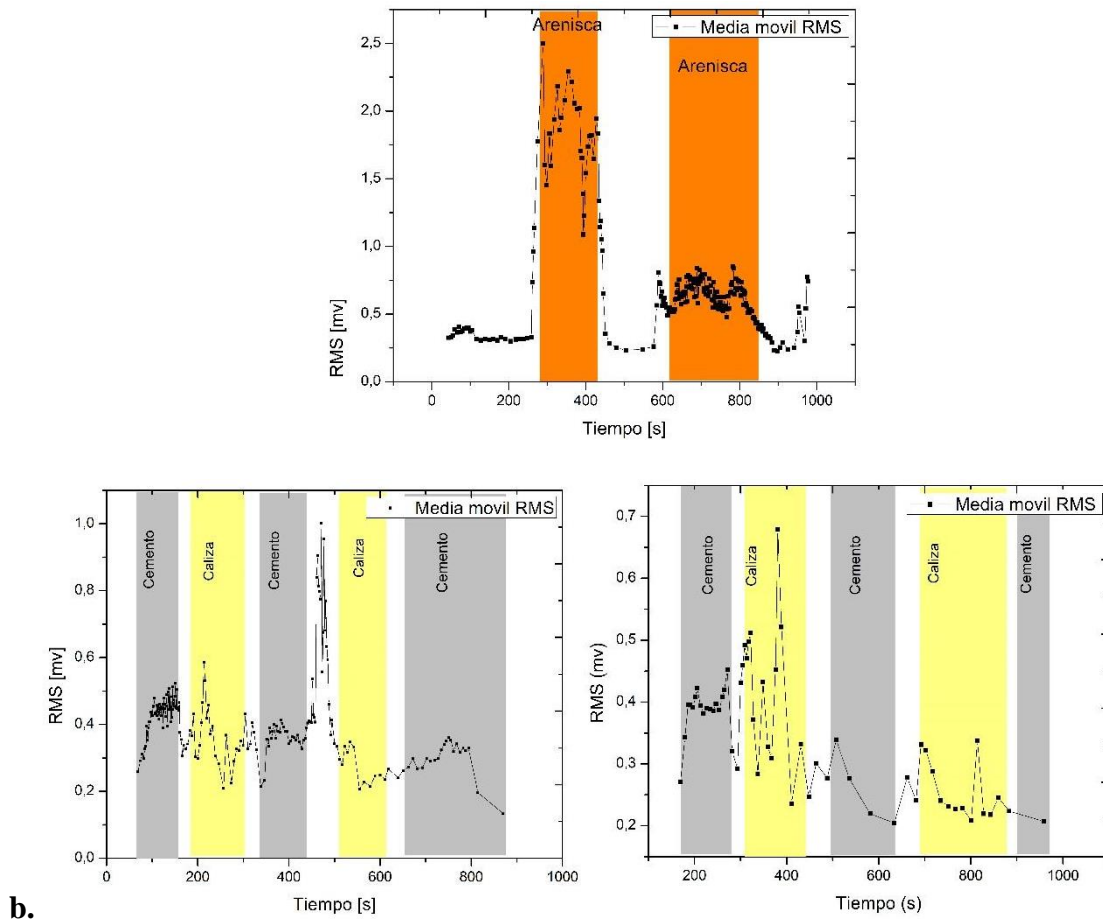


Fig. 4.25. Media móvil para el parámetro RMS de EA tomado en ventanas de 200 Hits, el cual muestra una disminución de la amplitud en función de la profundidad de perforación. **a.** Perforaciones A1a1, A1a2, A1a3. **b.** Perforaciones C1a2 y C1a3.

Este fenómeno puede ser asociado a la arquitectura de medición de las ondas elásticas del presente sistema experimental. En este sistema se realiza el monitoreo del proceso mediante la instrumentación de la broca y se utiliza un fluido líquido para lubricación y extracción del material de corte. A medida que la broca va realizando la perforación y gana mayor profundidad, aumenta la porción del cuerpo cilíndrico de la broca introducido dentro del agujero de perforación. Este cuerpo es la guía de ondas por medio del cual las señales de EA llegan al acople hidráulico y posteriormente al sensor de piezoeléctrico. Con el aumento de profundidad, este cuerpo se rodea de mayor cantidad de agua y del lodo resultante del agua de refrigeración mezclada con los productos de corte. La señal que viaja por el cuerpo cilíndrico hacia el acople hidráulico sufre la absorción de parte de la energía elástica a causa del medio líquido que la rodea, produciendo una caída en la amplitud de la señal. Esta energía se disipa en el líquido y en las partículas de material cortado que rodea el cuerpo de la broca. Las ondas elásticas de EA que viajan por el cuerpo de la broca pueden ser asociadas a ondas

de Lamb, las cuales se conocen como ondas de superficie, y posee dos tipos de modos, simétricos y antisimétricos.

Los modos antisimétricos tienen un movimiento perpendicular al plano de propagación (Fig. 4.26), por lo que poseen una mayor capacidad de transferir efectivamente su movimiento a las partículas fluidas del medio que rodean al cuerpo del cortador, disipando parte de la señal de EA antes de que llegue al sensor. Este efecto se traduce como una reducción en la amplitud de la señal y consecuentemente un menor número de cuentas, energía y duración debido a que una menor porción de la onda elástica está en condición de activar el umbral fijo de adquisición del sistema de medición de EA.

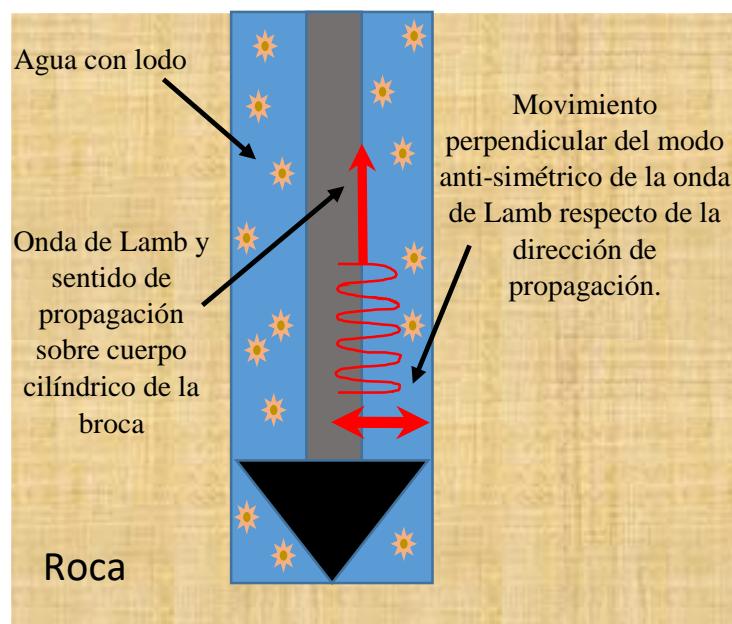
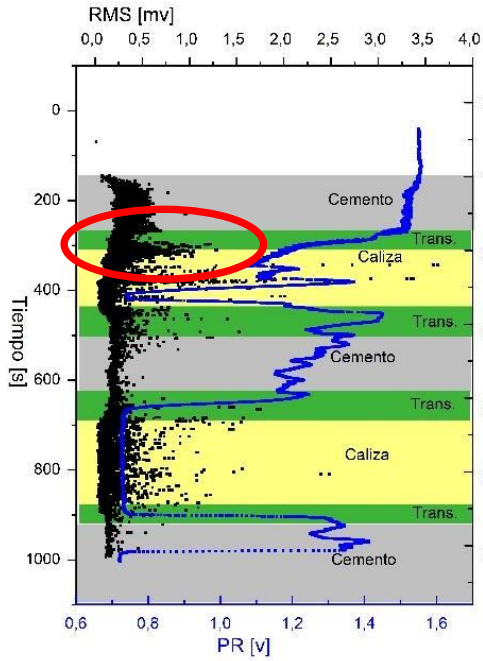


Fig. 4.26. Esquema de propagación de la señal a través del cuerpo de la broca donde se evidencia la transición de energía al medio fluido maximizada por el modo antisimétrico de Lamb.

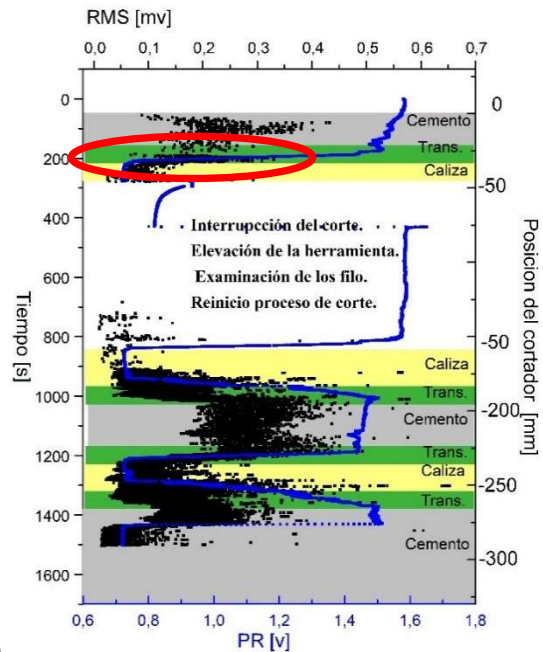
4.3.2. Aumento de amplitud en zonas de interfase

Para los ensayos C1a3, C1a4, A1a1, A1a2, AC2a1, AC2a2, AC2a3 se encuentran circunscritos en la Fig. 4.27 los intervalos donde se detectaron transientes de EA de gran amplitud y con alta tasa de emisión. Estos intervalos pertenecen a las zonas de transición de cambio del material que atraviesa la broca durante el proceso de corte. En este punto se encuentra una remarcable semejanza a lo reportado con el trabajo de H. Niitsuma y N. Chubachi (1986) los cuales detectaron un efecto similar durante los ensayos de monitoreo de la EA en la perforación de pozos para explotación petrolera, realizados con una herramienta de tipo tricono. Si bien la frecuencia de la onda monitoreada en los trabajos de

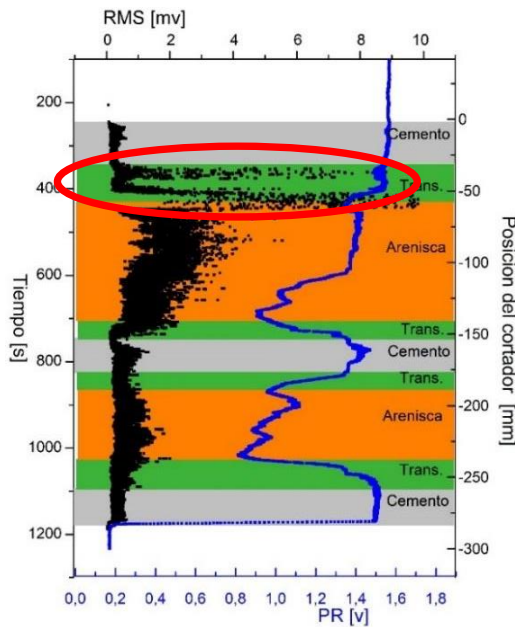
Niitsuma y Chubachi es inferior a la utilizada en el presente trabajo, ellos reportaron un aumento singular del valor de rms de la señal al encontrarse con tobas de mayor densidad (y por lo tanto de diferentes propiedades geomecánicas) que las que venían taladrando, en espesores tan finos como 10 mm de ancho.



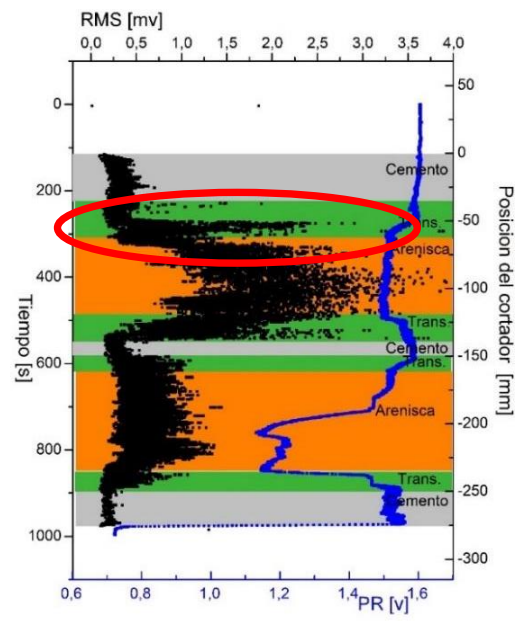
a.



b.



c.



d.

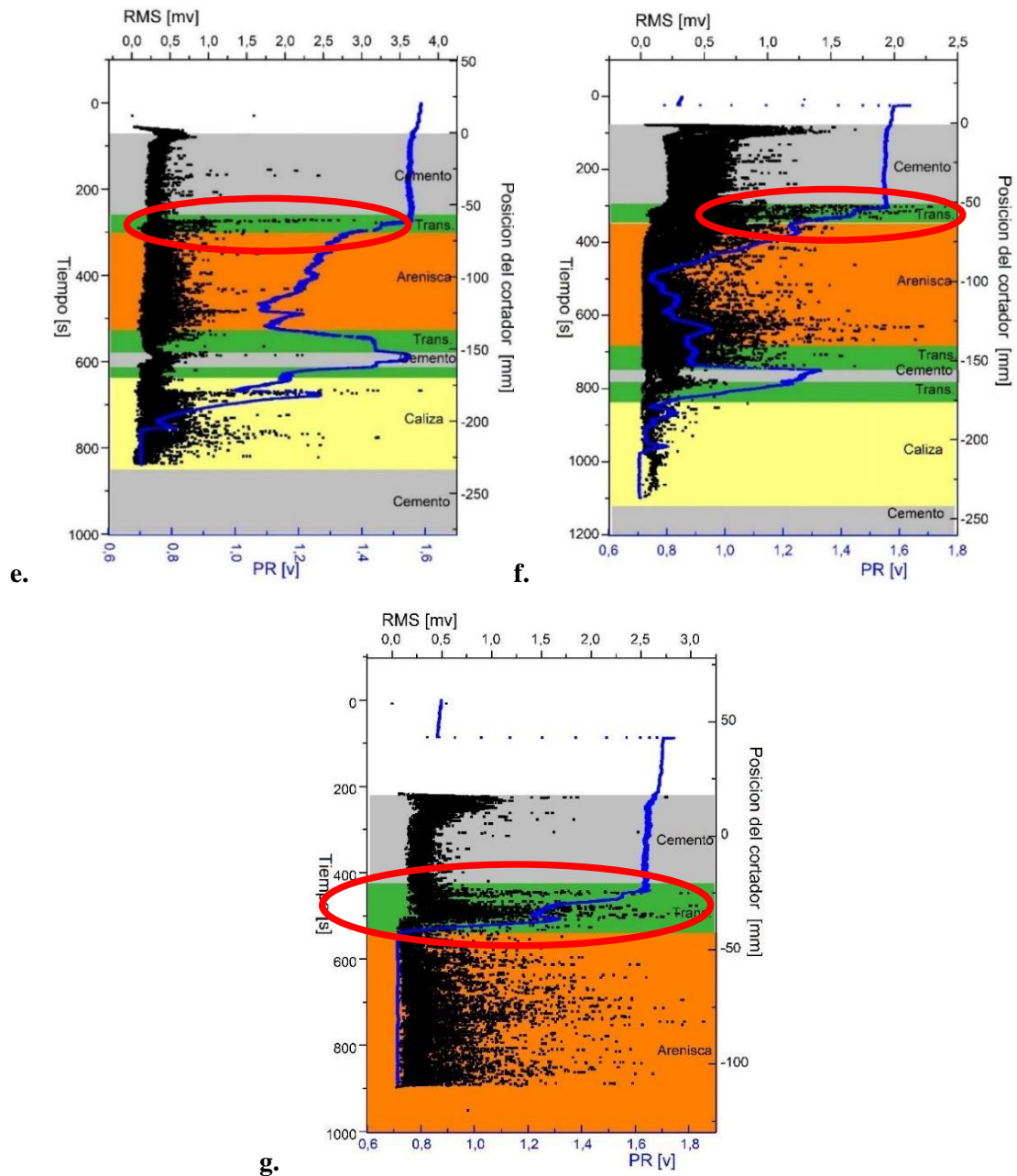


Fig. 4.27. Gráfico de RMS de EA donde se demarca inestabilidad y aumento de la amplitud durante el cambio de material de corte. a. C1a3, b. C1a4, c. A1a1, d. A1a2, e. AC2a1, f. AC2a2. g. AC2a3.

La existencia de dicho fenómeno puede ser atribuido a diferentes factores. Si consideramos el elemento de cementación (mezcla de cemento, arena y cal), que consolida las diferentes capas de rocas dentro de la probeta, este tiene una menor dureza y suele ser más fácil de taladrar que cualquiera de las rocas analizadas. Luego, a medida que el cortador avanza a través del cemento hacia un sustrato rocoso, pasa de un material de baja dureza a uno de dureza mayor. Si la capa de roca tiene cierto grado de planitud, la primera parte del cortador que encuentra esta diferencia de materiales, y por lo tanto de propiedades mecánicas, es la

punta del cortador. En este punto, la velocidad de corte del centro del cortador es prácticamente nula debido a que la rotación de la broca se produce respecto de su mismo eje. En esta instancia el proceso de corte está más asociado a una penetración por indentación que por acción de corte neta de los filos. Por otro lado, durante este proceso, la broca no tiene un centro de corte definido, y oscila entre diferentes posiciones de equilibrio hasta que finalmente se establece un centro de corte en el nuevo material de mayor dureza. Una vez centrada, la broca prosigue el proceso de corte de manera más estable. El nuevo centro de corte puede o no coincidir con el centro de corte establecido en el material anterior debido a la elasticidad del sistema. En el caso de que estos centros no coinciden, las oscilaciones e inestabilidad del corte muestran gran EA relacionada con este proceso en la zona de transición marcada.

4.3.3. Relevamiento fotográfico y cambio de centro de perforación

El relevamiento fotográfico realizado sobre los agujeros taladrados muestra el cambio ocasional del centro de perforación, cuando la broca se encuentra en la zona de interfase entre dos sustratos de diferentes propiedades mecánicas. Esto deja como marca reconocible un escalón en algún lugar de la periferia de la circunferencia del taladro, debido a la modificación del centro de corte como se muestra en las fotografías de la Fig. 4.28.

En el caso de que la capa de roca encontrada no tenga una planitud apreciable, la primera parte del filo que hace contacto con la misma puede ser la parte externa del filo principal o los filos secundarios. Esto produce fuerza de corte con componentes tangenciales al sentido de perforación que desviarán sucesivamente con cada rotación el centro de la herramienta produciendo grandes oscilaciones y una dinámica de corte muy irregular. Posiblemente esto puede evidenciarse también con una EA de alta amplitud, rms y tasa de his de la EA hasta que se restablezca el proceso de corte de forma pareja.

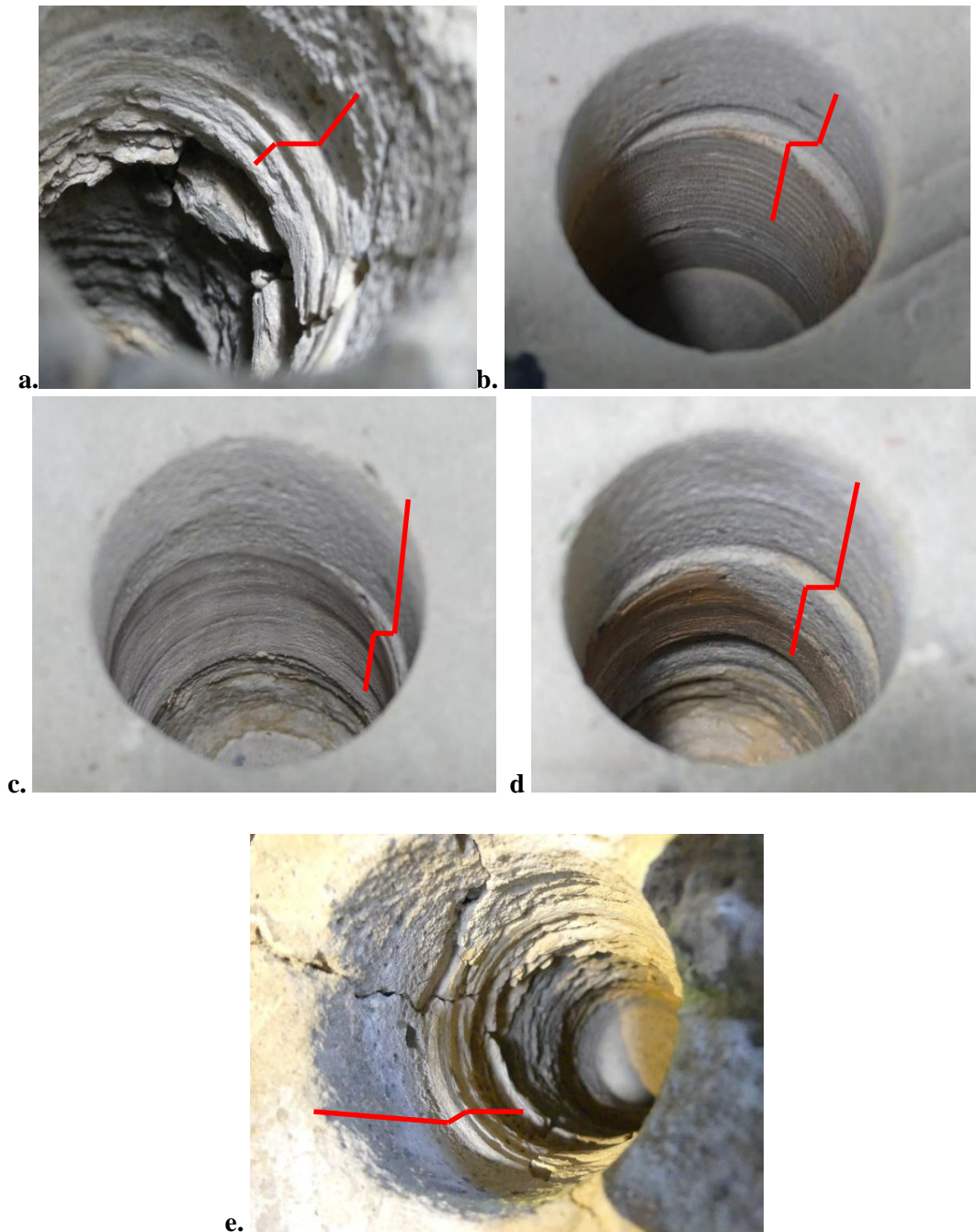


Fig. 4.28. Fotografías de perforaciones donde se demarca el cambio de centro de perforación que deja como resultado un escalón en el cuerpo del taladro. **a.**C1a3. **b.** A1a1, **c.** AC2a1, **d.** AC2a2. **e.** AC2a4.

4.3.4. Comparación de tendencias de amplitud y rms en función del material perforado

Un aspecto observado en los ensayos de perforación está relacionado con el cambio de la amplitud y varianza del rms de las señales de EA que se detecta cuando se pasa de cortar un material blando como el cemento de consolidación a cortar alguna de las capas de rocas de superior dureza, más allá de la zona de transición. Este tema de discusión también se

encuentra en publicaciones como la de Niitsuma, et. al 1986, Asanuma, Niitsuma y et. al 1988, 1989, 1990, Jung, et. al 1994, los cuales, si bien tienen esquemas experimentales diferentes y monitorean los ensayos de perforación en frecuencias inferiores a la utilizada en el presente trabajo para la EA, concuerdan en que, ante el cambio de material durante el proceso de corte, se observa una variación del rms de la señal, mostrando un aumento de estos parámetros cuando se cortan materiales densos, respecto de los menos densos. Una explicación tentativa a este fenómeno puede estar relacionada con las características mecánicas y físicas del material, que condicionan la forma de fractura. En general los trabajos científicos muestran que, a mayores índices del módulo de Young, dureza, densidad, valores en ensayos de Schmidt, y otras caracterizaciones mecánicas y físicas (como la medición de la velocidad de propagación de ondas P y S), la potencia necesaria para perforar o cortar la roca aumenta conjuntamente con la amplitud del rms de la EA (Asanuma y et. al (1990), Kumar, et. al (2011), Yari, et. al (2017), Khoshouei et al (2020)). Sin embargo, en esos trabajos no se profundiza en una explicación de dicho fenómeno.

En general un alto valor de estas propiedades geomecánicas, se asocia a un material difícil de perforar, en el cual se necesita una cantidad mayor de energía en forma de fuerza de avance, torque o rpm y eventualmente potencia hidráulica para obtener la misma tasa de penetración, en comparación con rocas más blandas, con menor límite elástico y límite de fractura y menos compactas. Al imprimir mayor potencia al proceso de corte, se encuentra a disposición mayor cantidad de energía mecánica para ser transformada en energía elástica ultrasónica y ser irradiada al medio circundante. Adicionalmente los materiales que muestran altos valores de parámetros geomecánicos suelen tener reducida ductilidad y modos de fractura o microfracturas con tendencia frágil. Estas fracturas frágiles, por definición, se producen con una rápida propagación, baja deformación plástica y gran parte de la energía se focaliza en crear los planos de corte de la superficie de fractura. Esto hace que parte de la energía de tensión elástica acumulada en el material, se transforme rápidamente en energía elástica de EA en un corto periodo de tiempo concentrando su intensidad. En contrapartida, otras rocas con valores de propiedades geomecánicas inferiores, desarrollan su proceso de fractura acompañado con una componente de deformación plástica mayor y una transformación de energía mecánica en EA más gradual. Esto hace que la intensidad en función del tiempo sea menor y por lo tanto las amplitudes máximas alcanzadas durante la emisión de EA sean más bajas.

Una comparación entre los valores de tensión de ruptura de la roca *Arenisca* respecto del *Cemento* de consolidación muestra que este valor es casi tres veces superior al límite de fractura del cemento (Ver tabla 3.5). Si se analiza el comportamiento general del rms de la EA de la Fig. 4.29 para los ensayos (A1a1, A1a2, A1a3), se observa un aumento cuando la broca corta la roca *Arenisca* y un descenso del rms cuando se corta *Cemento*, concordando con los resultados de las publicaciones anteriormente citadas. En las figuras están marcadas con flechas la tendencia aumento y disminución del parámetro rms de la EA para los intervalos comparados. Una ampliación de estas figuras se encuentra en los análisis realizados para cada una de las perforaciones individuales al principio de este capítulo. En el análisis de otras perforaciones como los ensayos C1a2 y C1a3 (Fig. 4.30) se pueden marcar zonas de aumento de amplitud cuando se compara el corte de la roca Caliza respecto del *Cemento*, mostrando también un aumento de la varianza de los valores de la señal. Si se evalúa las diferencias entre las tensiones de ruptura respectivas de estos materiales, se advierte que la roca Caliza supera aproximadamente en 4.3 veces el límite de fractura del *Cemento* (tabla 3.5).

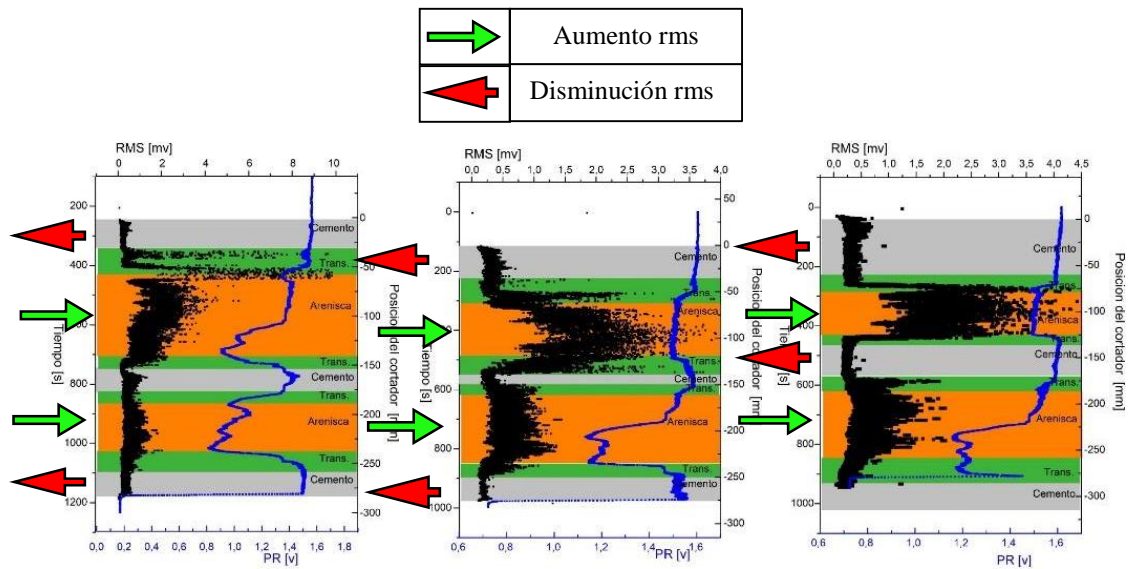


Fig. 4.29. Comparación de tendencia del rms de EA para la perforación de roca Arenisca respecto de *Cemento* de consolidación.

Para los ensayos de la probeta CP1a1, CP1a2, CP1a3 (Fig. 4.31) se verifica que durante el perforado de la roca Pizarra el valor rms de la EA aumenta respecto de los valores para la roca Caliza y el *Cemento* de consolidación

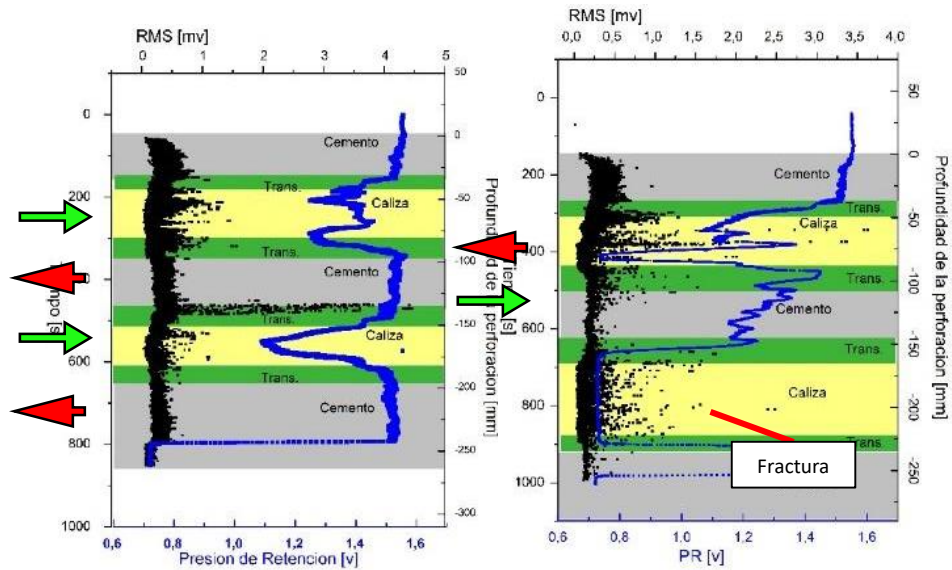


Fig. 4.30. Comparación de tendencia del rms de la EA durante el corte de la roca Caliza respecto del Cemento de consolidación.

La pizarra tiene un límite de fractura superior a los 105 MPa según bibliografía, siendo la roca de mayor resistencia a la fractura de nuestro sistema experimental. Estos resultados muestran concordancia con los comportamientos generales expuestos en las publicaciones científicas de Kumar et al 2010 y 2011, Vardhan et al 2009, Karakus et al 2014, Pérez et al 2016.

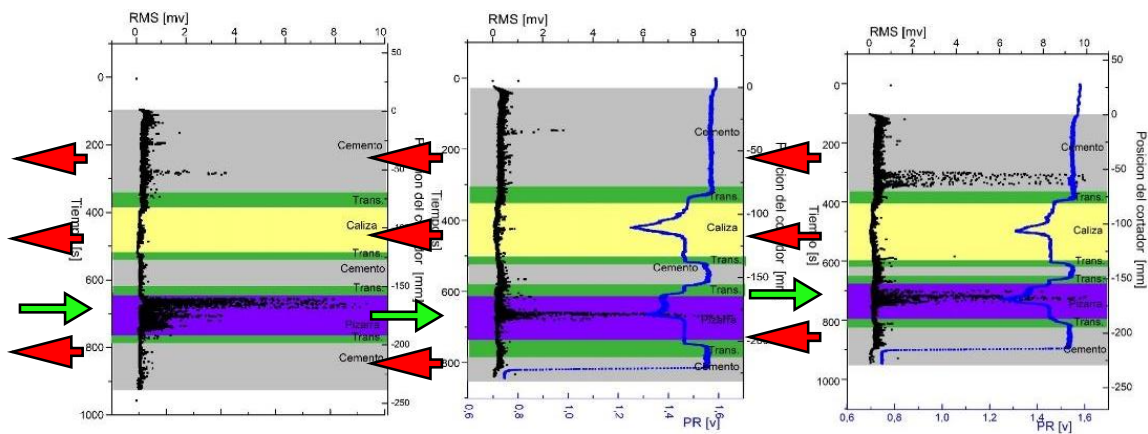


Fig. 4.31. Comparación de tendencia del rms de la EA durante el corte de la roca Pizarra respecto de la roca Caliza y del Cemento de consolidación.

Este comportamiento del valor rms de la EA en función del material no pudo ser verificado sistemáticamente en todos los ensayos. Existen perforaciones en donde el geomaterial de mayor límite de fractura produce una EA menor respecto del material de menor límite de fractura. Un ejemplo de esto son las Figs. 4.32 que muestra la existencia de casos donde la

perforación de la Caliza o la Arenisca exhiben un rms inferior que el obtenido durante el perforado del Cemento.

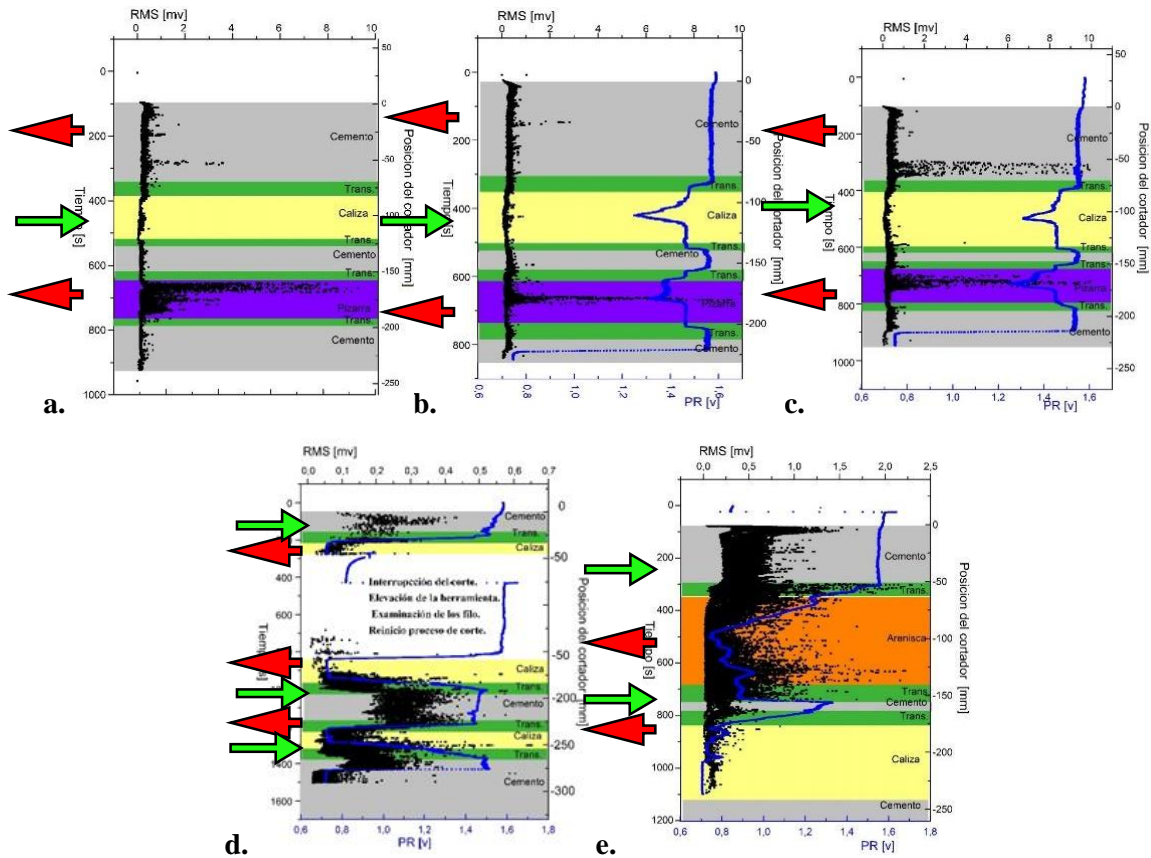


Fig. 4.32. Comparación del rms de EA respecto materiales con diferentes límites de fractura durante la perforación en los ensayos **a.** CP1a1, **b.** CP1a2, **c.** CP1a3, **d.** C1a4, **e.** AC2a2.

Los resultados obtenidos en la presente sección muestran que no podemos relacionar de manera concluyente un alto valor de rms y amplitud a un material con altos valores de propiedades geomecánicas. Si bien en principio parecería ser que el material de mayor tensión de fractura muestra el valor del rms de AE más alto durante la perforación, esto no se cumple en todos los casos. Esta situación podría estar asociada a que el mecanismo de fractura que induce el cortador (independientemente de las características del material) y otras condiciones de la perforación (la fuerza de avance, la presión hidráulica, etc.) tienen una fuerte influencia en los valores de amplitud del rms pudiendo producir una modificación en el comportamiento de la EA, lo que hace que no se puede a priori, establecer estrictamente un nivel de intensidad de la EA según el mayor o menor límite de fractura del geomaterial.

4.3.5. Evaluación del cortador de cuatro filos (SAE O2)

Un análisis del ensayo C1a4 y la continuación del ensayo AC2a3 (Fig. 4.33 a y b), ambos realizados con el cortador de 4 filos, muestra que la PR cae a un valor mínimo constante durante el perforado la roca Caliza o Arenisca respecto del valor para el perforado del Cemento de consolidación. Este efecto puede ser asociado a que esta herramienta de corte posee 4 filos cortantes con un espesor de aproximadamente 5 mm. En comparación con la herramienta de WC el cortador de 4 filos de acero tiene un área de contacto considerablemente mayor entre la roca y el cortador y por lo tanto la herramienta se ve “frenada” por la roca, de mayor dureza que el cemento. Esto produce que la PR descienda, ya que pasa a ser la roca la que limita el avance de la perforadora y no el sistema hidráulico de retención (PR). Este efecto es análogo al que se observará posteriormente durante los ensayos de perforación con un cortador fracturado de WC. Un análisis de la amplitud de la EA en el caso del ensayo C1a4 (respecto de las demás perforaciones realizadas en la misma probeta) muestra una disminución del valor del rms de la EA, mientras que el caso AC2a3 el valor del rms aumenta en comparación con las otras perforaciones realizadas. Este comportamiento no se explica claramente y por lo tanto se evaluaron adicionalmente los parámetros de cuentas, energía y duración de las señales de EA para estos ensayos en particular (Fig. 4.8 y 4.17). Los resultados muestran que, al utilizar la broca de 4 filos, la EA del proceso tiene un mayor número de cuentas, así como mayor duración y energía respecto de las perforaciones realizadas para las mismas probetas con el cortador de WC. Esto significa que las señales son más largas y se mantienen por más cantidad de tiempo por sobre el umbral de medición como si fueran señales de mayor continuidad. Muchos de los Hits observados llegan a 100.000 μ s de duración el cual es el tiempo máximo establecido por software para la adquisición de la EA (Límite de Máxima Duración). En base a estos resultados se puede establecer que el aumento de área de contacto del cortador aumenta la abrasión, la fricción y el proceso de molienda del material cortado, lo cual juntamente con la existencia de los 4 filos de corte que son múltiples fuentes de ondas elásticas, producen una EA con características más continuas, de mayor duración, gran número de cuentas y alta energía en comparación con el cortador de WC. Los parámetros cuentas, energía y duración de la de EA pueden eventualmente ser utilizados para diferenciar estos dos tipos de cortadores con geometrías y formas de funcionamiento diferentes.

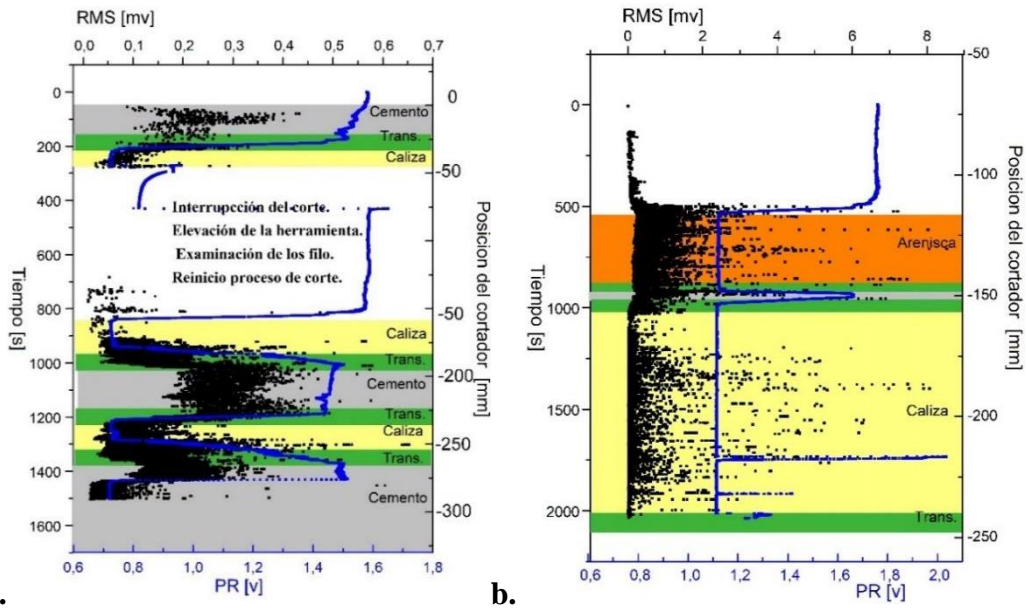


Fig. 4.33. Valores de rms para perforaciones con cortador de 4 fillos de aceros SAE O2 **a.** Ensayo C1a4, **b.** Ensayo ACa3.

4.3.6. Análisis durante la fractura del cortador de WC

Para el estudio del evento de fractura del cortador de WC se analizarán los casos C1a3, AC2a1, AC2a2 y C1a4, donde la Fig. 4.34, muestra un intervalo de tiempo antes y después del suceso de fractura para estos ensayos, en función del parámetro rms de la EA y de la PR. Se observa que durante el instante de la fractura del filo, la PR aumenta rápidamente y luego cae a valores mínimos. De manera simultánea la EA muestra un aumento repentino del rms. Cuando el filo de WC se fractura lo hace de manera frágil, el material que antes estaba cortando y soportando la presión de avance de la broca, desaparece. Esto produce una aceleración repentina de la herramienta, la cual es limitada por el circuito hidráulico de retención (aumento de la PR). Posteriormente a medida que el cortador sigue descendiendo, el filo fracturado y el cuerpo del cortador hacen contacto pleno con la superficie de corte haciendo que la PR descienda. El proceso de corte se lleva a cabo con el filo de WC remanente y el cuerpo endurecido del cortador, donde las superficies involucradas son mucho más grandes y produce un aumento importante de la resistencia al avance.

Esta es la causa de la disminución de la PR la cual, posteriormente se mantiene constante durante el resto de la perforación. Este suceso de rotura del cortador en general va acompañado de un aumento de rms debido a que la fractura del WC es frágil, con alta energía y en corto periodo de tiempo. En la Fig. 4.35 se redujo la zona de análisis a un intervalo total de 10 s donde se identifica el instante de la fractura inicial en un margen temporal menor al

segundo. Posteriormente se individualizan estos Hits de EA involucrados en el suceso de la rotura inicial. Se observa que el proceso de fractura del WC continúa después de este punto, pero en nuestro caso, se identificó el inicio del suceso desencadenante de la secuencia de deterioro de la herramienta. Esta placa de material de WC sigue fracturando en otros lugares de manera sucesiva hasta quedar con la conformación típica de la Fig.4.36 donde la herramienta carece de los extremos del filo principal y filos laterales y solo queda remanente parte del filo central de la broca.

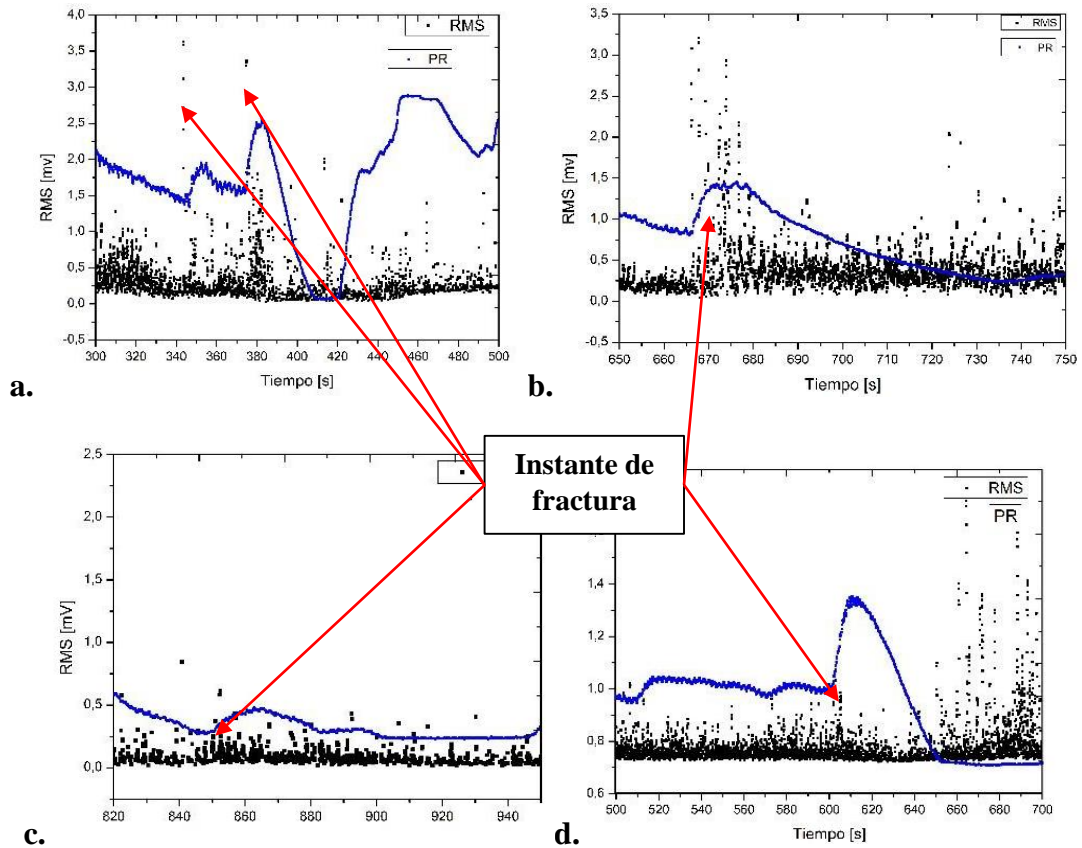


Fig. 4.34. Valor rms de la EA y PR al momento de la fractura del cortador de WC. **a.** Perforación en probeta C1a3, **b.** Perforación en probeta AC2a1, **c.** Perforación en probeta AC2a2, **d.** Perforación en probeta AC2a4.

Este proceso completo de fractura tarda en total algunos segundos (rotaciones) en completarse o eventualmente se desarrolla en instantes de tiempo separados por varios segundos que pueden ser visiblemente diferenciables como muestra Fig. 4.35a. Esto hace que existan varios Hits de EA relacionados al proceso de rotura que son desencadenados a partir de la fractura inicial claramente identificada.

En las Figs. 4.37 a 4.39 se identificaron las formas de ondas y el espectro de potencia para algunos de los hits pertenecientes a la fractura del WC durante los ensayos C1a3, AC2a4. En el ensayo C1a3 se identificó que la fractura sucedió en dos secuencias de alta amplitud los tiempos en $t=343.5$ s y $t=374.7$ s, mientras que para el ensayo AC2a4, la fractura se produjo en el instante $t=601.8$ s.

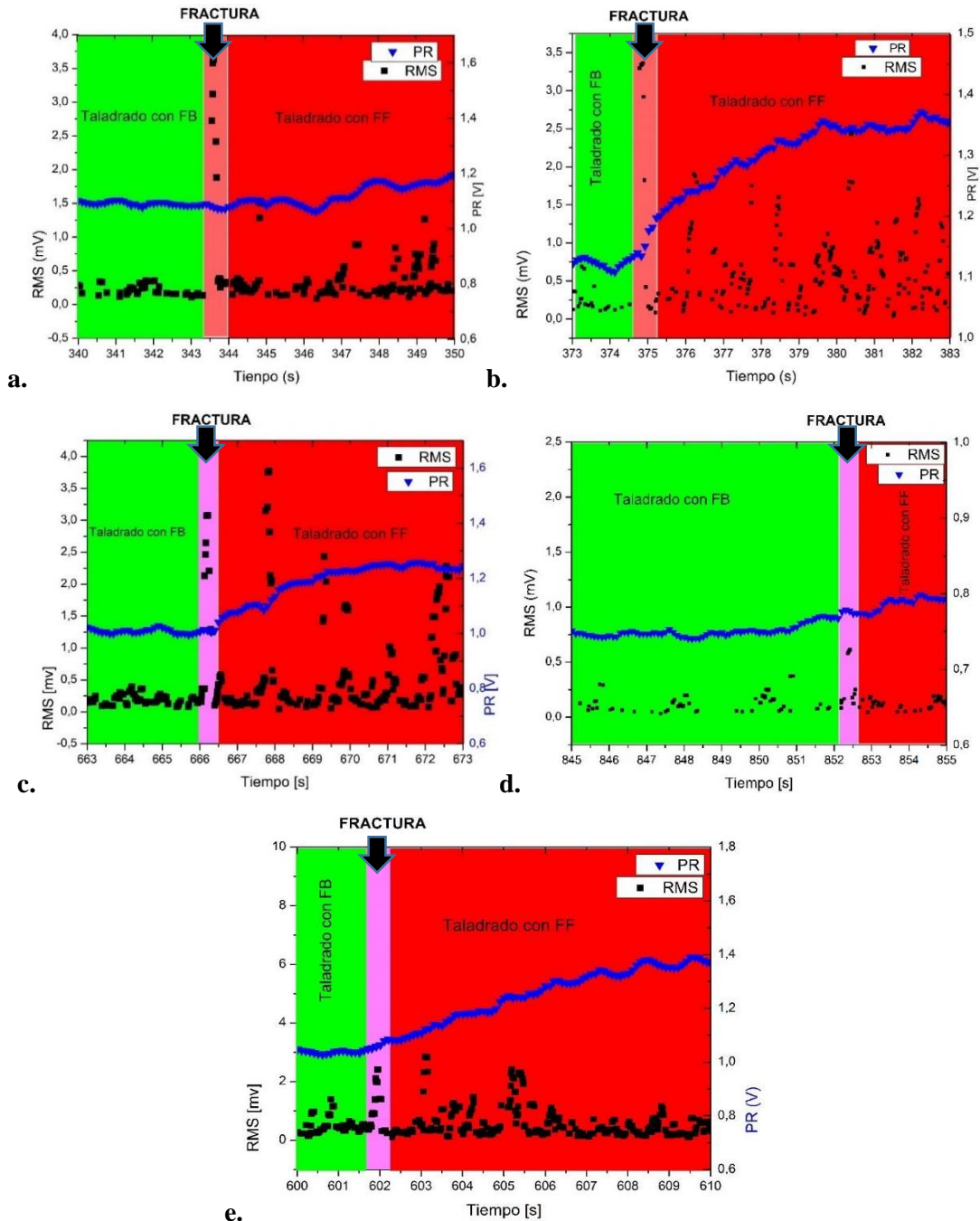


Fig. 4.35. Intervalo de fractura e identificación de los hits de las fracturas del cortador de WC para ensayos. **a.** C1a3 (primera fractura). **b.** C1a3 (segunda). **c.** AC2a1. **d.** AC2a2. **e.** AC2a3.



Fig. 4.36. Cortador de 2 filas de WC con FF (Filo Fracturado). Forma típica de fractura.

Estos eventos de fractura están conformados por varios Hits sucesivos con muy poca separación temporal entre sí y tienen una forma de onda tipo explosión donde en algunos casos su duración supera 1 ms. También se encontró que la diferencia temporal entre los hits de un mismo evento de fractura es inferior a la décima de segundo. Para cada una de las formas de onda identificadas, se le realizó un análisis de frecuencia en un rango de 20 KHz a 1 MHz.

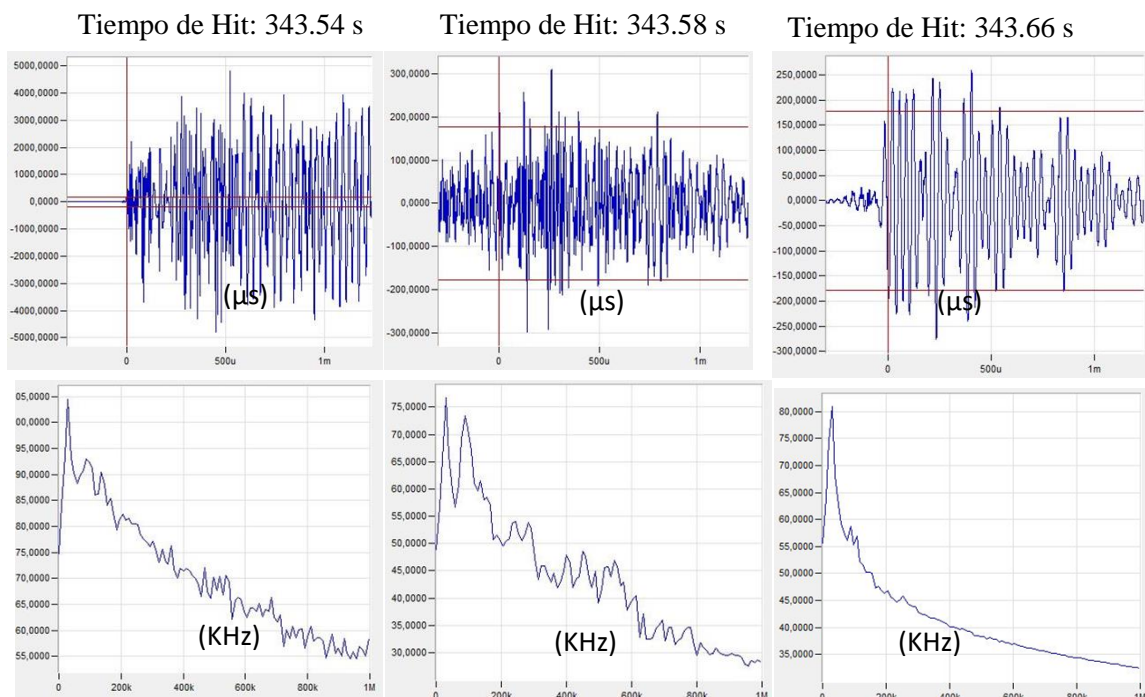


Fig. 4.37. Formas de onda y tiempos correspondientes a la primera fractura de la broca de WC para ensayo C1a3.

Estos análisis muestran que podrían existir dos tipos de señales con componentes en frecuencia de gran amplitud en 35 KHz, y 90 KHz y donde solo algunas formas de onda muestran importantes componentes en la porción más alta del espectro de frecuencia (mayor

a 200 KHz), concordante con las altas frecuencias relacionadas con eventos de rápida propagación y alta liberación de energía en corto periodo de tiempo como una fractura frágil.

En las figuras 4.40 a 4.43 se alinearon los gráficos del parámetro rms de la EA para cada una de las perforaciones con las fotografías de los respectivos taladros en busca de corresponder las zonas de los gráficos de EA con la morfología de la superficie perforada. Se puede identificar que luego de la fractura del cortador la terminación superficial del taladro es mucho más deficiente, esto se demarca como las zonas de flechas rojas sobre las fotografías respectivas.

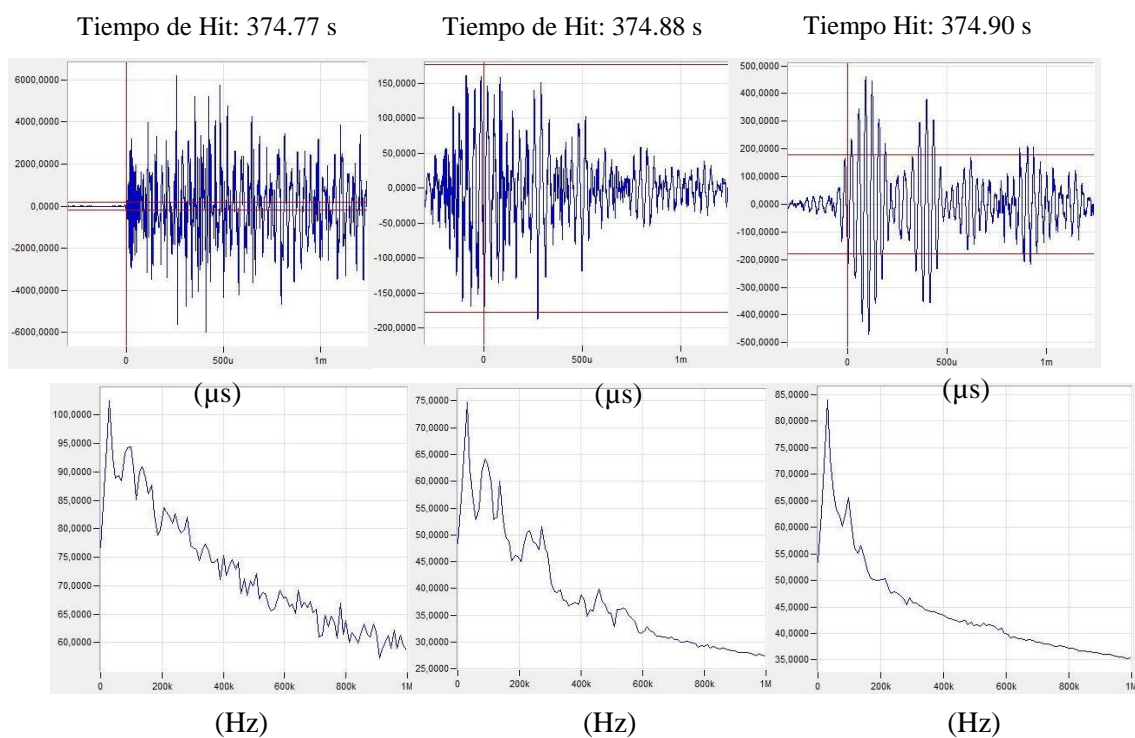


Fig. 4.38. Formas de onda espero de potencia correspondiente a los Hits de la segunda fractura de la broca de WC durante ensayo **C1a3**.

Esta terminación deficiente es producto del corte irregular del filo fracturado (FF) y se puede observar que el rms del proceso de corte post- fractura tiene una varianza mayor que el del corte con FB. También se observa un aumento de los valores y la varianza de los parámetros cuentas y energía de EA debido a la condición no estable de corte, el avance irregular de la broca sobre la superficie y el cambio de sistema de corte el cual una vez eliminados los filos exteriores se produce por compresión, arado y desintegración de la roca con el cuerpo endurecido del cortador.

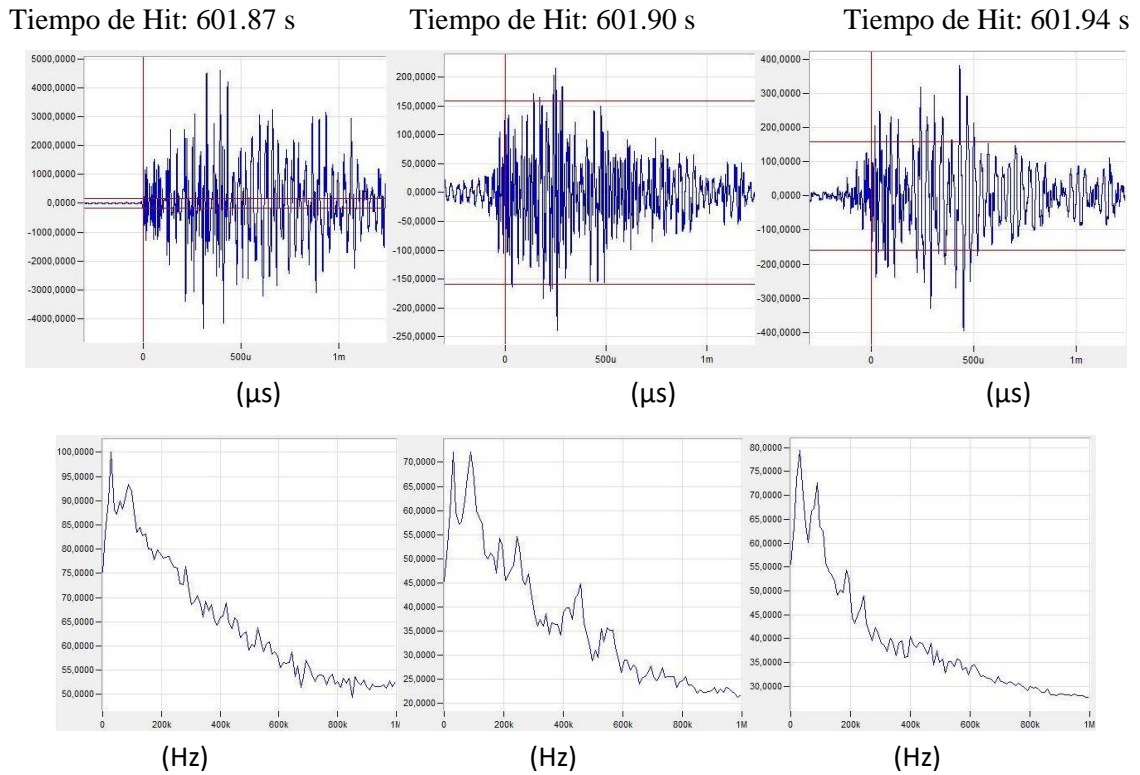


Fig. 4.39. Formas de onda y espectro de potencia correspondientes a la fractura de la broca de WC durante el ensayo AC2a4.

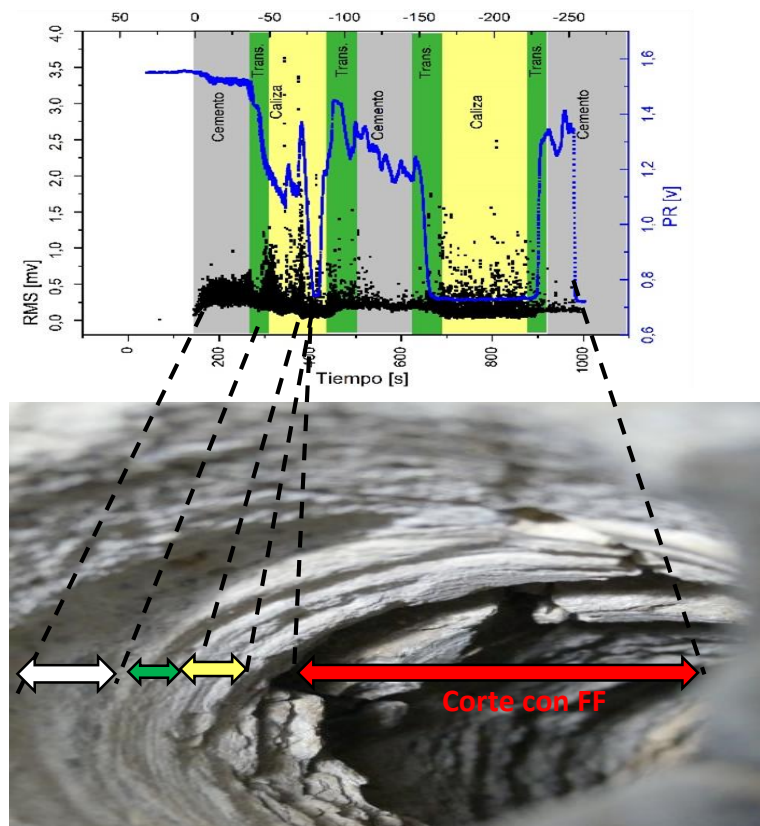


Fig. 4.40. Superposición gráfica del parámetro rms de EA respecto de la fotografía de la perforación para el caso C1a3. En rojo la zona perforada con el filo fracturado.

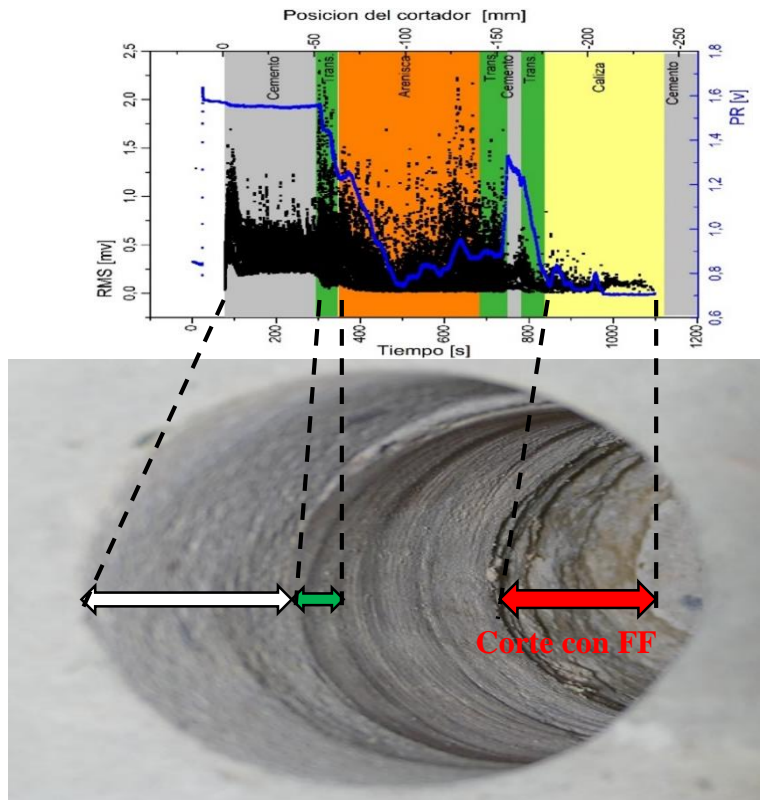
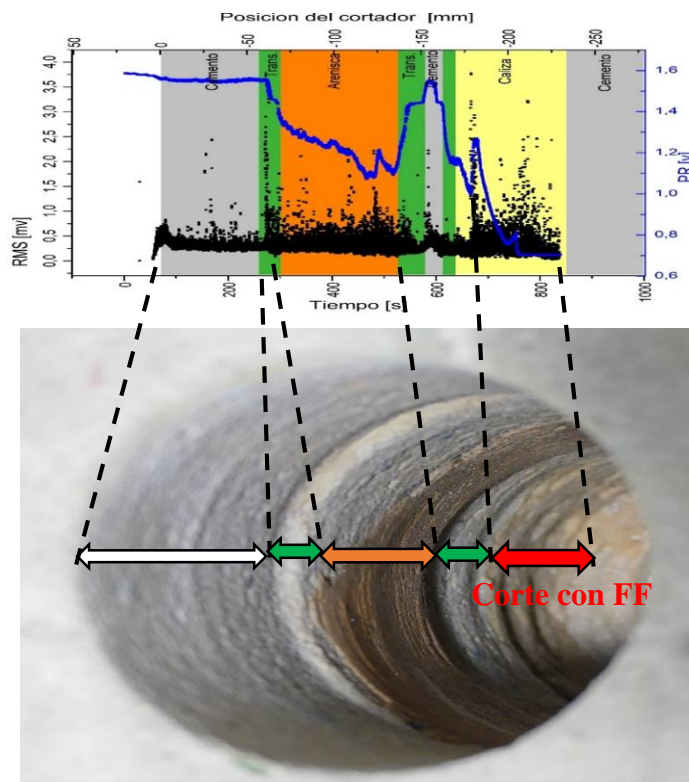


Fig. 4.41. Superposición gráfica del parámetro rms de EA respecto de la fotografía de la perforación para el caso AC1a1. En rojo la zona perforada con el filo fracturado.



4.42. Superposición gráfica del parámetro rms de EA respecto de la fotografía de la perforación para el caso AC1a2. En rojo la zona perforada con el filo fracturado.

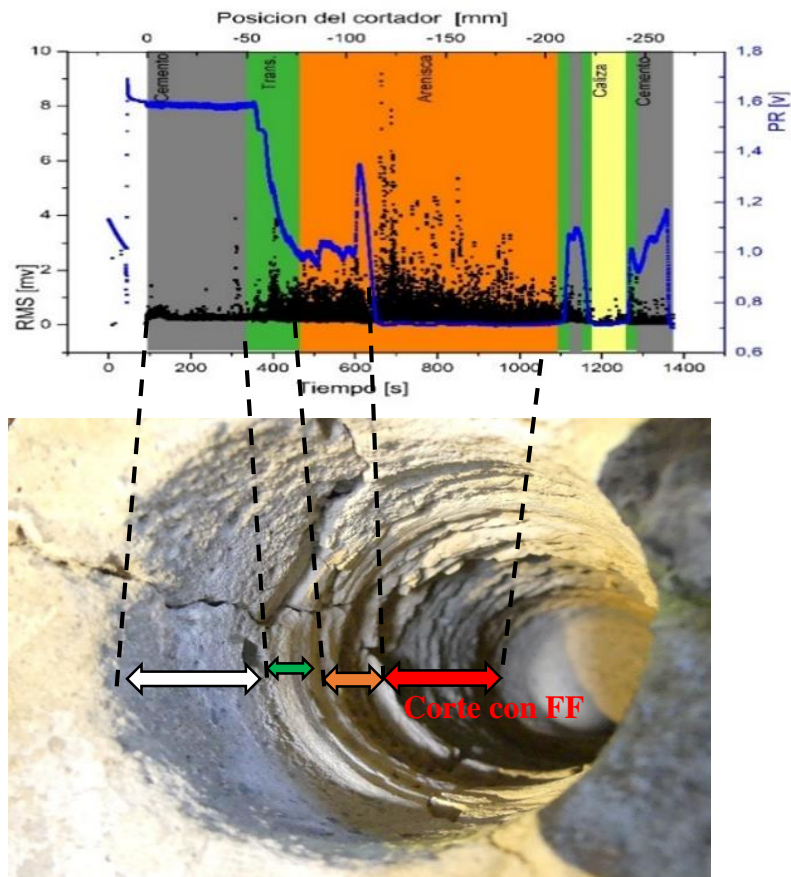


Fig. 4.43. Superposición gráfica del parámetro rms de EA respecto de la fotografía de la perforación para el caso AC1a4. En rojo la zona perforada con el filo fracturado.

Se pudo establecer que en varios casos donde se producen los cambios de centro de perforación mostrado en la Fig. 4.28, se produce la fractura del cortador un tiempo después. Estos eventos pueden estar relacionados ya que la excentricidad en el proceso de perforación hace que la broca rota sobre un eje que no es concéntrico con su cuerpo, y por lo tanto corta de manera irregular recargándose contra sus filos laterales. Si esta zona de transición e inestabilidad es traspasada con éxito, eventualmente el proceso de corte puede seguir de manera más estable, lo que da como resultado un taladrado con una baja rugosidad superficial. Pero si la zona de inestabilidad no es superada con éxito, finalmente se produce el daño y fractura del filo de corte.

4.4 Resultados y discusión del análisis de *correlación de señales* aplicado a la información paramétrica obtenida mediante EA

En la presente sección se expondrán los resultados pertenecientes a la aplicación de la herramienta de correlación sobre los parámetros de EA de los ensayos de perforación que se mostraron en la sección 4.2 de resultados. Los análisis de autocorrelación se practican respecto a los parámetros de EA de amplitud, ASL, rms, energía, duración, cuentas, frecuencia promedio y rise time, pertenecientes a una misma perforación. Los análisis de correlación cruzada se practican para los mismos parámetros de EA anteriormente mencionado, los que se correlacionan de manera cruzada entre diferentes perforaciones de la misma probeta. La herramienta de correlación (autocorrelación y correlación cruzada) será aplicada a los ensayos A1a1, A1a2, A1a3 y CP1a1, CP1a2 y CP1a3.

4.4.1. Resultados de autocorrelación de parámetros de EA para ensayos A1a1, A1a2, A1a3

En la Fig. 4.44 a 4.46 se muestran los resultados de la autocorrelación para solamente los parámetros *amplitud*, *rms*, *energía*, y *cuentas de EA*. Los resultados para todos los parámetros de EA examinados en todos los ensayos se encuentran expuestos en el **anexo A**.

En los casos de las Figs. 4.44 a y b, 4.45 a y b y 4.46 a y b, corresponden a la auto correlación del parámetro amplitud y rms de la señal de EA para los diferentes ensayos de la probeta de Arenisca. Se observa que estos parámetros poseen poca variación durante la convolución con ellos mismos. Específicamente el parámetro amplitud de EA muestra una geometría triangular con un aumento monotonómico del valor de correlación, hasta el máximo de correlación y posteriormente un descenso monotonómico a cero a medida que las señales se convolucionan. Esto puede ser atribuido a la escala logarítmica de la amplitud, donde no se hacen evidentes las grandes variaciones de los valores absolutos de este parámetro. Recordemos que aproximadamente una diferencia de 20 dB de amplitud entre dos señales de EA representa una diferencia en voltaje en un factor multiplicativo de 10. También se observa que, debido la forma triangular de la autocorrelación de la amplitud, la primera mitad del ensayo es muy similar a la segunda mitad. Lo que en principio no provee información útil.

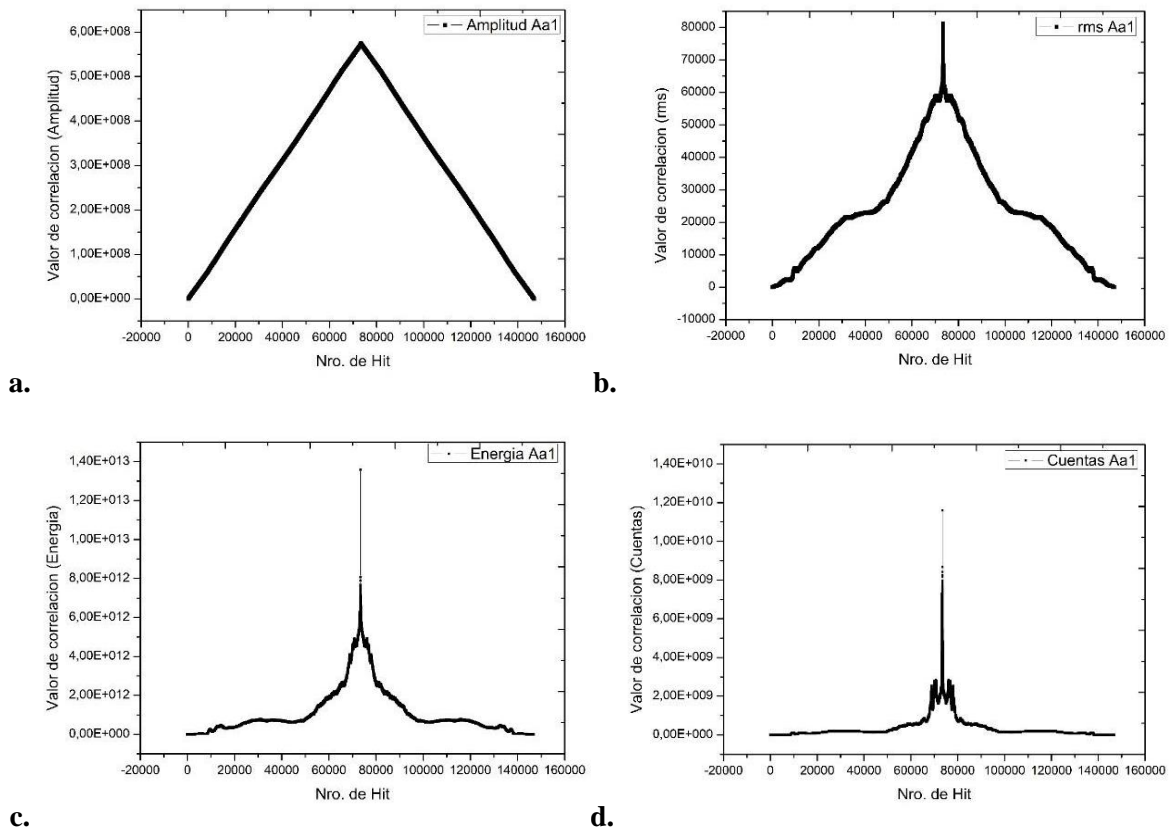


Fig. 4.44. Auto correlación para ensayo **A1a1** de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

El parámetro *rms* de la EA muestra en algunos casos variación de la correlación más marcada que el parámetro amplitud. Esto se atribuye a la integración en tiempo de la amplitud, que se produce para el cálculo del rms. El aumento del rms, se puede asociar a un aumento genuino de la EA, en el intervalo de tiempo considerado. Esto significa que, si hay un aumento en el rms, existe una tendencia marcada de aumento de la amplitud de los Hits de EA, mientras el aumento de amplitud del Hit (sin la integración temporal) puede deberse a un evento de alta amplitud particular o estocástico del proceso de perforado el cual no marca una tendencia definida.

En las Figs. 4.44 c y d, 4.45 c y d, 4.46 c y d, se observa la correlación de los parámetros *energía y cuentas de EA*, los cuales revelan mayor nivel de detalle en comparación con la correlación de los parámetros rms y amplitud de EA. Particularmente la correlación del parámetro *cuentas EA* muestra sectores de importante variación en comparación con el parámetro energía de la EA.

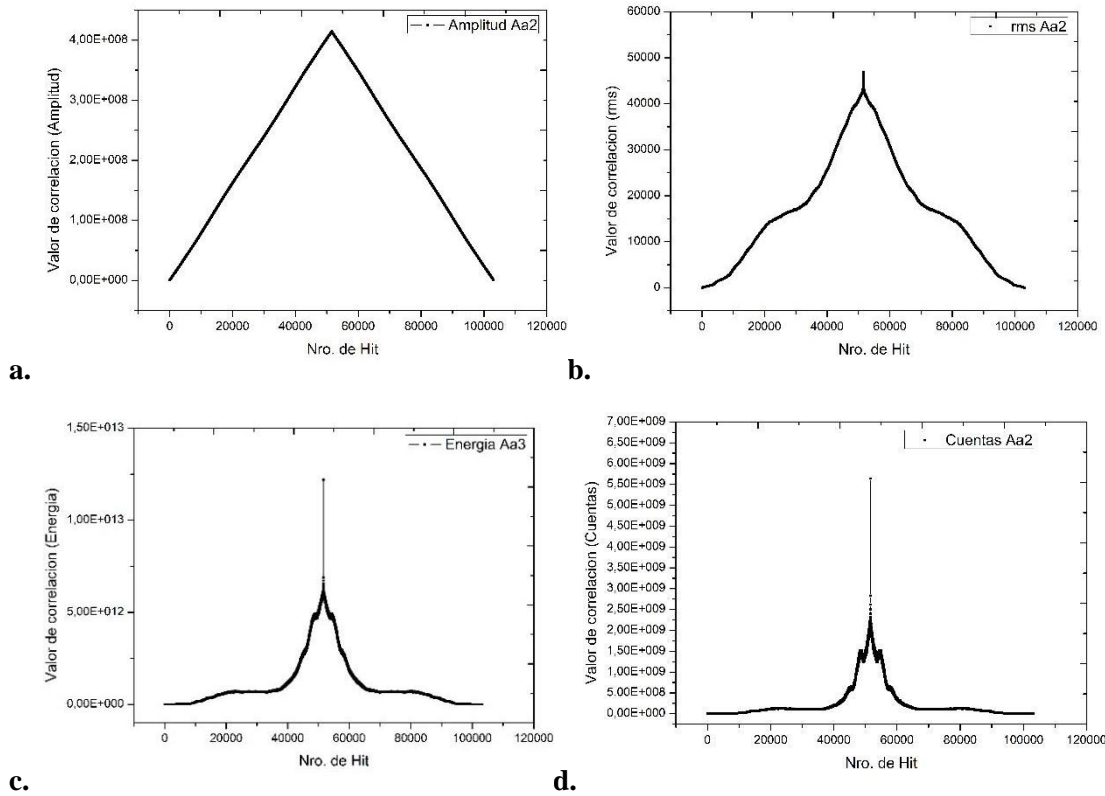


Fig. 4.45. Auto correlación para ensayo A1a2 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

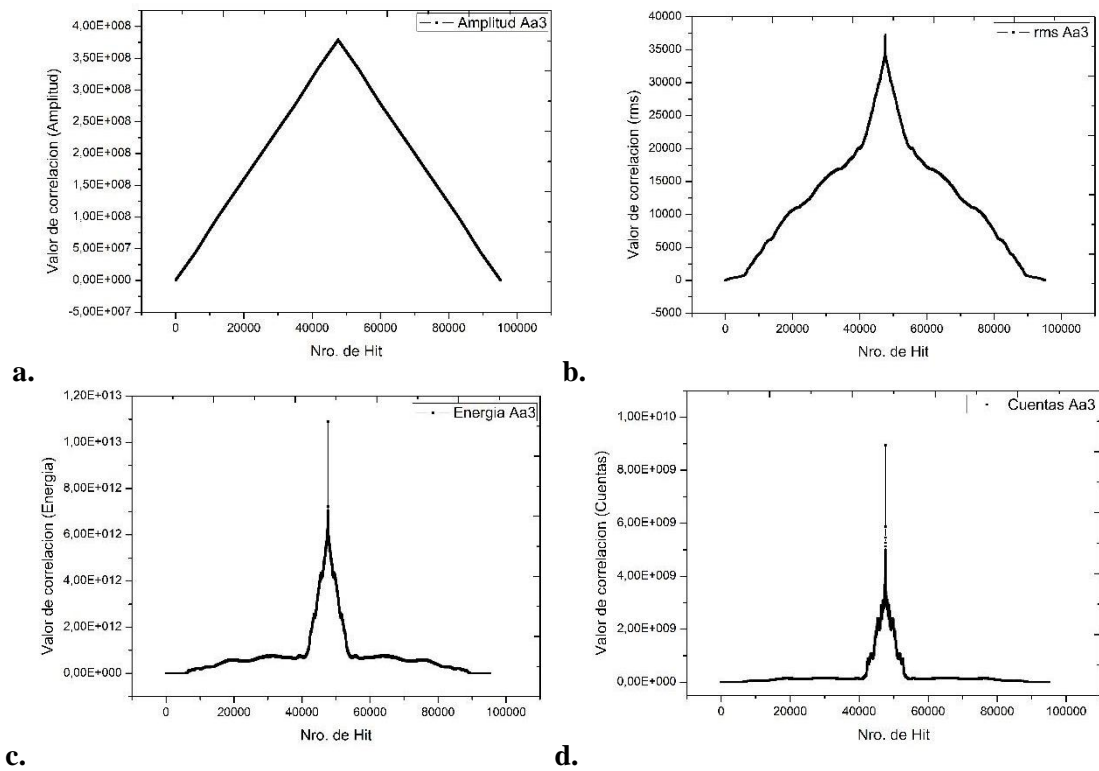


Fig. 4.46. Auto correlación para ensayo A1a3 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

Estas variaciones pueden ser relacionadas a tiempos específicos del ensayo de perforación ya que cada punto de correlación corresponde a un Hit de EA, el cual tiene asociado un tiempo único de ocurrencia. En base a lo anterior se puede realizar el proceso que relaciona un punto particular de la serie de correlación con un Hit de EA en un tiempo definido. Esto permite posicionar gráficamente (en tiempo), los dos ensayos que se están convolucionando. Estos análisis toman a los Hits de EA como una serie de datos según la secuencia de aparición, los cuales carecen de una base de tiempo regular, debido a que la tasa de adquisición de hits/s que registra el sistema de EA, una vez establecido el umbral y dentro de los límites del equipo, está definida casi exclusivamente por la naturaleza estocástica del fenómeno estudiado. Desde un punto de vista temporal, esta serie de datos paramétricos no están equidistantes, pero existe una relación directa entre el número de Hit de correlación y el tiempo de la EA, ya que cada dato correlacionado (Hit de EA) tiene un tiempo específico de aparición que puede ser identificado. Detalles más específicos de esta operación se pueden encontrar en el capítulo 3 perteneciente al montaje experimental.

4.4.2. Resultados de autocorrelación de parámetros de EA para ensayos CP1a1, CP1a2, CP1a3

Las Figs. 4.47, 4.48, 4.49 muestran los resultados de los cálculos de la autocorrelación aplicados sobre los parámetros de EA para los ensayos realizados sobre la probeta compuesta por roca Caliza, Pizarra y cemento de unión. En esta serie de análisis se repite el comportamiento observado en las correlaciones de la probeta de Arenisca (A1, a1, a2 y a3) donde la convolución del parámetro de amplitud de EA en las Fig. 4.47a, 4.48a y 4.49a se obtiene una figura triangular. Las Figs. 4.47b, 4.48b y 4.49b corresponden a la correlación del parámetro rms de la EA donde se pueden observar algunas variaciones de interés que son más claramente marcadas en las Fig. 4.47 c y d, 4.48 c y d, y 4.49 c y d para los parámetros cuentas y energía de la EA. Nuevamente estos dos últimos parámetros parecen mostrar con mayor grado de detalle el comportamiento de la serie de hits de EA durante el proceso de perforado.

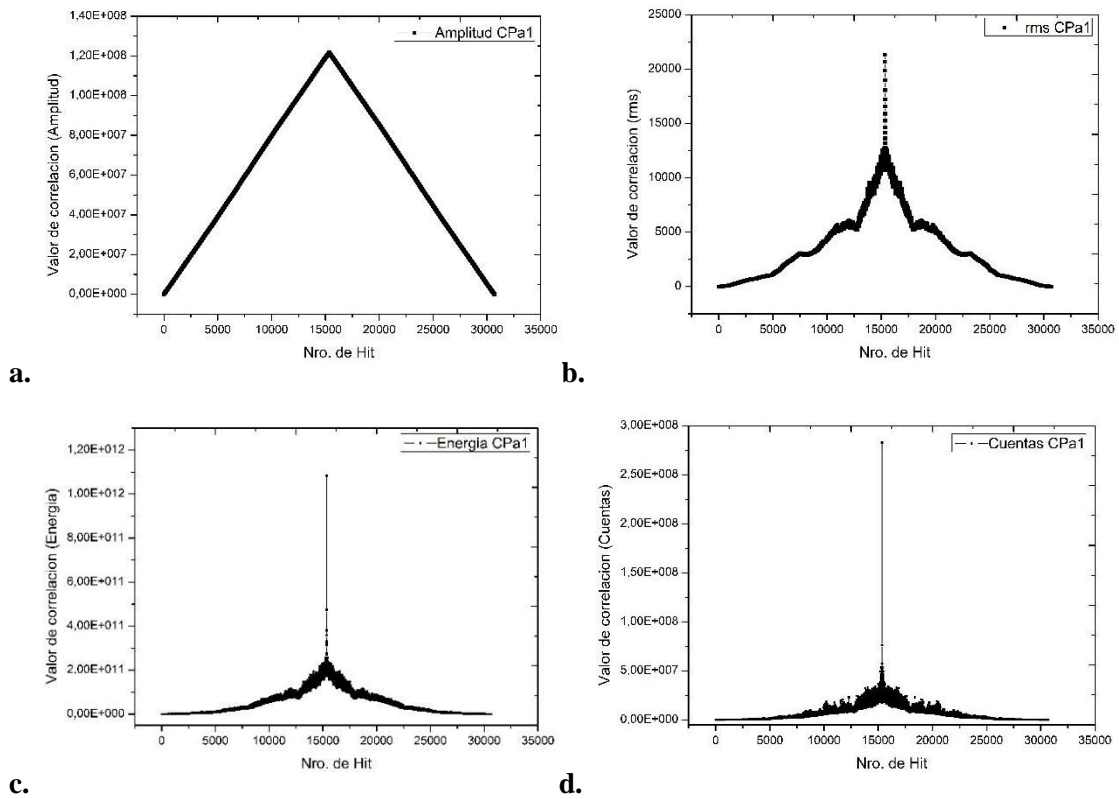


Fig. 4.47 Auto correlación para ensayo CP1a1 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

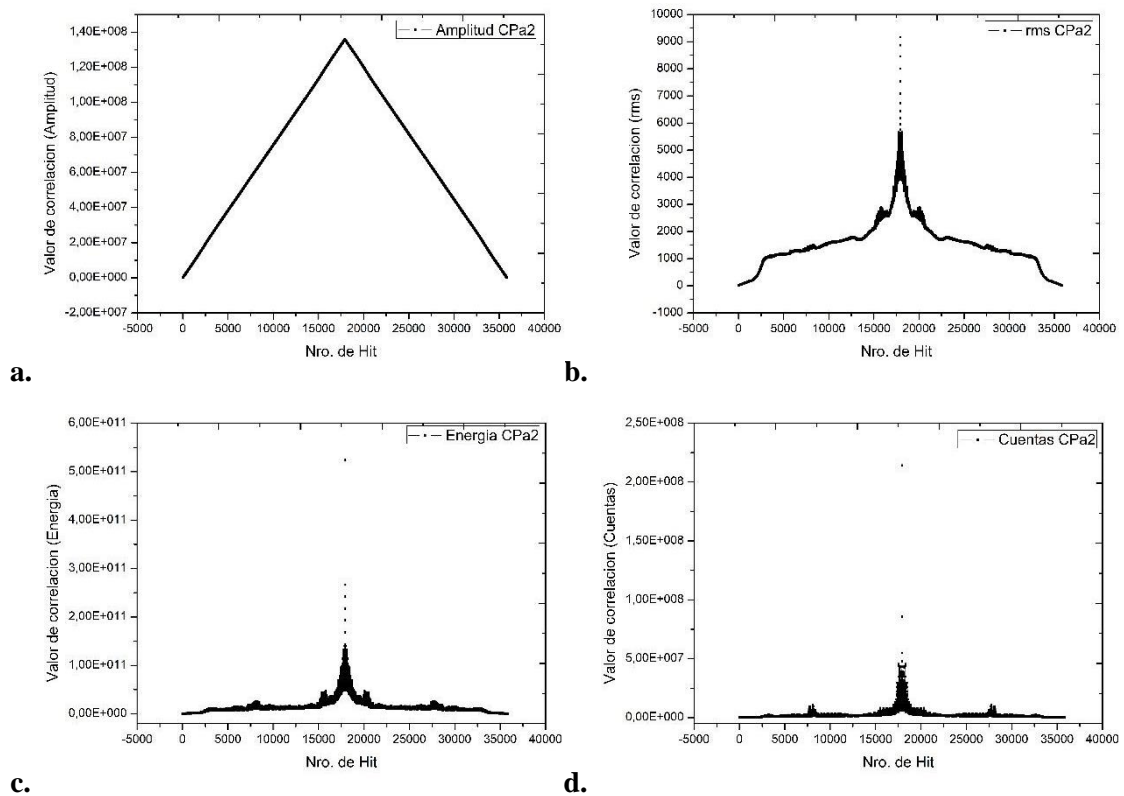


Fig. 4.48. Auto correlación para ensayo CP1a2 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

Los análisis de autocorrelación para distintas probetas y perforaciones permitieron mostrar que el parámetro de amplitud de la EA no brinda información útil al aplicar esta herramienta de análisis. Por el contrario, los parámetros cuentas y energía de EA muestran variaciones que permiten identificar intervalos de interés los cuales se estudiarán, asociándose a un tiempo de ensayo y a la profundidad de la broca respecto de la probeta.

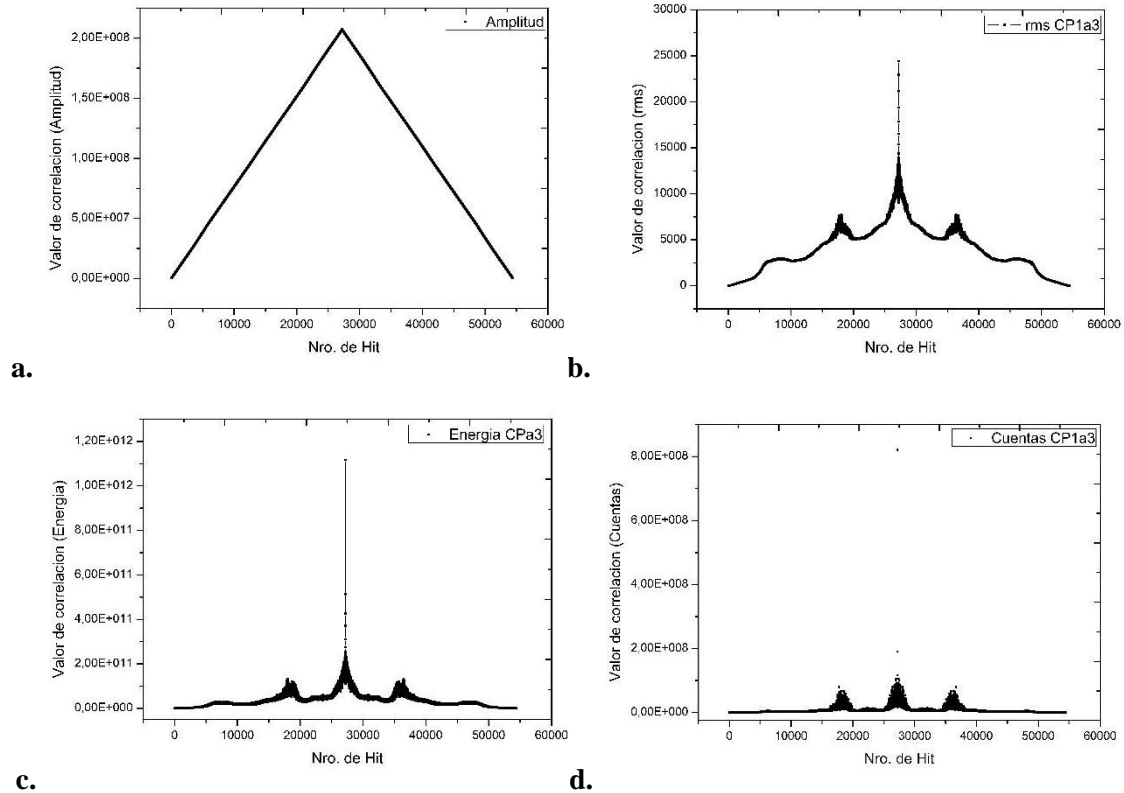


Fig.4.49. Auto correlación para ensayo **CP1a3** de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Energía de EA, y **d.** Cuentas de EA.

4.4.3. Resultados de correlación cruzada para A1a1/A1a2, A1a1/A1a3, A1a2/A1a3.

Los resultados mostrados en las Figs. 4.50 a 4.52 representan la aplicación de la de la correlación para los parámetros de EA de diferentes perforaciones respecto la probeta A1. De esta manera se realiza la *correlación cruzada* de un mismo parámetro de EA adquirido durante el proceso de perforación, para diferentes ensayos de una misma probeta. La amplitud y el rms de estas señales nuevamente parecen no aportar gran cantidad de información produciéndose el mismo efecto que en los resultados de autocorrelación. Así mismo sobre el parámetro de cuentas de EA se pueden identificar puntos de interés para análisis, las Fig. 4.50 c y d, 4.51 c y d, 4.52 c y d, y 4.53 c y d muestran importantes variaciones de correlación a lo largo de toda la señal.

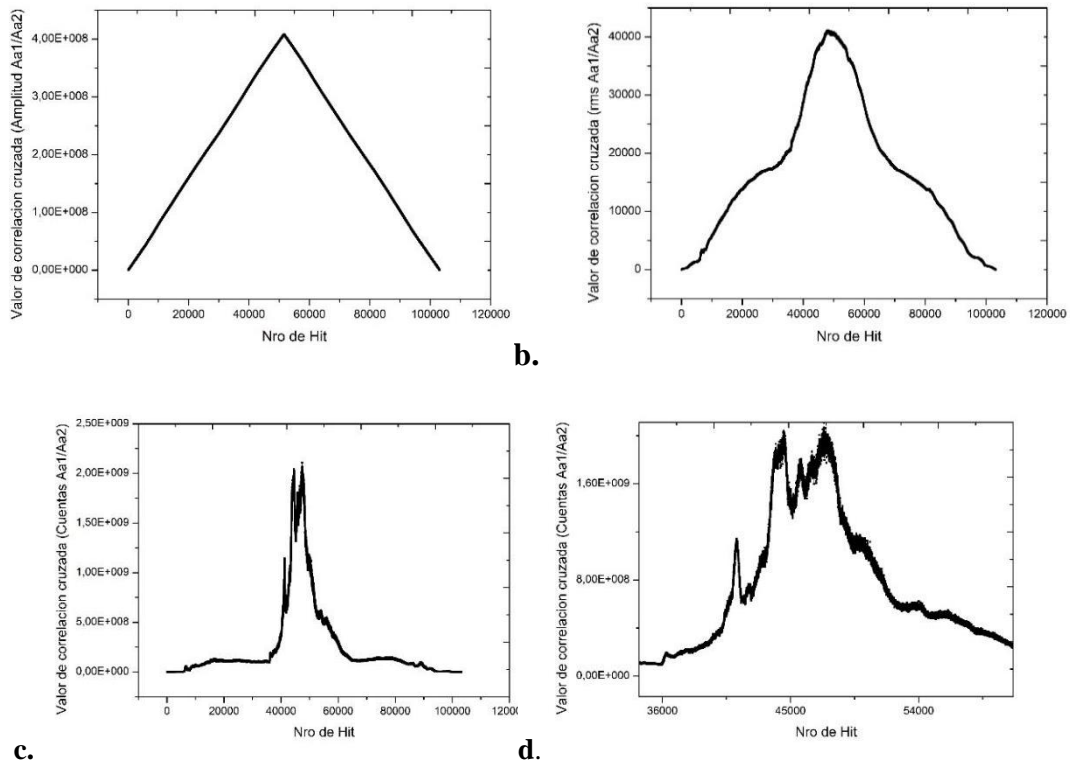


Fig. 4.50. Correlación cruzada para ensayos A1a1/A1a2 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA. **d.** Ampliación de zona de interés para cuentas de EA.

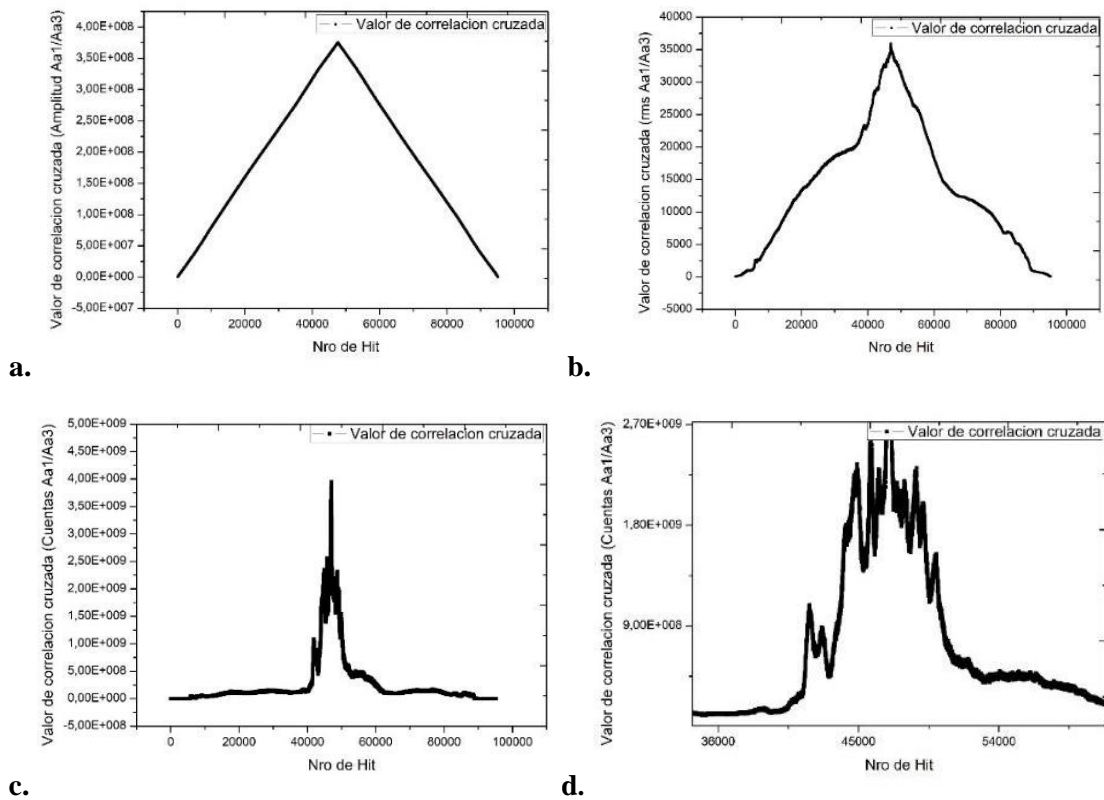
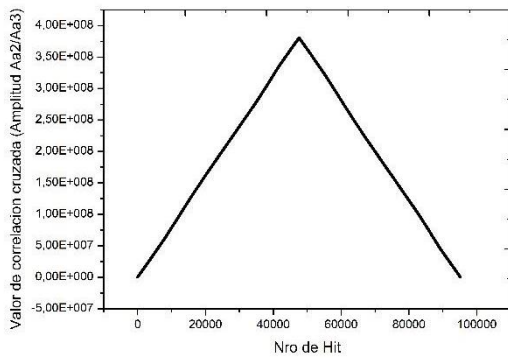
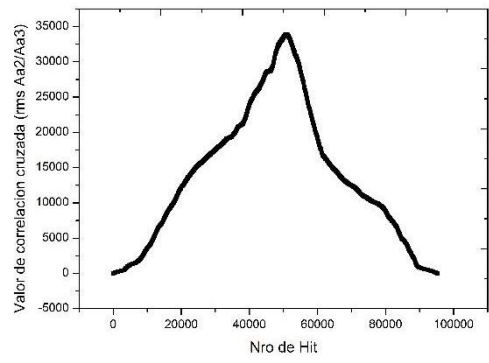


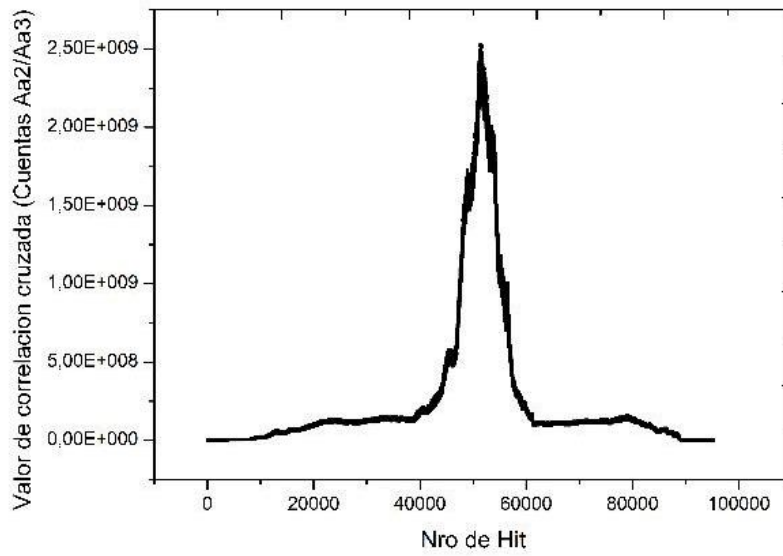
Fig. 4.51. Correlación cruzada para ensayo A1a1/A1a3 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA. **d.** Ampliación de zona de interés para cuentas de EA.



a.

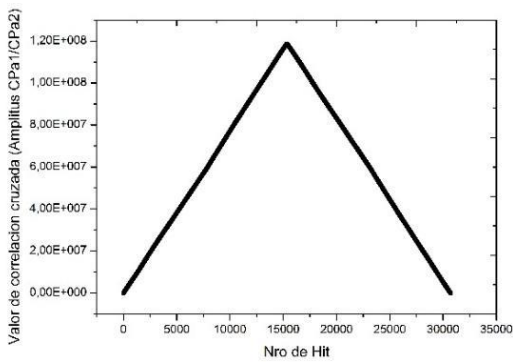


b.

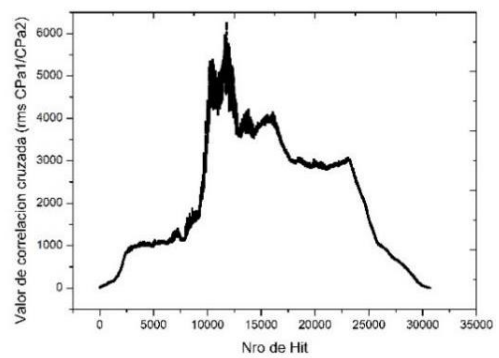


c.

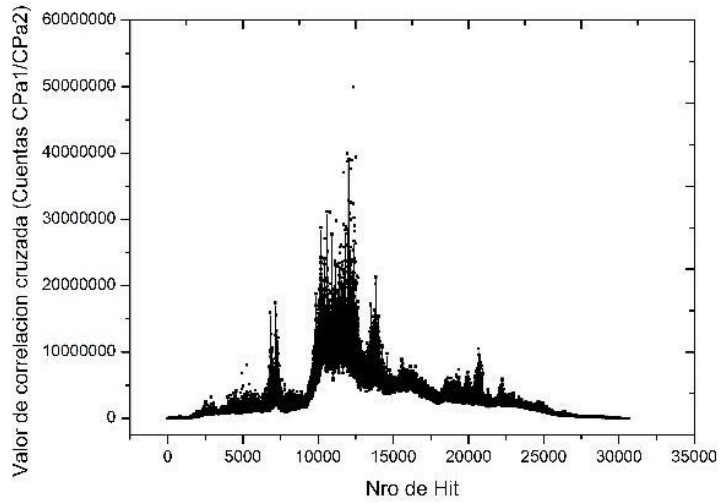
Fig. 4.52. Correlación cruzada para ensayo A1a2/A1a3 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA.



a.

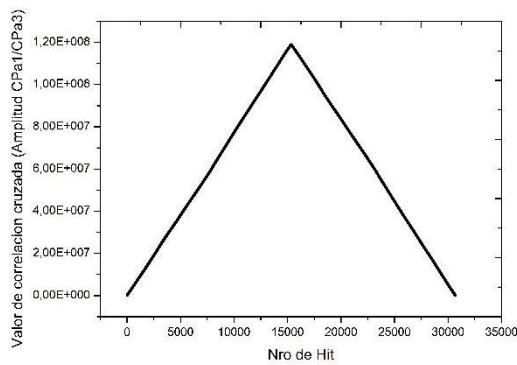


b.

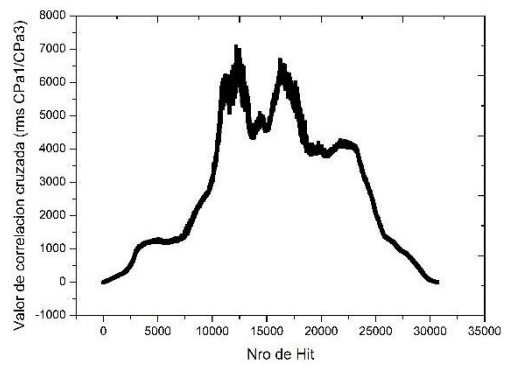


c.

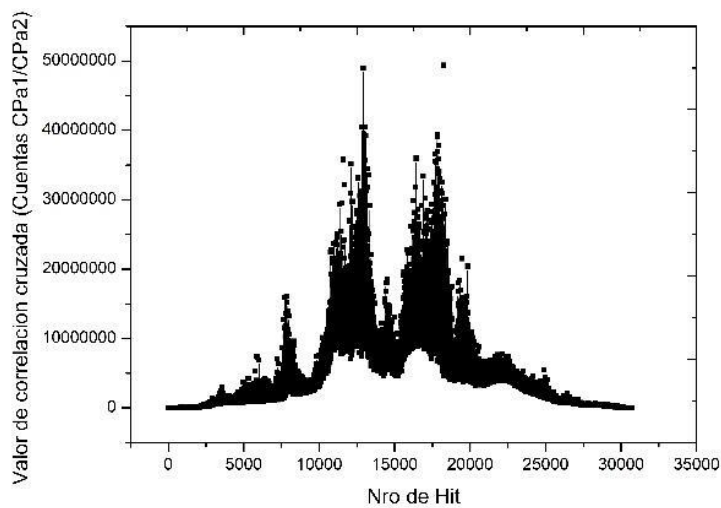
Fig. 4.53. Correlación cruzada para ensayo CP1a1/CP1a2 de parámetros. **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA.



a.



b.



c.

Fig. 4.54. Correlación cruzada para ensayo CP1a1/CP1a3 de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA.

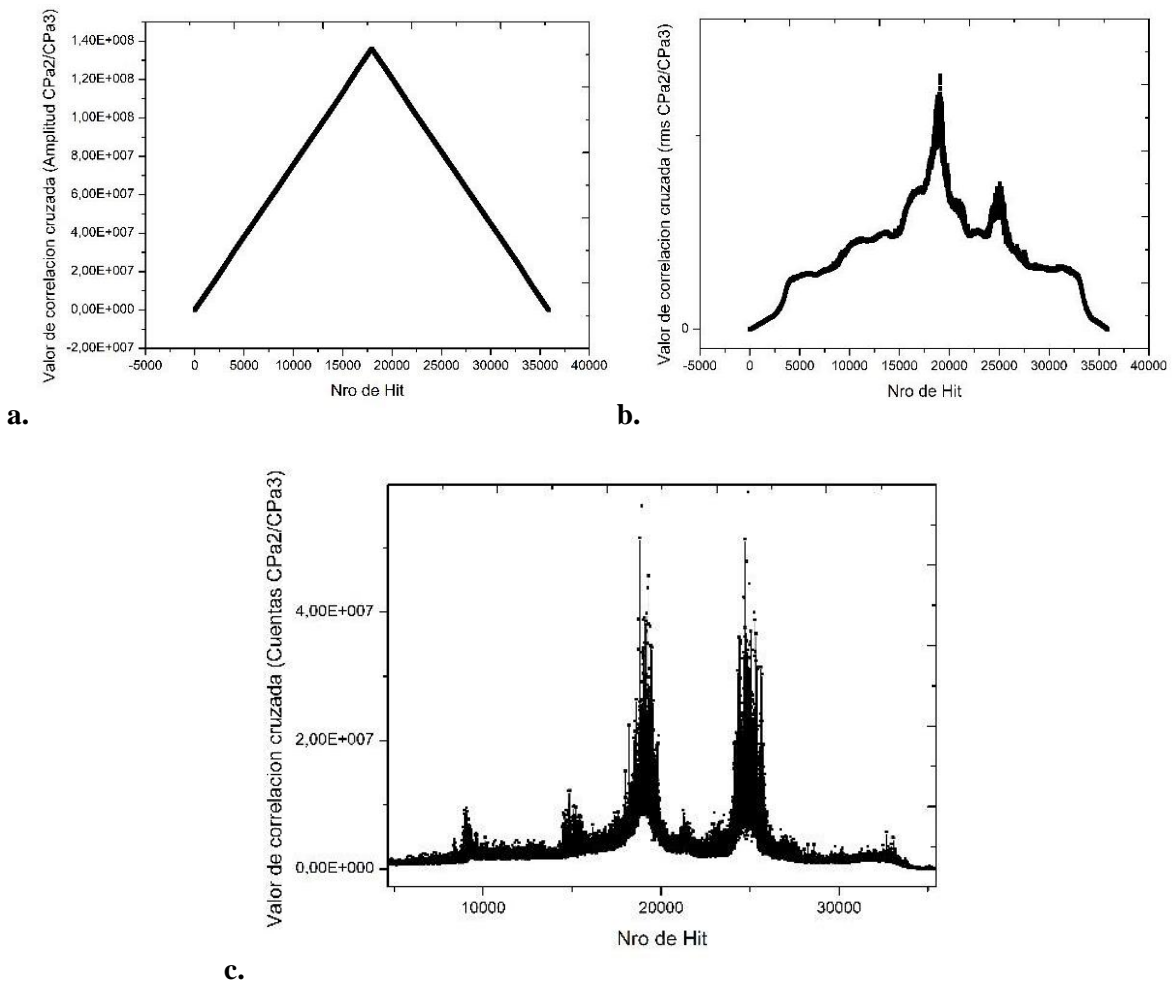


Fig. 4.55. Correlación cruzada para ensayo **CP1a2/CP1a3** de parámetros: **a.** Amplitud de EA, **b.** rms de EA, **c.** Cuentas de EA.

Finalmente, los resultados de la autocorrelación y de la correlación cruzada de los parámetros de EA muestran comportamiento variado, donde no todos los parámetros de EA tienen la misma dinámica ni brindan el mismo nivel de detalle de la información, siendo la *amplitud* y *el rms* los parámetros con menor nivel de detalle (variación en función de la profundidad) del fenómeno de perforación y las *cuentas* y *la energía de la EA* los que evidenciaron mayores puntos de variabilidad en función de la profundidad. El parámetro *cuentas de EA* fue seleccionado como el descriptor más favorable para el análisis detallado de la correlación. Los puntos de interés seleccionados en base al parámetro *cuentas de EA* serán posicionados temporalmente para analizar dónde se encuentra la herramienta y cuál es la condición de corte en ese instante.

4.4.4. Resultado del posicionamiento gráfico – temporal en función de la autocorrelación para ensayos A1a1, A1a2, A1a3, CP1a1, CP1a2, CP1a3.

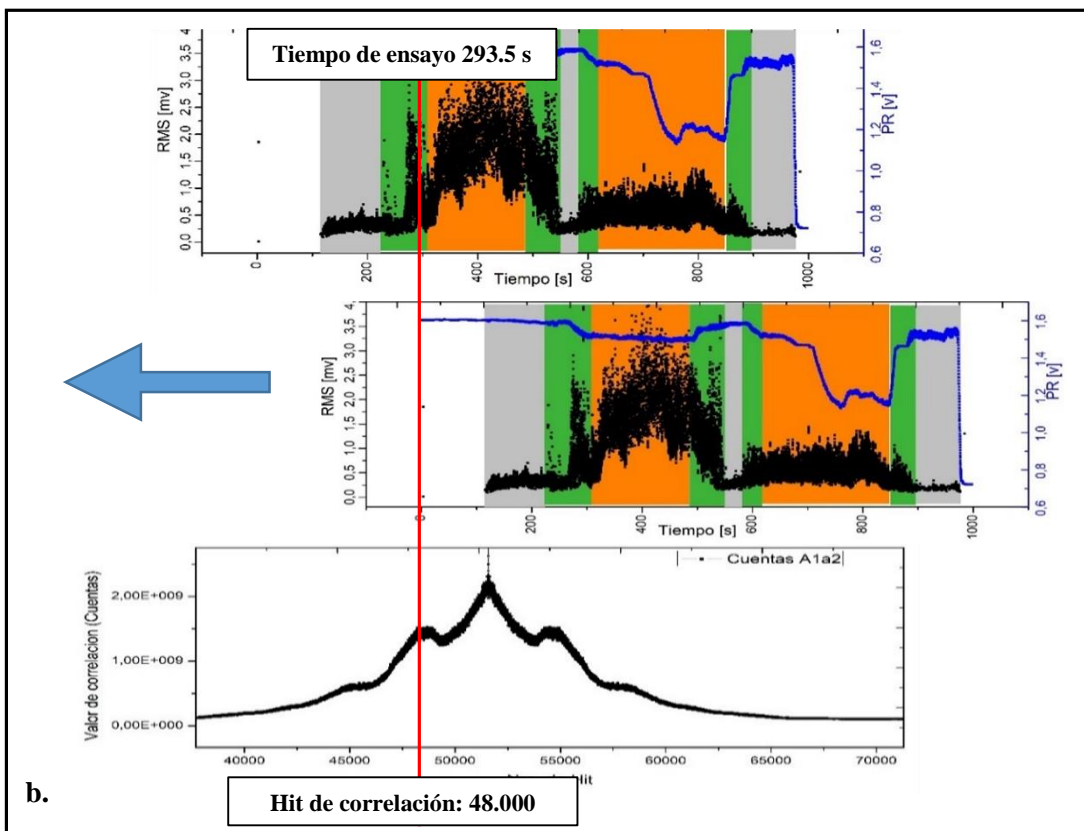
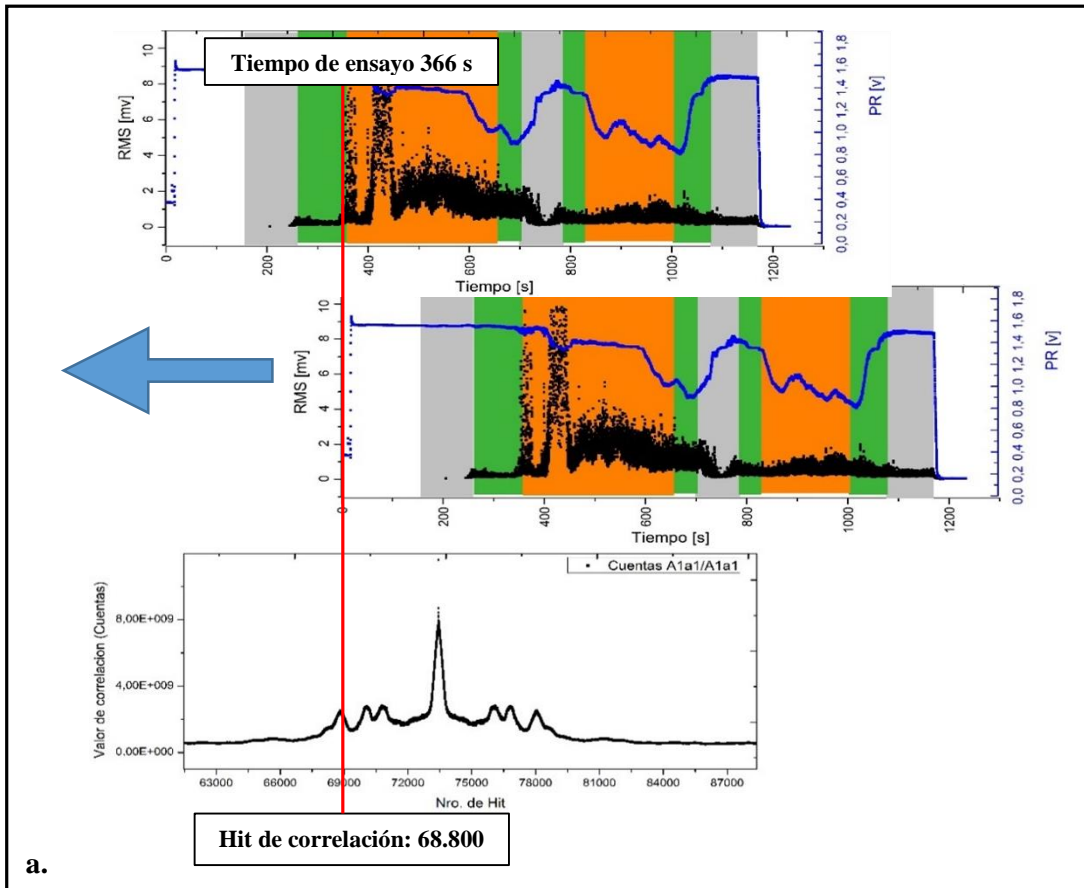
La tabla 4.10 muestra la selección de algunos *puntos singulares* dentro de los gráficos de *autocorrelación* para el parámetro cuentas de EA (Hits de EA) y su correspondiente valor temporal dentro del ensayo de perforación. Luego en base a estos cálculos se posiciono las figuras del rms del capítulo 4.3, de manera de poder evaluar cuáles son las condiciones de corte que se están convolucionando en ese instante de tiempo. La identificación gráfica en colores ayudó a identificar rápidamente los estratos geológicos que va atravesando el cortador en ese valor de correlación y en ese tiempo asociado.

Tabla 4.10. Detalle de selección de puntos singulares de autocorrelación (Hits de EA) y su equivalente en tiempo para los ensayos de perforación.

Ensayo	Número de puntos de la señal [Hits]	Punto de máxima correlación [Hits]	Punto <i>Singular</i> seleccionado para analisis [Hits]	Posicionamiento respecto inicio ensayo [Hits]. (Máxima correlación - Punto seleccionado)	Tiempo de la EA para el punto de interes, respecto del inicio del ensayo. [s]
A1a1	146881	73440	68800	4640	366
A1a2	103169	51585	48000	3585	293.5
A1a3	95223	47612	43635	3977	169.9
CP1a1	30695	15348	9980	5368	302.01
CP1a2	35867	17934	7666	10268	339.17
CP1a3	54543	27277	16420	10851	267.1

Las Figs. 4.56a, b y c muestran la sincronización temporal para los ensayos de la probeta A1 (representado mediante el parámetro rms de la EA), en función de los puntos singulares resultantes de autocorrelación los Hits de EA respecto del parámetro cuentas. Las perforaciones analizadas son A1a1, A1a2 y A1a3 pertenecientes a la probeta con dos capas de roca Arenisca cementada. Esto se representa mediante el deslizamiento de derecha a izquierda de una de las señales correlacionadas respecto de la otra. En estos casos las señales que se convolucion son la misma. Muchas de las variaciones observadas en la autocorrelación, se muestran como un aumento parcial del valor de la correlación en función de la perforación de diferentes sustratos geológicos, lo que sucede con el aumento de la profundidad.

En las Fig. 4.56 a y b y más difusamente en la Fig. 4.56 c se observa un aumento parcial de la autocorrelación durante el entrecruzamiento de la primera capa de roca Arenisca respecto de la segunda capa de roca del mismo material, lo que indicaría un reconociendo las condiciones de corte similares entre sí



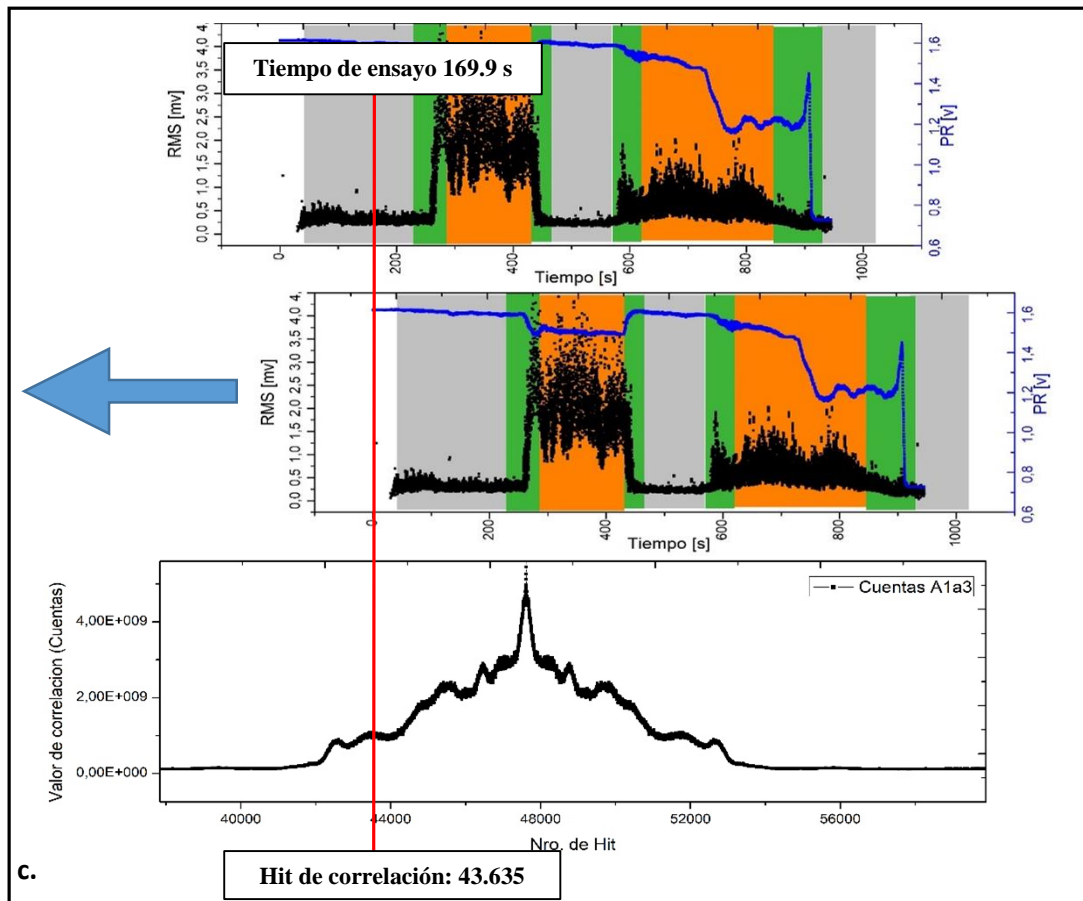
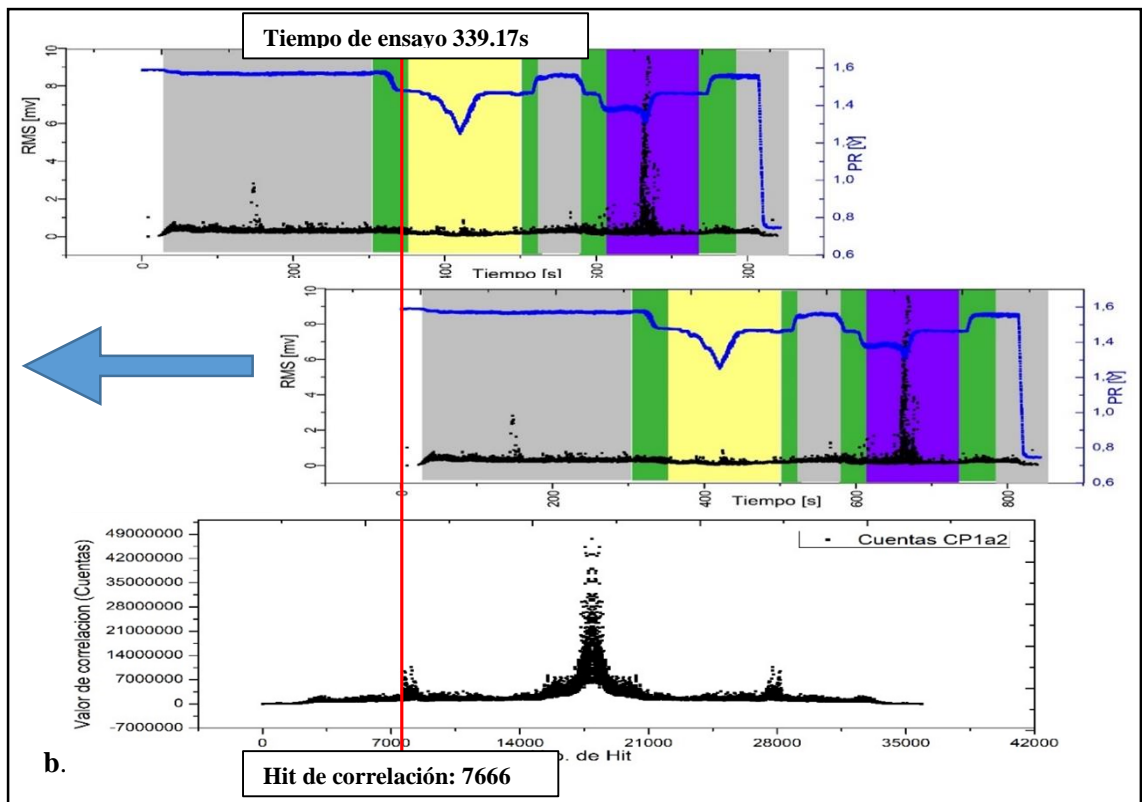
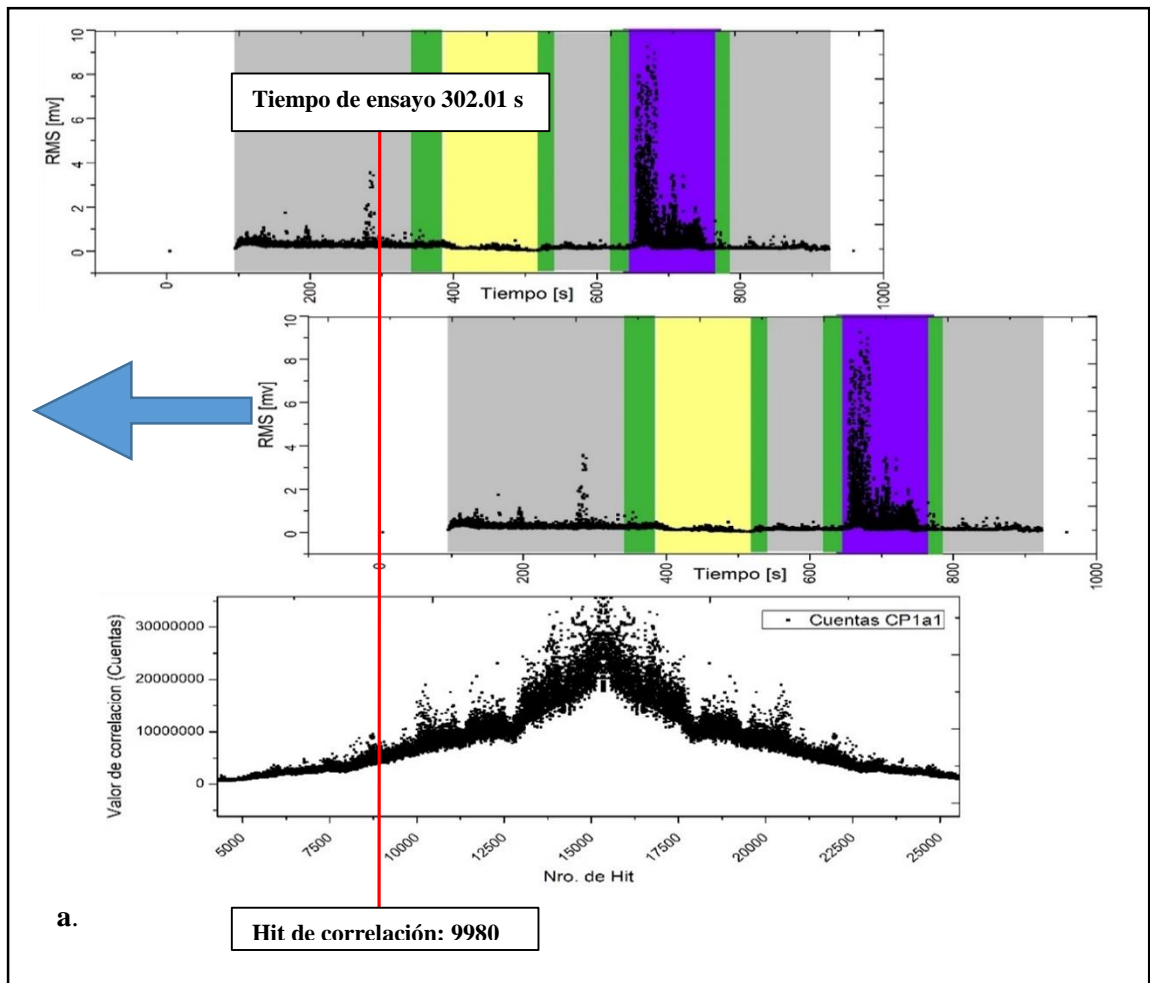


Fig. 4.56. Posicionamiento gráfico-temporal del parámetro rms de EA en base a los tiempos de auto correlación del parámetro cuentas de EAE seleccionados en la tabla 4.10.

a. A1a1/ A1a1, **b.** A1a2/ A1a2 y **c.** A1a3/ A1a3.

En la Fig. 4.57a, b y c se representa la alineación temporal de los ensayos para las perforaciones CP1a1, CP1a2 y CP1a3 en función de los puntos singulares calculados a partir de la autocorrelación de los Hits de EA que figuran en la tabla 4.10. Esta probeta está compuesta por una primera capa de roca Caliza y una segunda capa de roca Pizarra. Si se analiza el rms de la señal al momento de perforar la roca caliza, se observa una disminución de la emisión que hace pasar prácticamente desapercibido el proceso de corte en ese material. La autocorrelación de los Hits muestra una variación al comenzar a superponer la información de la perforación de los estratos de rocas Caliza y Pizarra respecto del cemento lo que permite identificar el entrecruzamiento de la perforación de estratos más duros que el cemento de consolidación de la probeta.



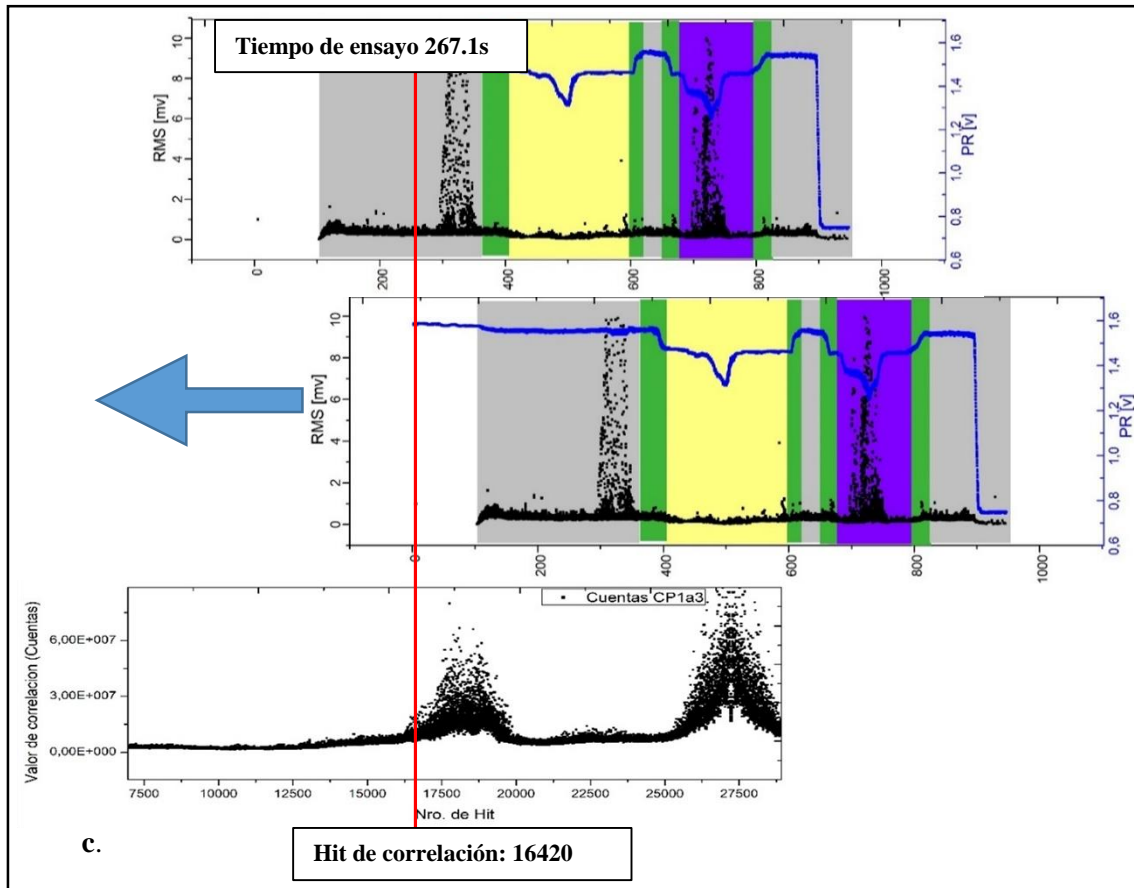


Fig. 4.57. Posicionamiento gráfico-temporal del parámetro rms de EA en base a los tiempos de la tabla 4.10 para la autocorrelación del parámetro cuentas de EA. **a.** CP1a1/ CP1a1. **b.** CP1a2/ CP1a2. **c.** CP1a3/ CP1a3.

La correlación de los Hits del parámetro cuentas de EA marca alteraciones correspondientes a los cambios en las condiciones de corte que el parámetro de rms de la EA apenas llega a discriminar respecto del taladrado del cemento de consolidación de la probeta.

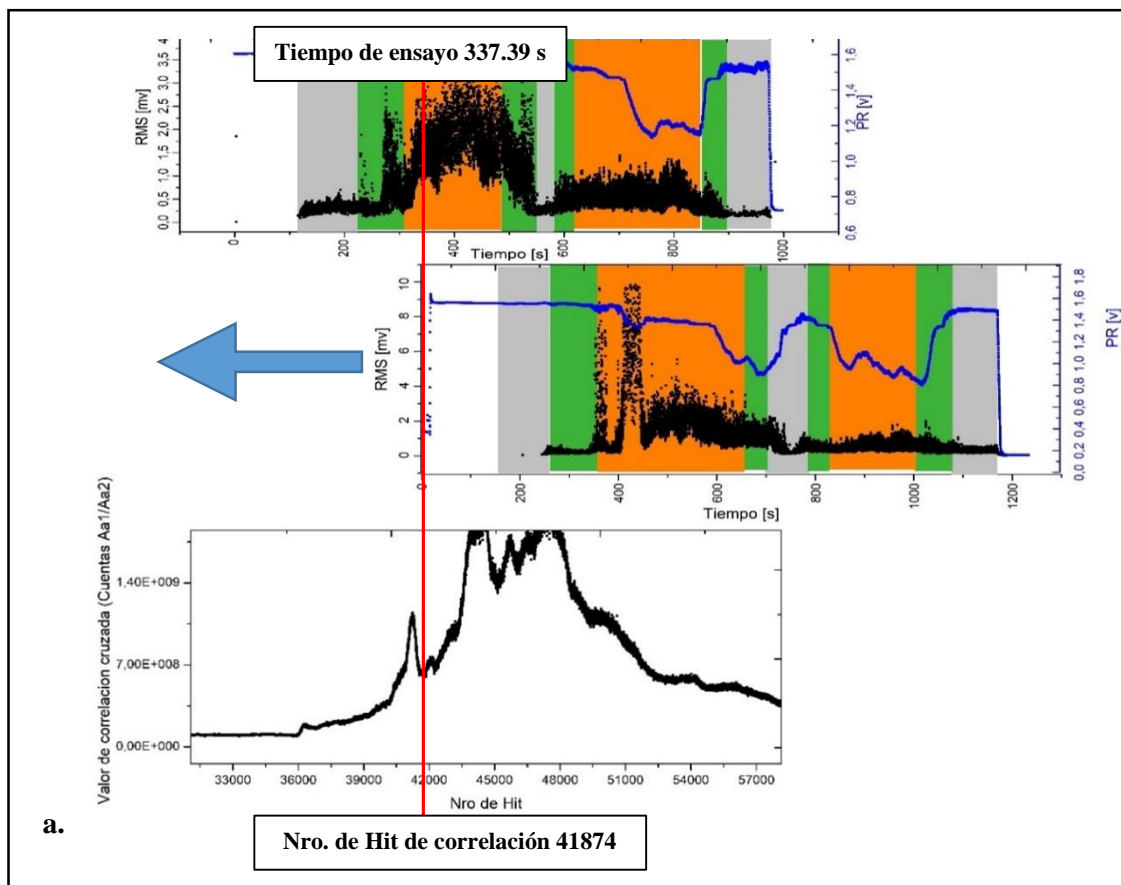
4.4.5. Resultado del posicionamiento gráfico – temporal en función de *correlación cruzada* para las series de ensayos A1a1/ A1a2, A1a1/ A1a3, A1a2/ A1a3 y CP1a1/ CP1a2, CP1a1/ CP1a3, CP1a2/ CP1a3.

A continuación, se exponen los resultados del posicionamiento temporal en base a la *correlación cruzada del parámetro cuentas* pertenecientes a los Hits de EA durante el monitoreo de los ensayos en las probetas A1 y CP1. Las correlaciones cruzadas se realizaron entre diferentes taladrados de una misma probeta. En la tabla 4.11 se detallan los puntos de correlación (Nro. de Hits de EA) que servirán de base para posicionar temporalmente las señales de EA y los estratos geológicos identificados.

Tabla 4.11. Detalle de selección de puntos singulares de correlación cruzada (Hits de EA) y su equivalente en tiempo para los ensayos de perforación.

Ensayo	Número de puntos de la señal [Hits]	Punto de Máxima correlación [Hits]	Punto <i>Singular</i> seleccionado para análisis [Hits]	Posicionamiento respecto inicio ensayo [Hits]. (Máxima correlación - Punto seleccionado)	Tiempo de la EA para el punto de interés, respecto del inicio del ensayo. [s]
A1a1/A1a2	103169	51585	41874	9711	337.39
A1a1/A1a2	95223	47612	45703	1909	295.2
A1a2/A1a3	95223	47612	45729	1883	196.5
CP1a1/CP1a2	30695	15348	10808	4540	248.7
CP1a1/CP1a3	30695	15348	10753	4595	252.4
CP1a2/CP1a3	35867	17934	14516	3418	83.5

Los resultados de la correlación cruzada los ensayos de las probetas de roca arenisca (A1a1, A1a2 y A1a3) y Caliza - Pizarra (CP1a1, CP1a2 y CP1a3) de las Fig. 4.58 y 4.59 muestran nuevamente alteraciones sobre el gráfico de correlación cruzada cuando se entrecruzan periodos de perforación semejantes. Esto reafirma los resultados obtenidos durante la autocorrelación, pero al considerar que los ensayos convolucionados son diferentes y totalmente independientes entre sí (diferentes perforaciones), la herramienta de correlación brinda mayor robustez mayor para el análisis. En el caso de la probeta A1, las Figs. 4.58 a y b muestran estas oscilaciones más claramente que el ensayo 4.58 c.



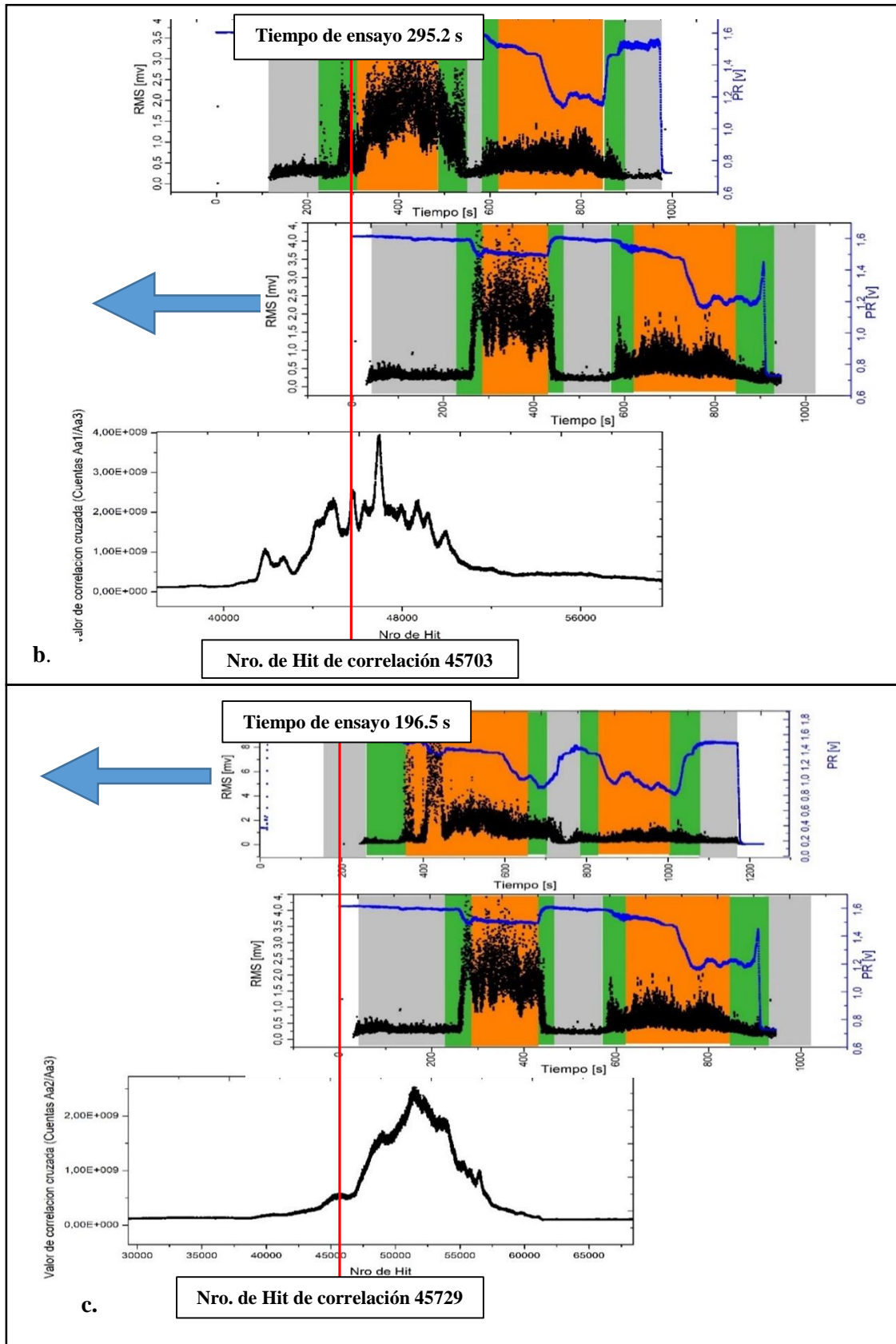
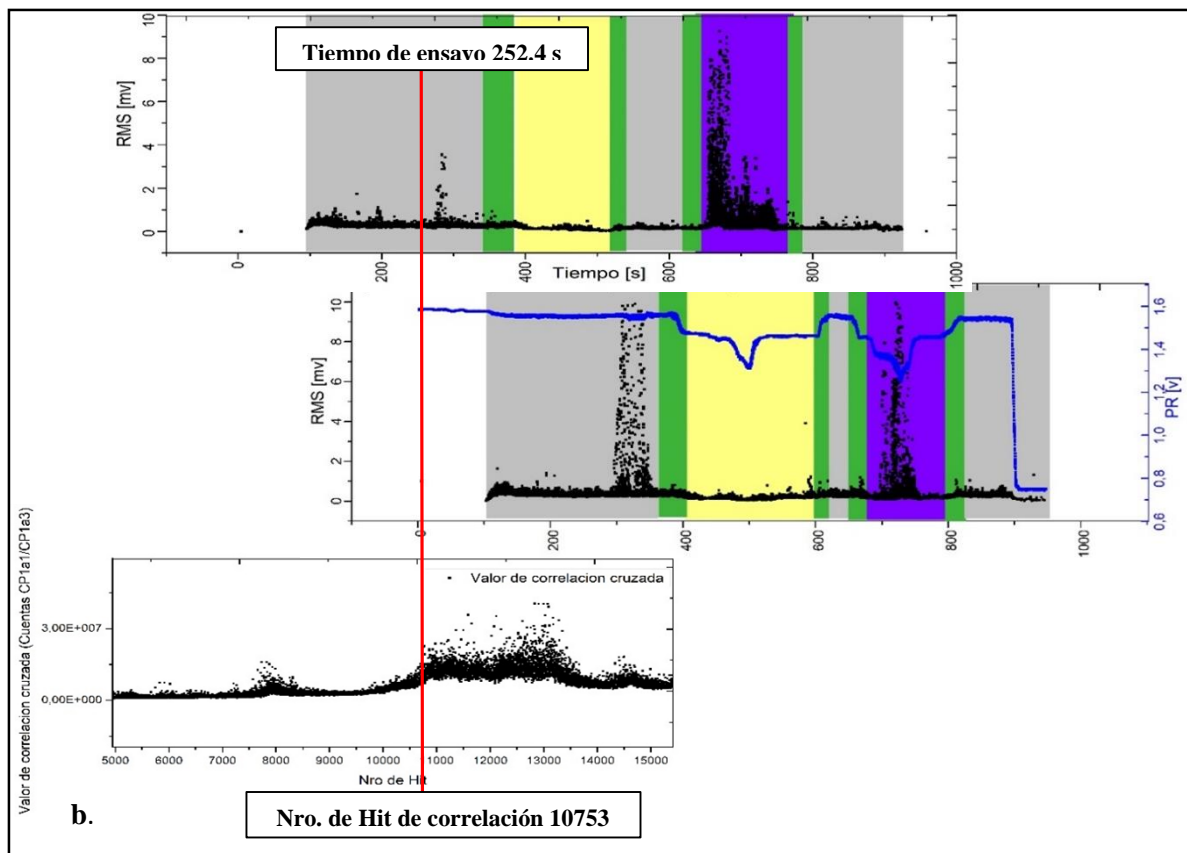
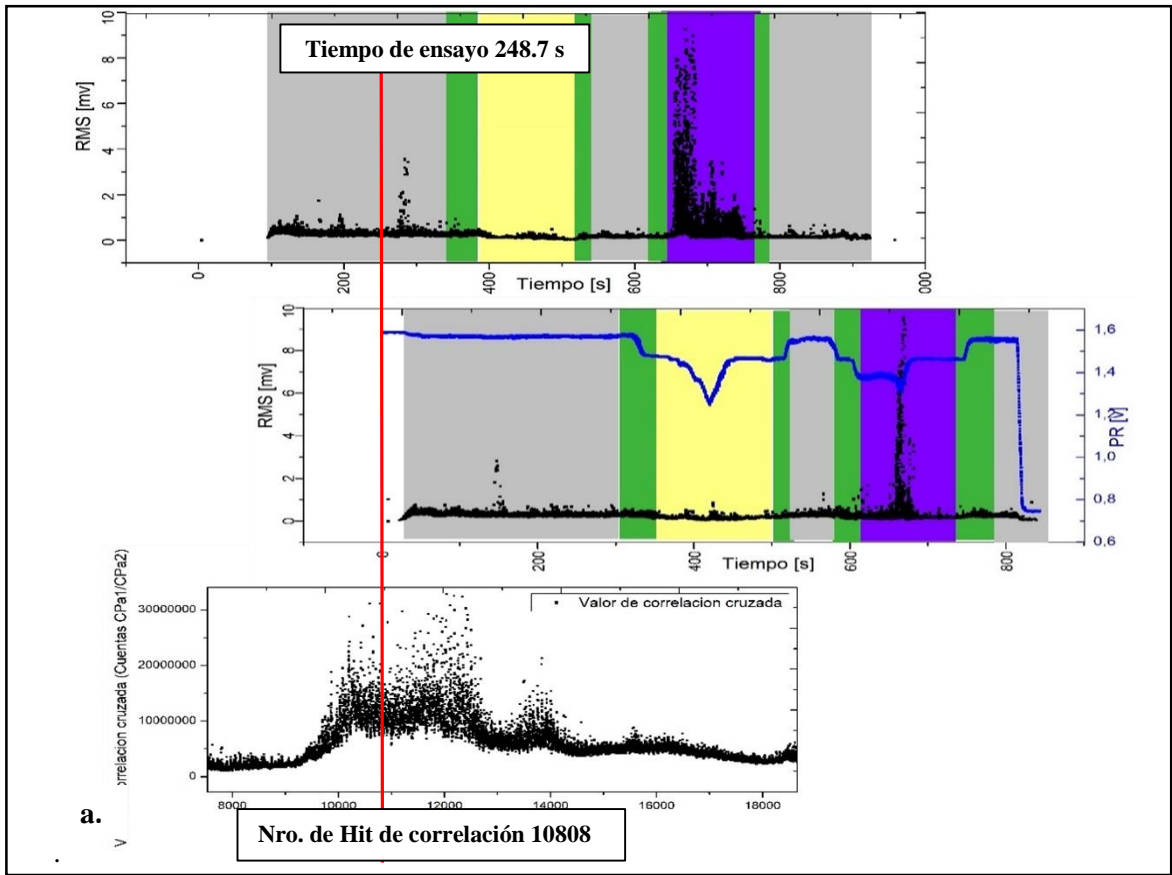


Fig. 4.58. Ampliación gráfica de la correlación cruzada del parámetro cuentas de EA y posicionamiento gráfico-temporal del parámetro rms de EA en base a los tiempos seleccionados en la tabla 4.11. **a.** A1a1/ A1a2, **b.** A1a1/A1a3, **c.** A1a2/A1a3.



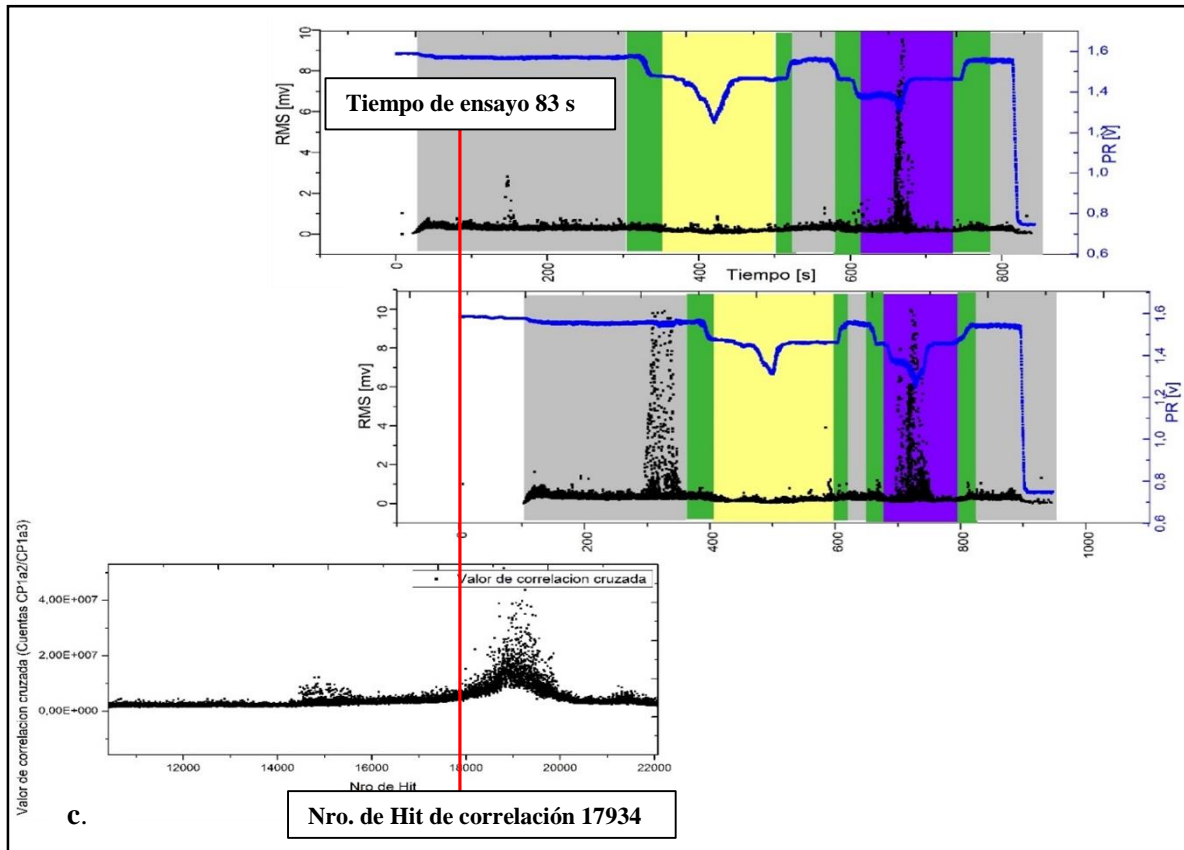


Fig. 4.59. Posicionamiento gráfico-temporal del parámetro rms de EA en base a los tiempos de la tabla 4.11 para la correlación cruzada del parámetro cuentas de EA. **a.** CP1a1/ CP1a2, **b.** CP1a1/CP1a3, **c.** CP1a2/CP1a3.

En el caso de la probeta compuesta por roca Caliza y Pizarra cementada, de las Figs. 4.59a, b, y c, la correlación cruzada hace evidente la existencia de procesos de perforación de estratos que no están claramente identificados por el parámetro rms de la EA. En estos casos la EA correspondiente a la perforación de roca Caliza se muestra como un silenciamiento del rms, casi semejante al ruido de base de la perforación, adquirido durante el ensayo. En base al registro del parámetro del rms de la EA no se podría diferenciar la condición de corte de este estrato respecto de la perforación del cemento de consolidación. La aplicación de la correlación sobre la serie de Hits de EA (respecto del parámetro cuentas de EA) evidencia marcados picos cuando coinciden escenarios de perforación semejantes entre sí. Esto se observa claramente en la correlación cruzada de las perforaciones CP1a1/CP1a3 y CP1a2/CP1a3 donde para el primer par analizado uno de los picos máximos se produce cuando se correlacionan el corte de la capa de roca Caliza respecto de la roca Pizarra y en el

segundo caso uno de los picos de máxima correlación se observa cuando se alinean los procesos de corte de las mismas capas de material para estas diferentes perforaciones.

En función de los resultados expuestos en las secciones de autocorrelación 4.4.1 y 4.4.2, los resultados de la correlación cruzada 4.4.3 y el posicionamiento temporal realizado a partir de la selección de puntos singulares representados en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de la sección 4.4.4 y 4.4.5 se puede concluir que los parámetros Amplitud y RMS de la EA no son los óptimos para aplicar este tipo de procedimiento ya que no muestran importantes alternancia en sus valores de correlación. El parámetro cuentas de EA y posteriormente el parámetro Energía MARSE de EA se muestran como los parámetros que brindan mayor nivel de alternancia de sus valores en función de la profundidad de la perforación. El aumento de la profundidad del agujereado implica un cambio en la condición de corte por la modificación del material perforado. La transformación de las propiedades geomecánicas entre los diferentes materiales que componen la probeta puede ser atribuido a la forma de gestación de la roca la cual define muchas características de la misma como el tamaño y tipo material del grano, el tipo de cemento de unión de los granos, la densidad, la porosidad, la compactación y la forma de laminación de las capas internas entre otros factores. Muchas de estas características determinan las propiedades mecánicas del material como el módulo de Bulk, el módulo elástico, el módulo de Young, el módulo de Poisson, la dureza, la energía específica corte, la taladrabilidad, etc. Cuando se produce el cambio de material en función de la profundidad de perforación estas propiedades mecánicas se modifican y como consecuencia se modifica la condición de corte. Esto puede traducirse en un aumento o disminución de la abrasión y la fricción, molienda del material, forma de corte, tamaño y forma de la fractura, tasa de penetración, y otras tantas consecuencias.

Finalmente, la emisión de ondas elásticas se ve afectada esta modificación del material ya que los Hits de EA son dependientes de la condición de perforación, esto altera la forma de onda de la EA, y los valores de las variables parametrizada, haciendo que los Hits cambien su amplitud, RMS, número de cuentas, energía, duración, etc. Los Hits de EA recolectados durante la perforación, forman una serie de datos que no están igualmente espaciados en base temporal. La frecuencia de ocurrencia de estos hits depende, entre otros factores, de la dinámica del proceso de corte en cada instante de la perforación. Esto condiciona de alguna manera la aplicación de la herramienta de correlación, la cual se entiende que formalmente debe ser aplicada a sobre una serie de puntos equidistantes entre sí. Ahora bien, el cambio de emisividad de la fuente (en este caso el proceso de corte) es una variable adicional de

información en la medición de la EA, implícita en el muestreo del Hit. Es decir que la tasa de muestreo de la EA establecida en cada instante depende de la cantidad de señales superan el umbral determinado. Esto depende de la dinámica del fenómeno, siempre y cuando los parámetros del sistema de medición se encuentren fijos. El estudio de la serie de Hits que ocurren de manera sucesiva y no igualmente espaciada brinda una nueva variable de análisis a ser considerada. Este nivel adicional de información desaparecería en el caso de operar de la manera tradicional con una serie de puntos igualmente espaciados en el tiempo. Investigaciones adicionales deberán realizarse en este campo para evaluar la efectividad y la aplicación de esta herramienta en las condiciones enunciadas.

4.5. Resultados y discusión de la aplicación de las RNK en la clasificación de la información paramétrica de EA

4.5.1. Resultados de la selección de parámetros de EA para entrenamiento de la RNK mediante el análisis de la correlación de Pearson

La selección de cuáles parámetros de EA son los más apropiados para alimentar una RNK con el objetivo de clasificar la información no es trivial. Esta selección puede estar basada en múltiples criterios asociados a calidad, cantidad y tipo de información. En la presente sección se muestra los resultados de los análisis de correlación de Pearson, donde se evalúa el grado de dependencia lineal entre los parámetros de EA durante los ensayos de perforación. En base a ello se busca identificar los parámetros más correlacionados entre sí y seleccionar solo uno de ellos como representante de ambos. Esta metodología proporciona un beneficio doble, el cual es evitar ingresar información redundante a la RNK que prolongaría innecesariamente el tiempo de cálculo y libera el espacio para ingresar con otra variable dentro de la red que eventualmente pueda proporcionar nueva información. Estos análisis se realizaron sobre la información paramétrica de EA obtenida para los ensayos de la probeta de roca Arenisca A1a1, A1a2, A1a3 y de la probeta de roca Caliza y Pizarra CP1a1, CP1a2, CPa3. Los resultados expuestos en las tablas 4.12 y 4.13 muestran los valores máximos de correlación de Pearson alcanzados por el par de variables evaluado, siendo 0 una nula correlación lineal y 1 o -1 una correlación lineal total positiva o inversa respectivamente. La compilación de estos resultados da una matriz diagonal de 15 filas x 15 columnas donde se resaltan en color verde los pares de correlación que tienen coeficientes mayores a $|0.8|$.

Cada Hit de EA compuesto por el cálculo de varios parámetros, puede ser considerado como un vector multidimensional de 15 componentes. Estos 15 componentes son parámetros descriptores del Hit, los cuales son calculados en base a la digitalización de la onda elástica. Luego de aplicar los análisis de correlación de Pearson se seleccionan cinco parámetros que forman un Vector Dato (VD) de 5 componentes para cada Hit de EA. Para esto se buscan los parámetros con menor correlación entre sí y se selecciona solo uno de ellos en representación. Los parámetros que mostraron menor correlación de Pearson son el rise time, la amplitud, el RMS, y la frecuencia promedio (A FRQ). Los parámetros que más frecuentemente muestran una alta correlación son la duración, el número de cuentas y la energía MARSE.

Los siguientes parámetros fueron descartados de la selección, debido a diferentes razones, a saber:

Centroide de frecuencia (C FRQ.) y *frecuencia pico (P FRQ.)* por ser calculados en base a la forma de onda digitalizada las cuales eventualmente pueden o no coincidir con los hits de EA, ya que existe la posibilidad que en una forma de onda digitalizada existan varios Hits de EA.

ASL, por ser idéntico al rms expresado en dB.

PCNTS por no estar relacionado con el ensayo.

Frecuencia de reverberación (R FRQ) y *frecuencia de iniciación (I FRQ)* por ser parámetros calculados en base a relaciones matemáticas entre el número de cuentas y rise time y que además suelen ser aplicadas a señales tipo explosión.

En base a lo anterior se seleccionaron los parámetros que conforman el vector multidimensional de cinco componentes [*rise time – amplitud – cuentas – RMS – frecuencia promedio*]. Los tramos de información que contienen los Hits de EA seleccionados para este procedimiento se corresponden a los intervalos de perforación efectiva, cuyos tiempos se encuentran definidos en la sección de resultados 4.2 en tablas 4.5 y 4.9. Estos intervalos temporales de perforación representan condiciones claramente definidas del proceso que formarán las clases que la RNK deberá identificar durante la instancia de entrenamiento y predicción.

Tabla 4.12. Matriz de correlación entre parámetros de EA para los ensayos de probeta A1, agujeros a1, a2, a3.

A1a1	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.2066	0.3497	0.2507	0.5036	-0.1748	0.2213	0.2706	0.8557	0.0453	-0.2965	0.1455	0.0794	-0.0361	-0.0610
COUN	0.2066	1.0000	0.8016	0.9723	0.5742	-0.0464	0.6323	0.4292	0.2918	0.0547	-0.0818	0.9203	0.7363	-0.0028	-0.0190
ENER	0.3497	0.8016	1.0000	0.8664	0.7767	-0.0873	0.5950	0.5190	0.4384	0.0565	-0.1380	0.6475	0.4376	-0.0350	-0.0554
DURATION	0.2507	0.9723	0.8664	1.0000	0.6278	-0.0690	0.6060	0.4549	0.3159	0.0465	-0.1065	0.8423	0.6226	-0.0129	-0.0318
AMP	0.5036	0.5742	0.7767	0.6278	1.0000	-0.2272	0.5351	0.5339	0.6038	0.0678	-0.3286	0.4767	0.3349	-0.0637	-0.0879
A-FRQ	-0.1748	-0.0464	-0.0873	-0.0690	-0.2272	1.0000	-0.0677	-0.0960	-0.1257	-0.0410	0.6368	-0.0314	-0.0142	0.0265	0.0281
RMS	0.2213	0.6323	0.5950	0.6060	0.5351	-0.0677	1.0000	0.8699	0.2897	0.0417	-0.1015	0.6663	0.6109	-0.1024	-0.1296
ASL	0.2706	0.4292	0.5190	0.4549	0.5339	-0.0960	0.8699	1.0000	0.3177	0.0261	-0.1342	0.3807	0.2910	-0.1775	-0.2196
PCNTS	0.8557	0.2918	0.4384	0.3159	0.6038	-0.1257	0.2897	0.3177	1.0000	0.0479	-0.2209	0.2258	0.1495	-0.0362	-0.0587
R-FRQ	0.0453	0.0547	0.0565	0.0465	0.0678	-0.0410	0.0417	0.0261	0.0479	1.0000	-0.1113	0.0480	0.0385	-0.0021	0.0027
I-FRQ	-0.2965	-0.0818	-0.1380	-0.1065	-0.3286	0.6368	-0.1015	-0.1342	-0.2209	-0.1113	1.0000	-0.0582	-0.0319	0.0365	0.0372
SIG-STRNGTH	0.1455	0.9203	0.6475	0.8423	0.4767	-0.0314	0.6663	0.3807	0.2258	0.0480	-0.0582	1.0000	0.9384	0.0043	-0.0074
ABS-ENERGY	0.0794	0.7363	0.4376	0.6226	0.3349	-0.0142	0.6109	0.2910	0.1495	0.0385	-0.0319	0.9384	1.0000	0.0090	0.0015
C-FRQ	-0.0361	-0.0028	-0.0350	-0.0129	-0.0637	0.0265	-0.1024	-0.1775	-0.0362	-0.0021	0.0365	0.0043	0.0090	1.0000	0.9812
P-FRQ	-0.0610	-0.0190	-0.0554	-0.0318	-0.0879	0.0281	-0.1296	-0.2196	-0.0587	0.0027	0.0372	-0.0074	0.0015	0.9812	1.0000

A1a2	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.2867	0.3951	0.3162	0.5311	-0.2120	0.3001	0.3026	0.8320	0.1005	-0.3579	0.2773	0.2285	0.0083	-0.0174
COUN	0.2867	1.0000	0.8526	0.9842	0.6256	-0.0741	0.5393	0.4393	0.3447	0.0937	-0.1174	0.9878	0.9147	0.0290	0.0147
ENER	0.3951	0.8526	1.0000	0.8835	0.7881	-0.1170	0.6204	0.5399	0.4608	0.1108	-0.1746	0.8349	0.7332	0.0328	0.0146
DURATION	0.3162	0.9842	0.8835	1.0000	0.6568	-0.0993	0.5527	0.4636	0.3499	0.0871	-0.1425	0.9694	0.8722	0.0302	0.0132
AMP	0.5311	0.6256	0.7881	0.6568	1.0000	-0.2786	0.5654	0.5303	0.6129	0.1503	-0.3872	0.6190	0.5496	0.0020	-0.0198
A-FRQ	-0.2120	-0.0741	-0.1170	-0.0993	-0.2786	1.0000	-0.1046	-0.1202	-0.1403	-0.0931	0.6394	-0.0741	-0.0532	0.0170	0.0225
RMS	0.3001	0.5393	0.6204	0.5527	0.5654	-0.1046	1.0000	0.9408	0.3413	0.0819	-0.1513	0.5462	0.5100	0.0113	-0.0153
ASL	0.3026	0.4393	0.5399	0.4636	0.5303	-0.1202	0.9408	1.0000	0.3300	0.0733	-0.1693	0.4360	0.3850	-0.0325	-0.0688
PCNTS	0.8320	0.3447	0.4608	0.3499	0.6129	-0.1403	0.3413	0.3300	1.0000	0.1007	-0.2438	0.3315	0.2892	0.0120	-0.0088
R-FRQ	0.1005	0.0937	0.1108	0.0871	0.1503	-0.0931	0.0819	0.0733	0.1007	1.0000	-0.1586	0.0889	0.0806	-0.0033	-0.0024
I-FRQ	-0.3579	-0.1174	-0.1746	-0.1425	-0.3872	0.6394	-0.1513	-0.1693	-0.2438	-0.1586	1.0000	-0.1150	-0.0877	0.0263	0.0331
SIG-STRNGTH	0.2773	0.9878	0.8349	0.9694	0.6190	-0.0741	0.5462	0.4360	0.3315	0.0889	-0.1150	1.0000	0.9612	0.0263	0.0142
ABS-ENERGY	0.2285	0.9147	0.7332	0.8722	0.5496	-0.0532	0.5100	0.3850	0.2892	0.0806	-0.0877	0.9612	1.0000	0.0215	0.0135
C-FRQ	0.0083	0.0290	0.0328	0.0302	0.0020	0.0170	0.0113	-0.0325	0.0120	-0.0033	0.0263	0.0263	0.0215	1.0000	0.9823
P-FRQ	-0.0174	0.0147	0.0146	0.0132	-0.0198	0.0225	-0.0153	-0.0688	-0.0088	-0.0024	0.0331	0.0142	0.0135	0.9823	1.0000

A1a3	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.2550	0.3784	0.2916	0.5211	-0.2130	0.3046	0.3148	0.8245	0.1034	-0.3512	0.2450	0.1991	-0.0355	-0.0640
COUN	0.2550	1.0000	0.8523	0.9865	0.6425	-0.0656	0.6380	0.4843	0.3535	0.1127	-0.1101	0.9855	0.9131	-0.0353	-0.0507
ENER	0.3784	0.8523	1.0000	0.8902	0.8001	-0.1118	0.7080	0.5883	0.4799	0.1294	-0.1715	0.8255	0.7186	-0.0621	-0.0838
DURATION	0.2916	0.9865	0.8902	1.0000	0.6814	-0.0891	0.6492	0.5106	0.3697	0.1090	-0.1355	0.9666	0.8730	-0.0423	-0.0609
AMP	0.5211	0.6425	0.8001	0.6814	1.0000	-0.2797	0.6327	0.5768	0.6144	0.1664	-0.3886	0.6309	0.5563	-0.0714	-0.0964
A-FRQ	-0.2130	-0.0656	-0.1118	-0.0891	-0.2797	1.0000	-0.1091	-0.1324	-0.1375	-0.0995	0.6518	-0.0649	-0.0474	0.0280	0.0335
RMS	0.3046	0.6380	0.7080	0.6492	0.6327	-0.1091	1.0000	0.9228	0.3864	0.1085	-0.1629	0.6452	0.6079	-0.1374	-0.1671
ASL	0.3148	0.4843	0.5883	0.5106	0.5768	-0.1324	0.9228	1.0000	0.3653	0.0956	-0.1877	0.4777	0.4246	-0.1848	-0.2257
PCNTS	0.8245	0.3535	0.4799	0.3697	0.6144	-0.1375	0.3864	0.3653	1.0000	0.1072	-0.2336	0.3404	0.2955	-0.0415	-0.0637
R-FRQ	0.1034	0.1127	0.1294	0.1090	0.1664	-0.0995	0.1085	0.0956	0.1072	1.0000	-0.1743	0.1077	0.0968	-0.0188	-0.0170
I-FRQ	-0.3512	-0.1101	-0.1715	-0.1355	-0.3886	0.6518	-0.1629	-0.1877	-0.2336	-0.1743	1.0000	-0.1067	-0.0821	0.0340	0.0405
SIG-STRNGTH	0.2450	0.9855	0.8255	0.9666	0.6309	-0.0649	0.6452	0.4777	0.3404	0.1077	-0.1067	1.0000	0.9656	-0.0343	-0.0479
ABS-ENERGY	0.1991	0.9131	0.7186	0.8730	0.5563	-0.0474	0.6079	0.4246	0.2955	0.0968	-0.0821	0.9656	1.0000	-0.0259	-0.0355
C-FRQ	-0.0355	-0.0353	-0.0621	-0.0423	-0.0714	0.0280	-0.1374	-0.1848	-0.0415	-0.0188	0.0340	-0.0343	-0.0259	1.0000	0.9781
P-FRQ	-0.0640	-0.0507	-0.0838	-0.0609	-0.0964	0.0335	-0.1671	-0.2257	-0.0637	-0.0170	0.0405	-0.0479	-0.0355	0.9781	1.0000

Tabla 4.13 Matriz de correlación entre parámetros de EA para los ensayos de probeta CP1 agujeros a1, a2, a3.

CP1 a1	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.3134	0.4182	0.4000	0.4570	-0.2027	0.2250	0.2509	0.7205	0.3142	-0.3225	0.2506	0.1933	-0.0450	-0.0976
COUN	0.3134	1.0000	0.7867	0.9489	0.5083	-0.0543	0.4490	0.3374	0.5195	0.2720	-0.0919	0.9612	0.8923	-0.0312	-0.0722
ENER	0.4182	0.7867	1.0000	0.8178	0.7200	-0.0900	0.5282	0.4481	0.6593	0.3416	-0.1415	0.7029	0.5997	-0.0635	-0.1137
DURATION	0.4000	0.9489	0.8178	1.0000	0.5812	-0.1097	0.4365	0.3618	0.5189	0.2634	-0.1546	0.8827	0.7798	-0.0479	-0.0937
AMP	0.4570	0.5083	0.7200	0.5812	1.0000	-0.2554	0.5020	0.5226	0.6544	0.4627	-0.3648	0.4279	0.3390	-0.1512	-0.1749
A-FRQ	-0.2027	-0.0543	-0.0900	-0.1097	-0.2554	1.0000	-0.0764	-0.1109	-0.1082	-0.2825	0.6808	-0.0399	-0.0213	0.0643	0.0443
RMS	0.2250	0.4490	0.5282	0.4365	0.5020	-0.0764	1.0000	0.8315	0.4130	0.2474	-0.1191	0.4390	0.4097	-0.1728	-0.2101
ASL	0.2509	0.3374	0.4481	0.3618	0.5226	-0.1109	0.8315	1.0000	0.3912	0.2530	-0.1599	0.2963	0.2495	-0.3142	-0.3547
PCNTS	0.7205	0.5195	0.6593	0.5189	0.6544	-0.1082	0.4130	0.3912	1.0000	0.3476	-0.1809	0.4332	0.3670	-0.0623	-0.1234
R-FRQ	0.3142	0.2720	0.3416	0.2634	0.4627	-0.2825	0.2474	0.2530	0.3476	1.0000	-0.4331	0.2217	0.1838	-0.0642	-0.0830
I-FRQ	-0.3225	-0.0919	-0.1415	-0.1546	-0.3648	0.6808	-0.1191	-0.1599	-0.1809	-0.4331	1.0000	-0.0677	-0.0409	0.0817	0.0576
SIG-STRNGTH	0.2506	0.9612	0.7029	0.8827	0.4279	-0.0399	0.4390	0.2963	0.4332	0.2217	-0.0677	1.0000	0.9783	-0.0186	-0.0515
ABS-ENERGY	0.1933	0.8923	0.5997	0.7798	0.3390	-0.0213	0.4097	0.2495	0.3670	0.1838	-0.0409	0.9783	1.0000	-0.0053	-0.0334
C-FRQ	-0.0450	-0.0312	-0.0635	-0.0479	-0.1512	0.0643	-0.1728	-0.3142	-0.0623	-0.0642	0.0817	-0.0186	-0.0053	1.0000	0.9456
P-FRQ	-0.0976	-0.0722	-0.1137	-0.0937	-0.1749	0.0443	-0.2101	-0.3547	-0.1234	-0.0830	0.0576	-0.0515	-0.0334	0.9456	1.0000

CP1a2	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.2415	0.3786	0.3891	0.4437	-0.2083	0.2007	0.2021	0.6507	0.2315	-0.3280	0.1933	0.1418	-0.0340	-0.0650
COUN	0.2415	1.0000	0.7206	0.9347	0.4684	-0.0395	0.5193	0.3418	0.4615	0.1615	-0.0660	0.9616	0.9081	-0.0213	-0.0470
ENER	0.3786	0.7206	1.0000	0.7950	0.7146	-0.0819	0.6002	0.4702	0.6584	0.2133	-0.1210	0.6134	0.5083	-0.0527	-0.0818
DURATION	0.3891	0.9347	0.7950	1.0000	0.5909	-0.1089	0.5076	0.3745	0.5109	0.1617	-0.1431	0.8808	0.8036	-0.0389	-0.0736
AMP	0.4437	0.4684	0.7146	0.5909	1.0000	-0.2697	0.5076	0.4293	0.6329	0.3400	-0.3679	0.3772	0.2889	-0.0932	-0.0940
A-FRQ	-0.2083	-0.0395	-0.0819	-0.1089	-0.2697	1.0000	-0.0381	-0.0397	-0.1016	-0.2512	0.6752	-0.0293	-0.0133	0.0515	0.0296
RMS	0.2007	0.5193	0.6002	0.5076	0.5076	-0.0381	1.0000	0.7833	0.4436	0.1668	-0.0658	0.4781	0.4324	-0.0952	-0.1384
ASL	0.2021	0.3418	0.4702	0.3745	0.4293	-0.0397	0.7833	1.0000	0.3703	0.1285	-0.0661	0.2885	0.2395	-0.2014	-0.2680
PCNTS	0.6507	0.4615	0.6584	0.5109	0.6329	-0.1016	0.4436	0.3703	1.0000	0.2276	-0.1673	0.3749	0.3079	-0.0245	-0.0508
R-FRQ	0.2315	0.1615	0.2133	0.1617	0.3400	-0.2512	0.1668	0.1285	0.2276	1.0000	-0.3870	0.1258	0.1013	-0.0316	-0.0296
I-FRQ	-0.3280	-0.0660	-0.1210	-0.1431	-0.3679	0.6752	-0.0658	-0.0661	-0.1673	-0.3870	1.0000	-0.0477	-0.0258	0.0632	0.0376
SIG-STRNGTH	0.1933	0.9616	0.6134	0.8808	0.3772	-0.0293	0.4781	0.2885	0.3749	0.1258	-0.0477	1.0000	0.9864	-0.0164	-0.0368
ABS-ENERGY	0.1418	0.9081	0.5083	0.8036	0.2889	-0.0133	0.4324	0.2395	0.3079	0.1013	-0.0258	0.9864	1.0000	-0.0088	-0.0255
C-FRQ	-0.0340	-0.0213	-0.0527	-0.0389	-0.0932	0.0515	-0.0952	-0.2014	-0.0245	-0.0316	0.0632	-0.0164	-0.0088	1.0000	0.9581
P-FRQ	-0.0650	-0.0470	-0.0818	-0.0736	-0.0940	0.0296	-0.1384	-0.2680	-0.0508	-0.0205	0.0376	-0.0368	-0.0255	0.9581	1.0000

CP1a3	RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	ASL	PCNTS	R-FRQ	I-FRQ	SIG. STRNGTH	ABS. ENERGY	C-FRQ	P-FRQ
RISE	1.0000	0.2099	0.3684	0.3029	0.4651	-0.2050	0.1515	0.2028	0.6912	0.2404	-0.3246	0.1691	0.1180	-0.0555	-0.0842
COUN	0.2099	1.0000	0.7286	0.9563	0.4753	-0.0343	0.4144	0.3155	0.3784	0.1700	-0.0599	0.9446	0.8513	-0.0244	-0.0492
ENER	0.3684	0.7286	1.0000	0.7786	0.7361	-0.0816	0.4695	0.4326	0.6005	0.2285	-0.1228	0.6535	0.5448	-0.0514	-0.0866
DURATION	0.3029	0.9563	0.7786	1.0000	0.5432	-0.0770	0.4046	0.3396	0.4105	0.1556	-0.1073	0.9044	0.7863	-0.0416	-0.0698
AMP	0.4651	0.4753	0.7361	0.5432	1.0000	-0.2539	0.4164	0.4171	0.6732	0.3758	-0.3537	0.4160	0.3384	-0.0728	-0.0959
A-FRQ	-0.2050	-0.0343	-0.0816	-0.0770	-0.2539	1.0000	-0.0397	-0.0646	-0.1133	-0.2765	0.6620	-0.0271	-0.0143	0.0414	0.0319
RMS	0.1515	0.4144	0.4695	0.4046	0.4164	-0.0397	1.0000	0.8168	0.3134	0.1404	-0.0562	0.4181	0.3944	-0.1000	-0.1279
ASL	0.2028	0.3155	0.4326	0.3396	0.4171	-0.0646	0.8168	1.0000	0.3266	0.1377	-0.0886	0.2914	0.2510	-0.2187	-0.2653
PCNTS	0.6912	0.3784	0.6005	0.4105	0.6732	-0.1133	0.3134	0.3266	1.0000	0.2521	-0.1876	0.3123	0.2465	-0.0430	-0.0823
R-FRQ	0.2404	0.1700	0.2285	0.1556	0.3758	-0.2765	0.1404	0.1377	0.2521	1.0000	-0.4329	0.1413	0.1192	-0.0299	-0.0266
I-FRQ	-0.3246	-0.0599	-0.1228	-0.1073	-0.3537	0.6620	-0.0562	-0.0886	-0.1876	-0.4329	1.0000	-0.0468	-0.0284	0.0526	0.0393
SIG-STRNGTH	0.1691	0.9446	0.6535	0.9044	0.4160	-0.0271	0.4181	0.2914	0.3123	0.1413	-0.0468	1.0000	0.9689	-0.0215	-0.0409
ABS-ENERGY	0.1180	0.8513	0.5448	0.7863	0.3384	-0.0143	0.3944	0.2510	0.2465	0.1192	-0.0284	0.9689	1.0000	-0.0155	-0.0307
C-FRQ	-0.0555	-0.0244	-0.0514	-0.0416	-0.0728	0.0414	-0.1000	-0.2187	-0.0430	-0.0299	0.0526	-0.0215	-0.0155	1.0000	0.9700
P-FRQ	-0.0842	-0.0492	-0.0866	-0.0698	-0.0959	0.0319	-0.1279	-0.2653	-0.0823	-0.0266	0.0393	-0.0409	-0.0307	0.9700	1.0000

4.5.2. Resultados para el entrenamiento y predicción de las Redes Neuronales de Kohonen (RNK).

La presente sección expondrá los mapas topológicos resultantes de los procesos de entrenamiento y predicción de las RNK con los datos paramétricos de EA recolectados durante periodos de perforación efectiva. Estos intervalos de perforación representan condiciones de corte características que conformarán las clases de datos que deberá identificar la RNK de manera no supervisada. Es decir que la red no sabe qué tipo de información pertenece a cada clase. Estas clases están compuestas por información correspondiente al taladrado con filo de WC en estos Filo Bueno (FB), taladrado Fracturado (FF), taladrado en roca Arenisca (A), Caliza (C), Pizarra (P) y cemento de consolidación (M). La información general de los tramos temporales y clases se presentan en la tabla 4.14 donde además se detalla la cantidad de VD extraídos para cada periodo y la reducción de los mismos para crear lotes de información de tamaños comparables. También se discrimina la cantidad de VD utilizados para entrenamiento, predicción y el tipo de escalado utilizado en cada caso. De la totalidad de las RNK ensayadas, se seleccionaron tres tipos de arquitecturas levemente diferentes para discriminar las diferentes clases de información. La **red número uno** se la entrenó para separar la condición de **FB** respecto de **FF** durante la perforación de roca Caliza y Cemento de consolidación para la probeta C1. La **red número dos** se utilizó para clasificar la condición de corte de la roca Arenisca respecto del Cemento de consolidación para la probeta A1. Finalmente, la arquitectura de la **red número tres**, se entrenó para clasificar las señales de las condiciones de corte en roca Caliza, Pizarra y Cemento de consolidación para probeta CP1. Las diferencias principales entre las arquitecturas se encuentran en la cantidad de neuronas, en los factores de ajuste de los pesos y cantidad de épocas de entrenamiento.

El mapa de la RNK número uno utilizó la información perteneciente a los ensayos realizados en una probeta con dos capas de roca caliza y donde se identificaron perforaciones en las que ocurrió la fractura del cortador de WC. Por lo tanto, se pudieron determinar los tramos temporales en que el cortador realizó la perforación con FB (Filo Bueno) y FF (Filo Fracturado). La Fig. 4.60 muestra el mapa topológico resultado del entrenamiento con los grupos de información FB y FF y una descripción de la arquitectura de la misma.

Tabla 4.14. Tabla de información general donde se detallan los tramos de tiempo, cantidad, tipo de escalado y utilización de los VD de cinco componentes que serán introducidos a la RNK.

Identificación mapa RNK y variable utilizadas	Ensayo	T. Inicio (s)	T. Fin (s)	Identificador en mapa RNK	Número de VD Original	Número de VD Final (uego de la reducción)	Cantidad Total de Vectores Datos	Tipo de escalado utilizado	Utilización del lote de información	Cantidad de VD para cada lote
1 (V5) Amplitud-rms- nro.de cuentas-rise time-frecuencia promedio	C1a2	187	294	FB	4191	1048	7358	Autoescalado	Entrenamiento	3679
	C1a2	515	601	FB	1915	958				
	C1a2	356	450	FB	5637	1128				
	C1a2	670	768	FB	2667	1334				
	C1a3	315	427	FF	2286	1143				
	C1a3	693	868	FF	2268	1134				
	C1a3	507	616	FF	540	540				
	C1a3	926	971	FF	73	73			Predicción	3679
	A1a1	256	337	M	2003	501				
	A1a1	434	695	A	19412	607				
	A1a1	753	817	M	5776	578				
	A1a1	871	1017	A	17627	551				
	A1a1	1100	1165	M	898	580				
A1a2	119	218	M	2235	559					
A1a2	313	477	A	9041	754					
A1a2	552	576	M	199	199					
A1a2	626	841	A	22437	561					
A1a2	902	968	M	133	133					
A1a3	49	218	M	4425	554					
A1a3	288	422	A	4893	612					
A1a3	472	565	M	576	576					
A1a3	622	840	A	24387	555					
A1a3	930	944	M	136	136					
3 (V5) Amplitud-rms- nro.de cuentas-rise time-frecuencia promedio	CPIa1	103	332	M	5461	547	7997	Autoescalado	Entrenamiento	3998
	CPIa1	393	511	C	680	680				
	CPIa1	543	613	M	338	338				
	CPIa1	653	752	P	6795	567				
	CPIa1	800	918	M	447	447				
	CPIa2	42	296	M	8325	521				
	CPIa2	353	495	C	1149	575				
	CPIa2	525	572	M	1083	542				
	CPIa2	618	729	P	2587	518				
	CPIa2	785	805	M	296	296				
	CPIa3	121	355	M	13295	512				
	CPIa3	413	590	C	1418	473				
	CPIa3	622	645	M	835	835				
CPIa3	683	789	P	3166	528					
CPIa3	826	885	M	1833	618					
Filo Bueno (FB)				Roca Arenisca (A)			Roca Caliza (C)	Roca Pizarra (P)		Cemento de unión (M)

Esta etapa del proceso muestra un error de norma muy bajo, 0.09, lo que indica que el proceso de aprendizaje fue efectivo, a pesar de que el error de mezclado es del 30%. Se identifican zonas topológicas de clasificación del FF respecto del FB y se debe considerar que como la geometría de la RNK es toroidal, varias de estas zonas muestran continuidad si se realiza la unión de los extremos del mapa.

Características de arquitectura de la RNK	Detalle	
Tamaño de red	40 x 40	Neuronas
Gemotría		Toroidal
Función Topológica		Gausiana
Vecino mas lejano	17	
Tipo de Neurona Ganadora		Peso mas parecido al dato de entrada
Corrección máxima y mínima de pesos	0.8-0.2	
Número de épocas	2000	
Ajuste de los pesos		Por época y por dato de entrada
Máximo valor absoluto de los pesos	1	
Error de mezclado final del entrenamiento	30	%
Error de norma Final del entrenamiento	0.09	
Tiempo de Entrenamiento	111606s	31 h.

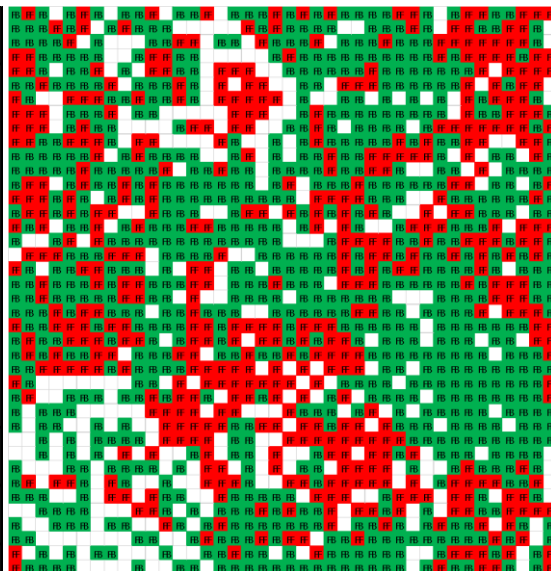


Fig. 4.60. Resumen de arquitectura de RNK número uno y mapa de entrenamiento para clases FB y FF.

En la Fig. 4.61, muestra el resultado de los datos de simulación sobre el mapa entrenado. Estas diferentes zonas topográficas del mapa logran clasificar la información de los procesos con FB y FB con un error de mezclado de 31.5% y un error de norma 0.148. La información se distribuyó en varios clústeres aislados con fronteras entre clases que no se encuentran claramente definidas a excepción de pequeños subgrupos de zonas de dentro del mapa. Ambos errores muestran un aumento esperable de su valor debido a que los datos procesados nunca fueron vistos por la red (hasta el momento de la predicción). Hay que considerar que la cantidad de datos de predicción es igual a la cantidad de datos de entrenamiento. Es decir que se entrenó la red con la misma cantidad de datos que con los que se simuló, cuando normalmente la relación entre el lote de entrenamiento y el de predicción debe ser aproximadamente 70% a 30% respectivamente. Esto habla de que el proceso de entrenamiento fue satisfactorio desde el punto de vista de la arquitectura utilizada más allá que siempre es susceptible de mejoras. Parte de la “confusión” de la red durante el proceso de clasificación puede ser atribuido a que, en un proceso de perforado con FF, el corte se desarrolla de manera más ineficiente y con múltiples mecanismos hasta finalizar el taladrado.

Muchas de las señales pertenecientes a los procesos de fractura, pulverización, remoción del material y otros mecanismos, siguen sucediendo en ambos casos de corte (con FB y FF) y por lo tanto puede considerarse la posibilidad de que parte de la información mal clasificada sea *verdaderamente* perteneciente por similitud, a los dos grupos que se intentan separar.

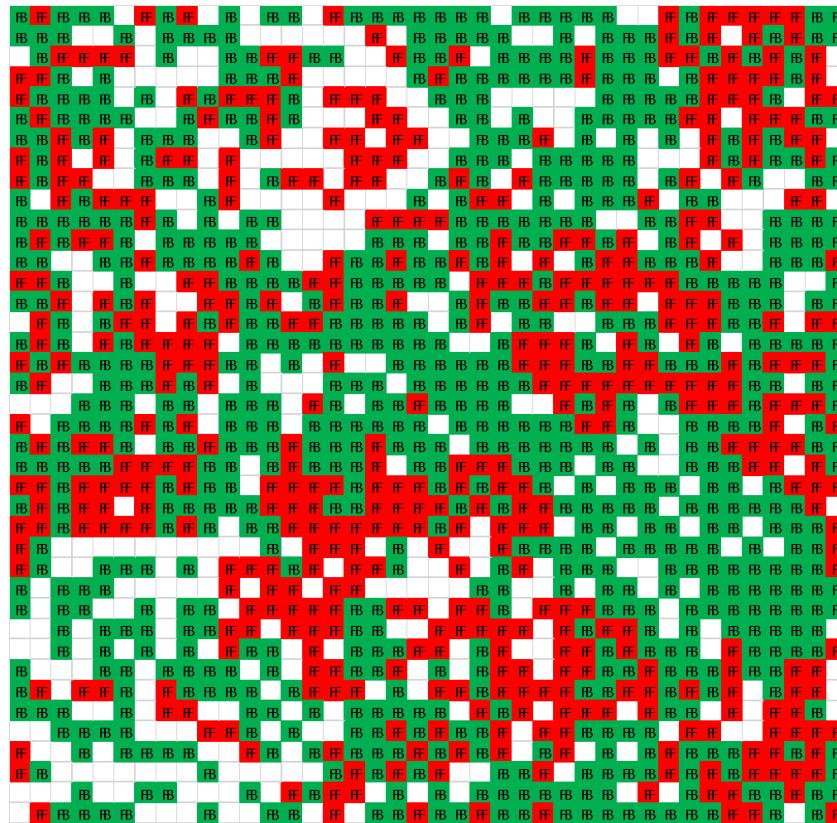


Fig. 4.61. Mapa de clasificación para simulación de RNK número uno, con clases de FB y FF con un error de mezclado 31.5 % y error de Norma 0.1408.

Los tramos de información que se tomaron para estos procesos de clasificación no fueron sometidos a filtrado alguno, más allá del que realiza el equipo de EA durante la adquisición. En nuestro caso podría decirse que la información procesada por la RNK es directamente el parámetro de la señal “cruda” de EA luego del procesamiento del equipo. Eventualmente mediante técnicas de selección de información y post procesamiento se podría mejorar la calidad de la información que ingresa a la RNK para ser clasificada. Esta selección podría estar orientada a separar la información por amplitud, varianza, frecuencia, etc. donde por ejemplo la amplitud más alta se asocia con el corte y la fractura del material y el proceso de fricción y molienda se relaciona con una amplitud menor y un tipo de señal con características más continuas. Es por esto que podrían ser utilizar otros parámetros de EA como duración, frecuencia o rise time que históricamente se utilizan para diferenciar un proceso de fractura respecto de uno de erosión y molienda, lo que nuevamente filtraría la

información que ingresa a la red en post de mejorar los resultados de la clasificación de estas dos condiciones. Lo anteriormente propuesto requiere conocimiento de la técnica y de las características de las señales de EA, además de un conocimiento profundo del proceso donde deben ser definidos umbrales de decisión. Estos umbrales algunas veces tienen un criterio definido y en otros casos son arbitrarios. Adicionalmente también suele ser muy conveniente utilizar otros parámetros externos respecto de los parámetros de EA, como podría haber sido la PR en nuestro caso. Este parámetro adicional pasaría a conformar parte del VD multidimensional que alimenta RNK y eventualmente podría mejorar el proceso de clasificación. Parte de la presente investigación está basada en analizar la aptitud de la EA para monitorear el presente proceso y es por eso que se excluyó de las variables utilizadas para el análisis el parámetro exterior de PR. Adicionalmente se considera que el incremento de la aplicabilidad de la EA para el control de procesos debe estar sujeto a sistemas que simplifiquen o minimicen el post procesamiento de la información y la aplicación de criterios especializados para selección de la misma. Debido a este motivo, se resolvió comprobar la aptitud para la clasificación, con una señal de EA con mínimo procesamiento de los parámetros, sin filtrado o selección de la calidad de la misma, mediante la utilización de umbrales o en base a criterios especificados.

En el mapa de simulación mostrado en la Fig. 4.61, la información utilizada pertenece a dos estados (FB y FF) relacionados a un proceso complejo como el perforado. Estos datos de EA fueron seleccionados en tiempo para utilizar información en una condición de proceso claramente definida, posteriormente se decimo el número de Hits para disminuir la cantidad de datos y finalmente se aplicó un método de normalización. Ningún otro tipo de operación o filtrado post adquisición aplicó sobre ellos y la RNK entrenada posee una capacidad de clasificar correctamente 68 datos por cada 100 que ingresan a la red. Estos resultados muestran que eventualmente este sistema tomado como una parte adicional de la cadena de medición de EA y clasificación de los datos muestra capacidad y potencial para ser utilizados en sistemas de toma de decisiones de procesos de perforado complejo donde la herramienta está fuera del alcance del operador y no se puede rápidamente establecer el estado de la misma.

En las Figs. 4.62 y 4.63 se presentan los resultados de la clasificación del proceso de perforado en función de la condición de corte en los diferentes estratos rocosos. La Fig. 4.62 detalla la arquitectura y el mapa de entrenamiento de la RNK número dos, la cual utilizó la información de EA resultante de la perforación de probeta A1 compuesta por dos capas de

roca Arenisca (A) cementada. Las clases a distinguir por esta RNK corresponden al taladrado de la roca Arenisca (A) y del cemento de unión (M) que consolida toda la probeta. El error de norma y de mezclado mostrado por esta RNK para el proceso de entrenamiento es de 0.068 y 11.4% respectivamente. La Fig. 4.63 muestra el resultado del mapa topológico de simulación, donde la información se clasifica en dos grandes grupos dispuestos ortogonalmente (recordar que la geometría de esta RNK es toroidal). Los errores de norma y de mezclado, correspondientes al proceso de simulación son 0.1015 y 10.99 % respectivamente, lo que muestra un desempeño mejor que el obtenido durante el proceso de entrenamiento con un lote de datos de igual dimensiones y enteramente desconocido para la red. ,

Finalmente, el mapa de entrenamiento de la RNK número tres, mostrado en la Fig. 4.64 trabaja con la información perteneciente a las perforaciones realizadas en la probeta CP1 compuesta por una capa de roca caliza (C), una capa de roca Pizarra (P) y el cemento de consolidación de las capas (M). El mapa de entrenamiento muestra tres zonas de clasificación correspondiente al perforado de estos tres diferentes estratos. La zona topográfica de las señales pertenecientes a la perforación de P se marca de manera más clara que la información perteneciente a la condición de corte de C. Luego, las señales correspondientes a M se encuentran homogéneamente repartidas en la superficie del mapa. El error de norma y de mezclado para esta RNK es 0.049 y 25.4% respectivamente. La Fig. 4.65 muestra el mapa de clasificación para la simulación, donde nuevamente la clase P se encuentra clasificada de forma compacta, mientras que la clase C está concentrada sobre el lado derecho del mapa con la clase M homogéneamente repartida dentro del mapa. Los errores de norma y mezclado para el mapa de simulación son 25.9% y 0.077 respectivamente. Estos errores son levemente superiores que los obtenidos durante la etapa de entrenamiento, mostrando nuevamente que la arquitectura y los procedimientos de entrenamiento están satisfactoriamente realizados y son consistentes con los valores obtenidos durante el entrenamiento.

Si bien el error de mezclado para la Fig. 4.64 puede ser considerado alto, la red clasifica correctamente algo más de 7 datos de cada 10 ingresados, donde todas las arquitecturas y procedimientos de entrenamiento pueden ser susceptibles de mejoras en base a filtrado y selección de las señales de EA y eventualmente la adición de parámetros externos que complementen las mediciones de la técnica.

Características de arquitectura de la RNK	Detalle	
Tamaño de red	35x 35	Neuronas
Gemotría		Toroidal
Función Topológica		Gausiana
Vecino mas lejano	15	
Tipo de Neurona Ganadora		Peso mas parecido al dato de entrada
Corrección máxima y mínima de pesos	0.7-0.05	
Número de épocas	1500	
Ajuste de los pesos		Por época y por dato de entrada
Máximo valor absoluto de los pesos	1	
Error de mezclado final del entrenamiento	11.4	%
Error de norma Final del entrenamiento	0.068979	
Tiempo de Entrenamiento	72397,7 s	20.1 h.

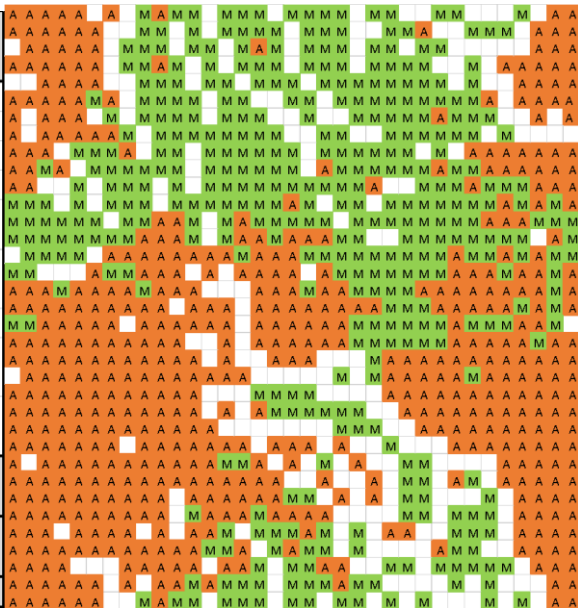


Fig. 4.62. Resumen de arquitectura de RNK número dos y mapa de entrenamiento para clases A y M.

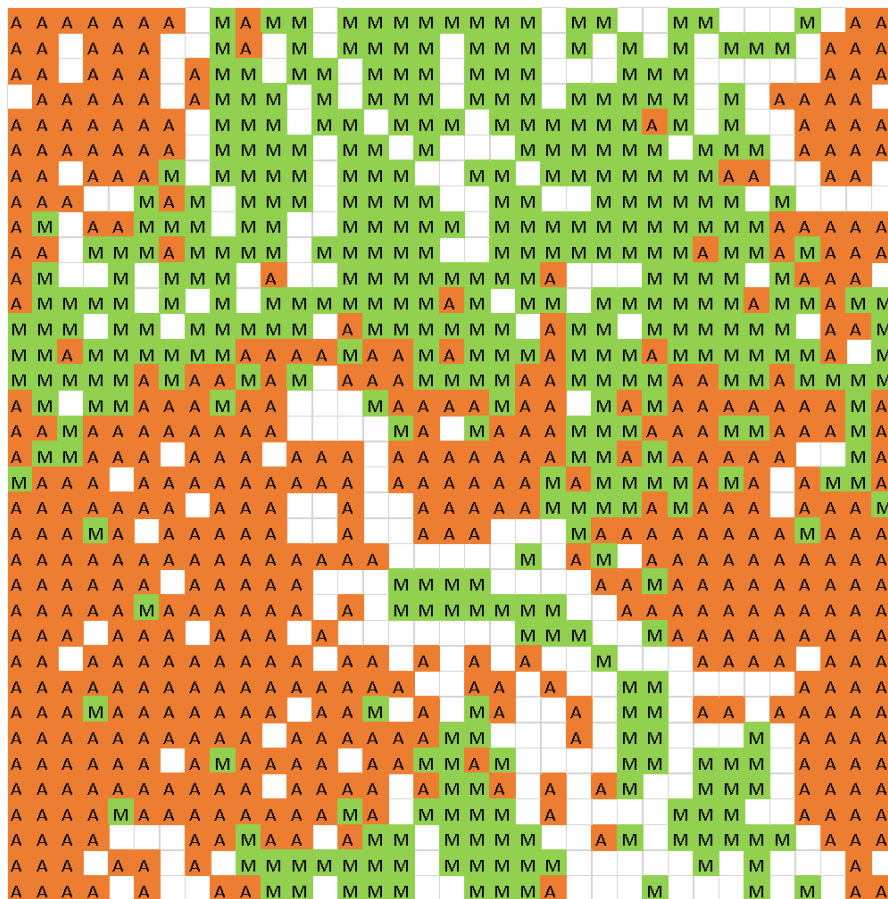


Fig. 4.63. Mapa de clasificación para simulación de RNK número dos con clases A y M que obtiene un error de mezclado 10.99 % y Error de Norma 0.1015.

Características de arquitectura de la RNK	Detalle	
Tamaño de red	40 x 40	Neuronas
Gemotría		Toroidal
Función Topológica		Gausiana
Vecino mas lejano	15	
Tipo de Neurona Ganadora		Peso mas parecido al dato de entrada
Corrección máxima y mínima de pesos	0.65-0.1	
Número de épocas	1500	
Ajuste de los pesos		Por época y por dato de entrada
Máximo valor absoluto de los pesos	1	
Error de mezclado final del entrenamiento	25.4	%
Error de norma Final del entrenamiento	0.049029	
Tiempo de Entrenamiento	92759,7	1 día y 1.7 h

Fig. 4.64. Resumen de arquitectura de RNK número tres y mapa de entrenamiento para clases C, P y M.

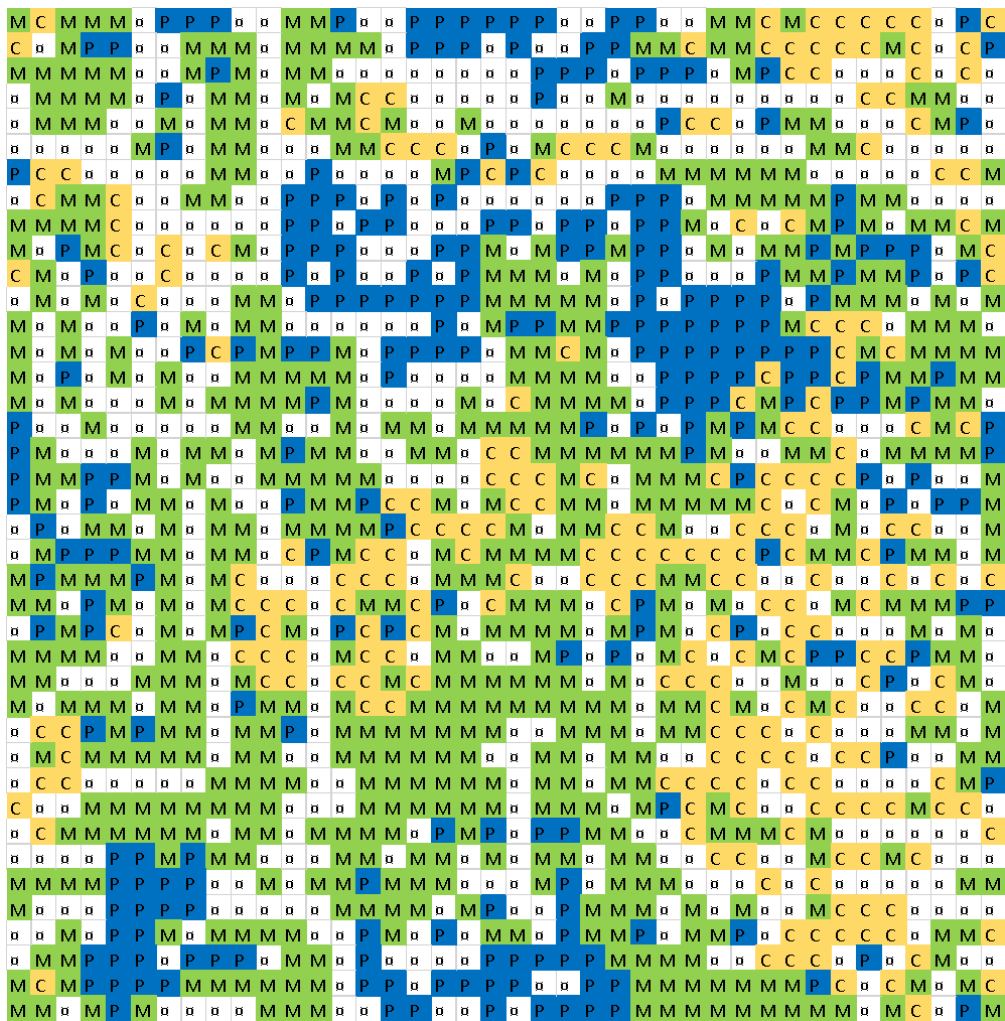


Fig. 4.65. Mapa de clasificación para simulación de clases C, P y M con un error de mezclado 25.90% y Error de Norma 0.0773.

De manera general estos resultados muestran que la clasificación de la condición de proceso por variación del filo de corte o el material cortado se está realizando de forma indirecta mediante datos paramétricos de la EA. El desempeño de estas RNK muestra valores de error de mezclado que varían según el tipo de arquitectura, y clases de información que se pretende discriminar, siendo en el caso más desfavorable un nivel de *acierto* de 6 datos cada 10 ingresados y en los casos más favorables 9 de cada 10 datos.

Evidentemente la *EA muestra que cambios en la generación de ondas elásticas producto de la geometría del cortador, la tensión de fractura, el tamaño de grano y consolidación del material que es cortado, que se traduce en una modificación de la amplitud, número de cuentas, RMS, rise time y la frecuencia promedio de la EA.* En el caso del FF respecto de FB, la modificación mecánica se produce por la carencia de filos de corte de WC en los extremos del cortador, que hacen que el cuerpo del mismo actúe como herramienta de corte. Gran parte de la desintegración del material se produce por indentación del cuerpo y acción de corte de los canales de fluido tallados, que auspician de dientes cortadores. A su vez el flujo de material cortado se ve restringido y es posible que el proceso de molienda de los residuos cortados también cambie. Por otro lado, la modificación de las propiedades geomecánicas de la roca varían la forma y la energía necesaria para que la herramienta realice el proceso de desintegración, pudiendo promover la creación de fracturas de diferentes tamaños, direcciones y formas de propagación, con disímiles cantidades de energía involucrada en cada caso, donde parte de esta posteriormente se transformará en energía elástica de EA. A primer orden se observa una capacidad de diferenciar algunas de las condiciones de perforación que se producen en las probetas de ensayo. En base a esta experiencia, se puede considerar que, mediante la aplicación de procedimientos de post procesamiento, redes y sistemas de inteligencia artificial más sofisticados, podrán eventualmente proporcionar niveles de *acierto* superiores con menor tiempo de entrenamiento. La capacidad de poder diferenciar condiciones de corte mediante la utilización de la EA brinda la posibilidad de considerarla como una valiosa técnica para la tomar decisiones respecto del estado de la herramienta y su reemplazo, contrastar los análisis estratigráficos realizados con otras técnicas y procedimientos y eventualmente utilizar esta información para “navegar de manera remota” la herramienta de perforación.

Capítulo 5.

CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se concluye que:

- *Respecto a la máquina de perforación*, la misma se desempeñó de manera muy satisfactoria mostrando capacidad de taladrar agujeros de 65 mm de diámetro por 500 mm de largo con rpm, presión de avance y retención variables. Este equipo cuenta con capacidad para montar múltiples herramientas de corte y permite monitorear las presiones y la EA durante todo el proceso de corte.

- *Respecto a la instrumentación para la medición de la EA en una herramienta rotativa*, la solución de construir un anillo hidráulico como guía de ondas ha resultado ser un método práctico y eficiente para el acoplamiento acústico de uno de los sensores de EA al cuerpo de la herramienta rotante. La mayor parte de la emisión que se adquiere por este camino sónico corresponde a la actividad de la zona de corte, y es mínima la emisión recibida de otras posibles fuentes de ruido.

- *También se midieron las señales con sensores acoplados sobre las probetas* mediante una guía de ondas metálica insertada y cementada en cada una de las muestras. Las señales adquiridas mediante estos sensores muestran una amplitud inferior en 15 dB (promedio) respecto de las adquiridas mediante la guía de ondas hidráulica. Esa disminución se observa también en otros parámetros de la EA como energía, duración y cuentas.

- *la guía de onda hidráulica ha mostrado cualidades beneficiosas en el proceso de monitoreo* debido a que las señales producidas en la zona de interés se reciben con una buena relación señal ruido.

- *Los parámetros de la EA, en todos los ensayos, muestran variaciones a medida que la condición de corte se modifica* por variación de la condición del filo (fractura o cambio de geometría cortador) o por la variación del material que está siendo cortado. Estos cambios se asocian a la modificación de la condición mecánica del corte lo que provoca la variabilidad de las ondas elásticas de EA que emite el proceso.

- *Mediante el procesamiento de la información de EA, la PR, la video grabación de la posición del cortador y el relevamiento stratigráfico del taladro* se pudo asociar a cada tiempo del proceso de perforado, la EA correspondiente, permitiendo identificar de manera temporal las zonas de transición entre sustratos, perforación efectiva, fractura de broca, e inestabilidades durante el corte.

- *Respecto de la disminución de la amplitud de la señal en función de la profundidad de taladrado*, la misma se atribuye a una absorción de parte de la energía elástica por la inmersión del cuerpo cilíndrico de la broca en el líquido de perforación. La mayor transmisión de energía hacia el fluido se atribuye a la propagación de los modos antisimétricos de Lamb debido a que parte de su

movimiento se realiza en un plano perpendicular a la superficie de la broca, ejerciendo ondas P en el fluido.

- *En relación con el aumento de la EA en las zonas de transición entre materiales de diferentes características geomecánicas se concluyó que estas corresponden a factores relacionados con la dinámica de perforación del sistema.* Cuando el cortador avanza a través del cemento hacia el sustrato rocoso cambian las propiedades mecánicas de los materiales cortados. La punta del cortador entra en contacto con la roca nueva y el proceso de corte está asociado a penetración por indentación. Como la broca no tiene un centro de corte definido, oscila entre diferentes posiciones de equilibrio hasta que establece un centro de corte en el nuevo material. Este proceso de corte inestable es reflejado por la EA como un aumento en la tasa de emisión y amplitud de la señal. Una vez centrada, la broca prosigue el proceso de corte de manera estable. Los análisis fotográficos realizados post perforación identificaron la modificación del centro de corte en los taladros.

- *Los análisis de amplitud máxima de las señales de EA no pudieron ser estrictamente asociados a las variaciones de las propiedades mecánicas de los geomateriales.* En algunos casos se observó que, a mayor tensión de fractura y dureza del material perforado, la amplitud de la EA del proceso es mayor. Esto coincide con la bibliografía científica relacionada, pero no pudo ser corroborado para todos los ensayos de geomateriales analizados. El nivel de EA puede variar por múltiples factores como forma de fractura, propiedades geomecánicas del material y otras características del proceso. Estos parámetros mostraron una fuerte influencia en los valores de amplitud del rms, no pudiendo estrictamente asociar nivel de intensidad de la EA según el mayor o menor límite de fractura o dureza del geomaterial. Analizar únicamente la amplitud o el rms de la EA no representa adecuadamente la física del problema, el cual necesita más descriptores de EA debido a la característica multiparamétrica y no lineal del problema abordado.

- *Respecto a la evaluación del cortador de cuatro filos se concluyó que, debido a su amplia superficie de contacto con el material, el mismo es retenido en mayor medida que el cortador de dos filos evidenciándose en la PR del sistema hidráulico.* Este cortador emite señales de EA de amplitud variable con un alto número de cuentas y duración que hacen posible distinguirlo del cortador de WC. La variación de estos parámetros está relacionada con los 4 filos de corte que auspician de múltiples fuentes de EA debido a aumentado la abrasión, la fricción y el proceso de molienda del material cortado respecto del cortador de 2 filos de WC.

- *En relación con la identificación de los instantes de fractura del cortador de WC se pudo establecer claramente el suceso de estos y de las señales de EA que acompañan el evento.* Los parámetros de tasa, de emisión, amplitud y RMS de la EA muestran un aumento temporal en el instante de la fractura (transiente) y un análisis de los Hits pertenecientes a ese instante muestran un aumento de las componentes de altas frecuencias de la emisión. La PR evidencia el instante de fractura mediante un

aumento y una disminución abrupta de su valor, debido a la reacción física de sistema hidráulico como consecuencia de la desaparición parcial del filo de corte. Finalmente, la identificación de estos instantes de tiempo permitió relacionar la EA con la terminación superficial del agujero taladrado luego de la fractura, el cual muestra un claro aumento de la rugosidad de su superficie y una deficiente calidad de terminación.

- *Los análisis de correlación (autocorrelación y correlación cruzada) de la información paramétrica de la EA mostraron que los parámetros **amplitud y RMS de la EA** no son buenos descriptores para ser utilizados con esta herramienta. Específicamente el parámetro amplitud máxima de EA muestra durante la convolución una geometría triangular con un aumento y descenso monótonico del valor de correlación no brindando información útil. El parámetro **RMS** de la EA muestra, en algunos casos, una leve variación del valor de correlación sin hacer evidente algún detalle preciso del proceso de perforación. En ambos casos la falta de detalle se atribuye a temas relacionados con las escalas de valores en dB e integración en tiempo respectivamente que afectan la resolución de la herramienta de correlación.*

- *En la correlación (autocorrelación y correlación cruzada), los parámetros **energía y cuentas de EA** revelaron el mayor nivel de detalle durante el desarrollo de los ensayos de perforación. La correlación del parámetro **cuentas de EA** se mostró como el mejor parámetro para el análisis de correlación, y en segundo lugar el parámetro energía de EA. Las variaciones evidenciadas pudieron ser relacionadas a tiempos específicos del ensayo lo que permitió posicionar gráficamente (en tiempo) los dos ensayos que se están convolucionando. Estos análisis se realizaron respecto del parámetro RMS ya sobre este se tenían claramente identificadas las diferentes partes de cada perforación producto de los estudios previos. La superposición gráfica de los ensayos mostro que muchas de las singularidades observadas (aumentos parciales del valor de correlación) se corresponden con el cambio del geomaterial perforado. Esto se atribuye a la modificación de la EA, producto del cambio en las condiciones de corte por las propiedades mecánicas del material.*

- *Respecto de la aplicación de la correlación de Pearson sobre los parámetros de EA se concluyó que los parámetros que muestran menor correlación lineal son entre si son **rise-time, amplitud, cuentas, RMS, frecuencia promedio**. Este análisis permitió simplificar la información utilizada para el proceso de entrenamiento de la RNK, eliminando parámetros con información redundante, y obteniéndose una reducción del tiempo de procesamiento.*

- *La utilización de la información paramétrica de EA sin ningún tipo de filtrado adicional permitió entrenar y simular diferentes tipos de arquitecturas de RNK que consiguieron identificar variadas condiciones de corte.*

- *Para la clasificación de la condición de corte del material de Arenisca respecto de la capa de Cemento con la RNK, los errores de norma y de mezclado fueron aceptables, se obtuvo una*

satisfactoria separación de la información mostrando en el mapa topológico dos grandes grupos dispuestos ortogonalmente que pertenecen a las dos clases identificadas.

- *La clasificación del corte del material Caliza respecto de la Pizarra y del cemento de unión se obtuvieron errores de clasificación satisfactorios.* El mapa topológico muestra zonas correspondientes al perforado de estos tres estratos. La zona topográfica de las señales de Pizarra se marca de manera clara respecto del corte de la roca Caliza. Las señales correspondientes al cemento de unión se encuentran más homogéneamente repartidas en toda la superficie del mapa

- *La clasificación de la condición de corte de filo bueno (FB) respecto del filo fracturado (FF) mediante RNK* mostro una eficiencia en clasificar aproximadamente 6 de cada 10 datos ingresados. La información se repartió en pequeños clusters de clasificación por todo el mapa de la red. Esto se atribuye a que la información de EA fue tomada sin ningún tipo de filtrado entre condiciones, pudiendo existir señales que verdaderamente pertenezcan a las dos clases como fractura, pulverización, remoción del geomaterial.

-*Todas las arquitecturas y procedimientos de entrenamiento pueden ser susceptibles de mejoras en base a filtrado y selección de las señales de EA* y eventualmente considerar el importante aporte de información de los parámetros externos que complementan las mediciones de la técnica.

La temática de la tesis y las metas alcanzadas en estos estudios muestran una alta originalidad ya que no hay aun en la literatura internacional otros trabajos que muestren el efecto del proceso de perforado de materiales geológicos con los tamaños de los cortadores utilizados en esta investigación y en los rangos de frecuencia alcanzados en la presente tesis.

Los desarrollos y estudios realizados en este trabajo abren la puerta a un posible intento de implementación de esta tecnología a proyectos concretos a través de la instrumentación de herramientas de perforación en campo. Los resultados obtenidos muestran esa factibilidad.

Trabajos a Futuro

Análisis de las señales digitalizadas y parámetros de EA mediante RN con otros esquemas de IA actualmente disponibles en el GEA con el objetivo de realizar publicaciones internacionales.

Posible adición de instrumentación para el posicionamiento del extremo de la broca en función del tiempo. Esto maximiza el alcance de ensayos futuros.

Desarrollo de otros esquemas de monitoreo basados en mejoras de la instrumentación de la EA.

Anexo A

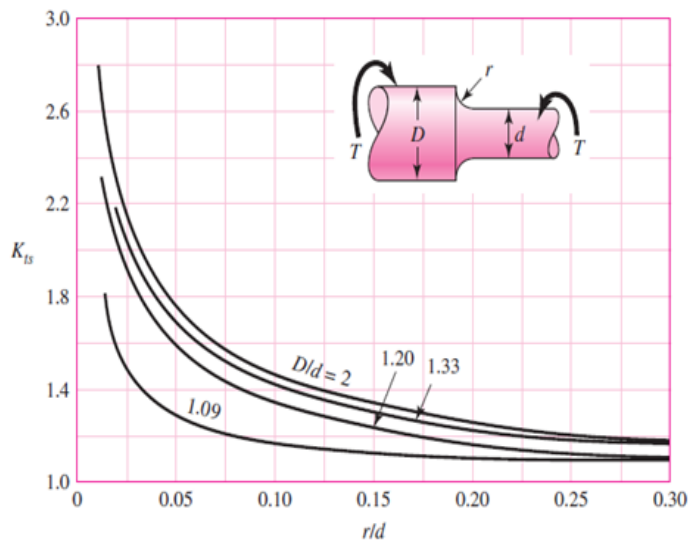
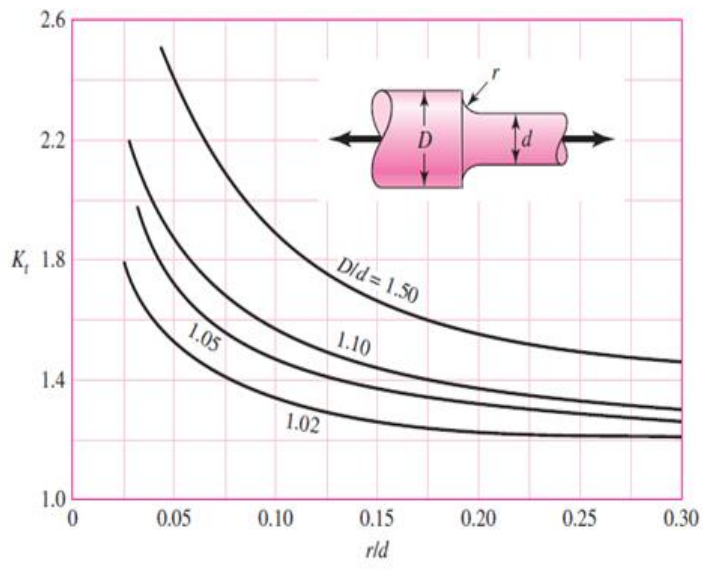
Cálculos de concentración de tensiones en la broca

Modelos de cuadros de cálculos de potencias de máquina según características del corte. Cálculos de dimensionamiento de máquina: Training Handbook, Metal Cutting Technology. AB Sandvik Coromant 2017.

Potencia	Frecuencia	Diámetro	Ten. de corte esp.	Angulo de punta	Angulo de incidencia	Corrección más	Velocidad de corte	Avance por rev	Velocidad de avance	Fuerza de avance	Ten. C. Corr.	F. Avan. corr.
6.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	2.70	53.91	6660.87	1904.31	8456.23
5.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	2.25	44.93	5530.73	1586.92	5872.38
4.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	1.80	35.94	4440.58	1269.54	3758.32
3.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	1.35	26.96	3330.44	952.15	2114.06
2.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	0.90	17.97	2220.29	634.77	939.58
1.00	20.00	65.00	1500.00	168.00	6.00	0.38	4.08	0.45	8.99	1110.15	317.38	234.90
HP		mm	N/mm ²				m/min	mm/rev	mm/min	kg	N/mm ²	kg

Modelo de análisis de tensiones en cambio de sección del eje e información adicional

Potencia	Torque	Carga vertical	Diametro	Jp	Area	Tension de corte	Tension normal	Von Mises
6.00	2135350.32	65343.16	50.00	448468.93	945.14	202.36	152.10	382.08
5.00	1779458.60	54452.63	50.00	448468.93	945.14	168.63	126.75	318.40
4.00	1423566.88	43562.11	50.00	448468.93	945.14	134.91	101.40	254.72
3.00	1067675.16	32671.58	50.00	448468.93	945.14	101.18	76.05	191.04
2.00	711783.44	21781.05	50.00	448468.93	945.14	67.45	50.70	127.36
1.00	355891.72	10890.53	50.00	448468.93	945.14	33.73	25.35	63.68
HP	Nmm	N	mm	mm4	mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2

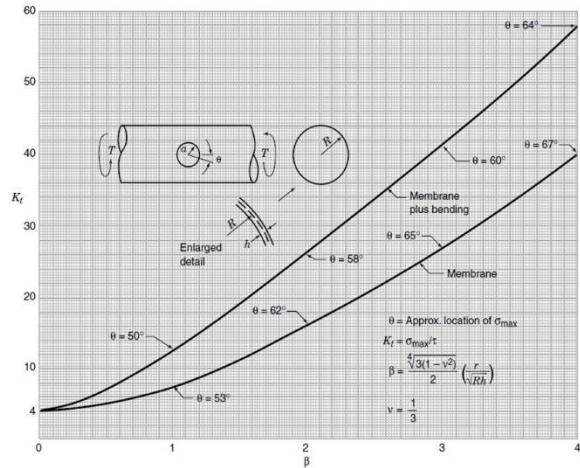
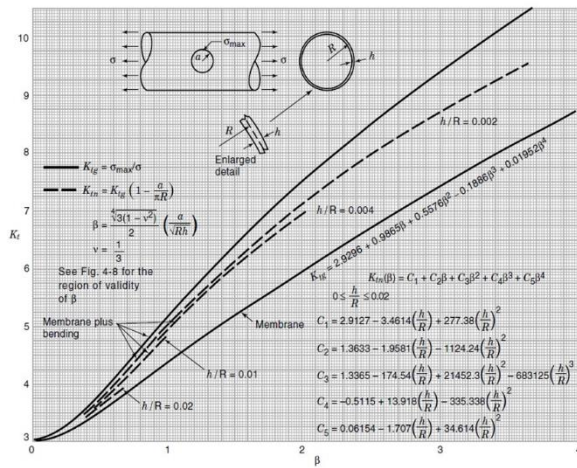


Modelo de análisis de tensiones en cambio de sección de la broca

Potencia	Torque	Carga vertical	Diametro	Jp	Area	Tension de corte	Tension normal	Von Mises
6.00	2135350.32	65343.16	36.00	159844.74	840.74	432.83	202.08	776.44
5.00	1779458.60	54452.63	36.00	159844.74	840.74	360.69	168.40	647.03
4.00	1423566.88	43562.11	36.00	159844.74	840.74	288.55	134.72	517.63
3.00	1067675.16	32671.58	36.00	159844.74	840.74	216.41	101.04	388.22
2.00	711783.44	21781.05	36.00	159844.74	840.74	144.28	67.36	258.81
1.00	355891.72	10890.53	36.00	159844.74	840.74	72.14	33.68	129.41
HP	Nmm	N	mm	mm4	mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2

Modelo de análisis de tensiones en cambio de sección del eje con la adición de perforaciones en el cuerpo de la broca de perforación.

Potencia	Torque	Carga vertical	Diametro	Jp	Area	Tension de corte	Tension normal	Von Mises
6.00	2135350.32	65343.16	60.00	1106887.68	1808.64	231.50	108.39	415.36
5.00	1779458.60	54452.63	60.00	1106887.68	1808.64	192.91	90.32	346.13
4.00	1423566.88	43562.11	60.00	1106887.68	1808.64	154.33	72.26	276.90
3.00	1067675.16	32671.58	60.00	1106887.68	1808.64	115.75	54.19	207.68
2.00	711783.44	21781.05	60.00	1106887.68	1808.64	77.17	36.13	138.45
1.00	355891.72	10890.53	60.00	1106887.68	1808.64	38.58	18.06	69.23
HP	Nmm	N	mm	mm4	mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2



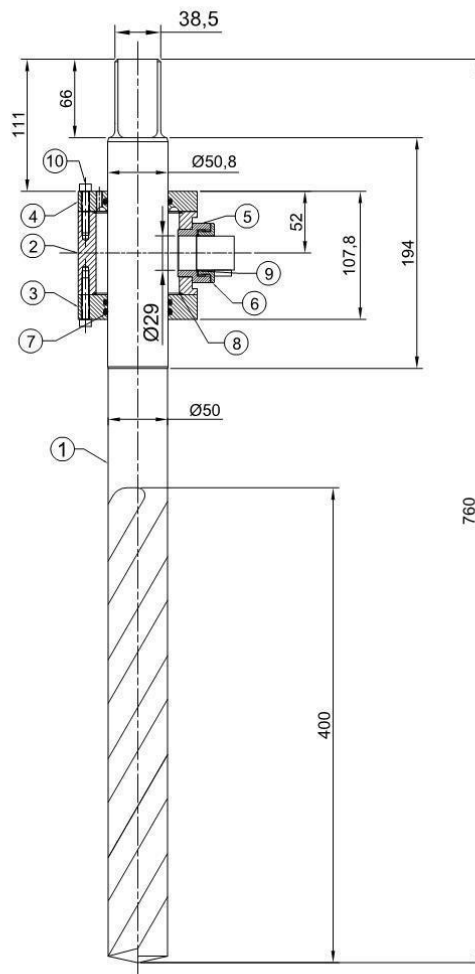
R. G. Budynas, J. Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley”, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, (2008).

R. Hibbeler, “Mecánica de materiales”, Pearson Education, Preantice hall, Inc. 2011.

W. Pilkey, D. Pilkey, “Stress concentration factors” John Wiley & Sons, Inc, 2008.

Planos de detalle de piezas construidas dentro de la facultad con equipos propios del departamento de Ingeniería Mecánica.

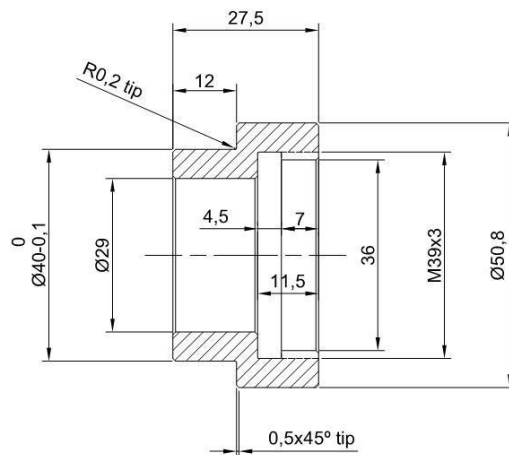
Referencia	Denominacion	Cantidad	Observaciones
1	Broca	1	.
2	Receptor de emsiones acusticas	1	.
3	Tapa superior	1	.
4	Tapa inferior	1	.
5	Adaptador de piezoelectrico	1	.
6	Tuerca del adaptador	1	.
7	Oring Parker N2-226	3	De: 57,45 Di: 50,39 Esp: 3,53
8	Oring Parker N2-039	2	De: 73,13 Di: 69,57 Esp: 1,78
9	Oring Parker N2-024	1	De: 31,86 Di: 28,30 Esp: 1,78
10	Tornillo M5x0,8 largo 35	8	Grado minimo 8.8



	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	
Dib.				
Rev.				
Apr.				
Esc. 1:5	Conjunto broca			
Toler. Rug.				
				9 de 10 hojas

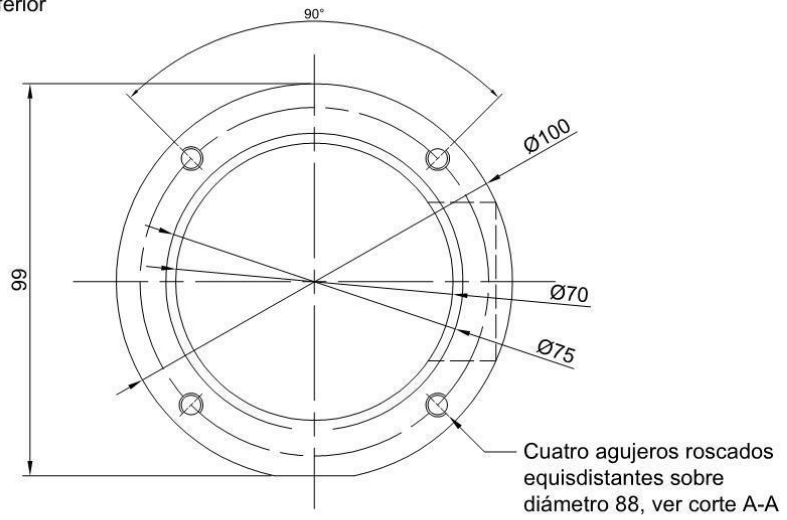
Cantidad	Denominacion	Material	Observaciones
1	Adaptador de piezoelectrico	Acero	.

3,2/
▽

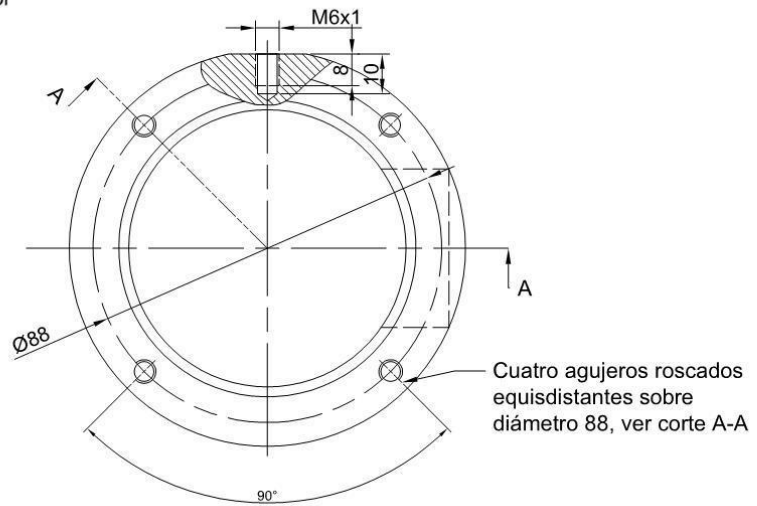


	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Matar filos
Dib.				
Rev.				
Apr.				
Esc. 1:1	Adaptador de piezoelectrico			
Toler. Rug.				
				1 de 10 hojas

Vista inferior



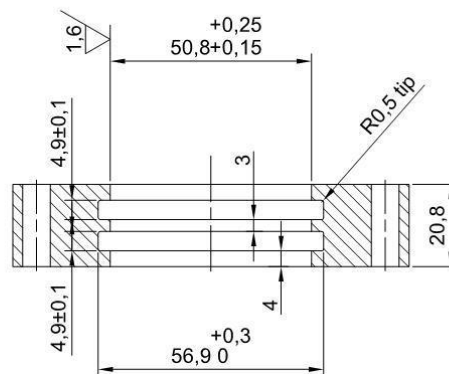
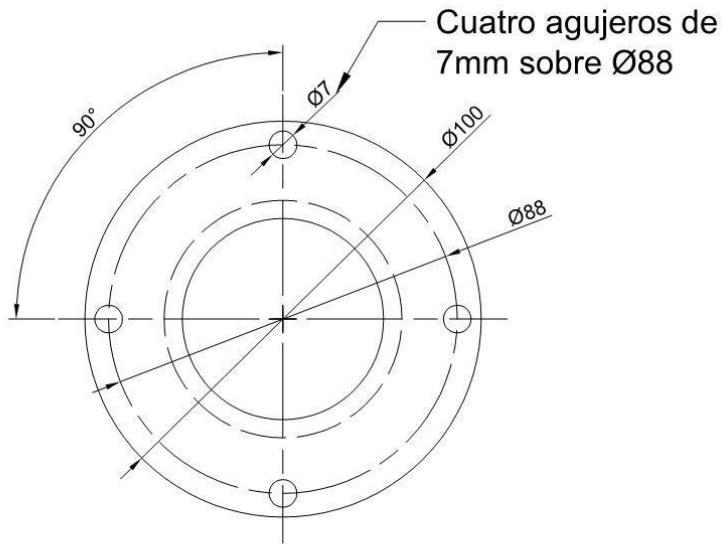
Vista superior



	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Matar filos
Dib.				
Rev.				
Apr.				
Esc. 1:1,5	Receptor de emsiones acusticas			
Toler. Rug.				
				4 de 10 hojas

Cantidad	Denominacion	Material	Observaciones
1	Tapa inferior	Acero	.

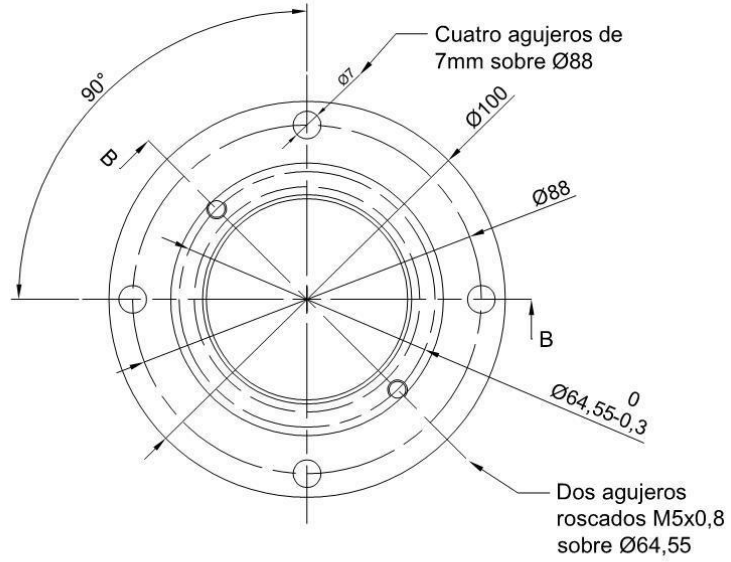
3,2/ (1,6/)



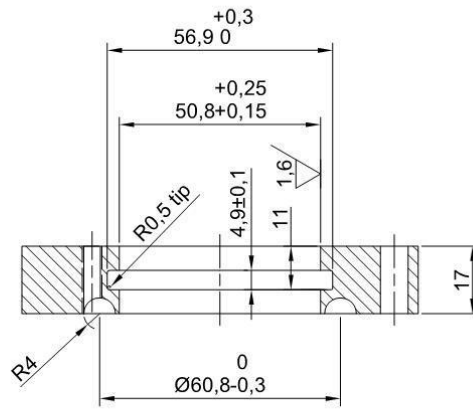
	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Matar filos
Dib.				
Rev.				
Apr.				
Esc.	Tapa inferior			
1:1,5				
Toler.				5 de 10 hojas
Rug.				

Cantidad	Denominacion	Material	Observaciones
1	Tapa superior	Acero	.

$\sqrt{3,2}$ ($\sqrt{1,6}$)



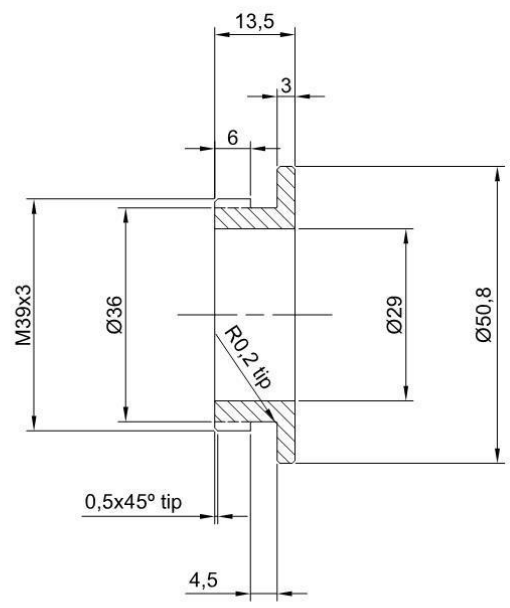
Corte B-B



Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Matar filios
Dib.			
Rev.			
Apr.			
Esc. 1:1,5	Tapa superior		
			6 de 10 hojas
Toler. Rug.			

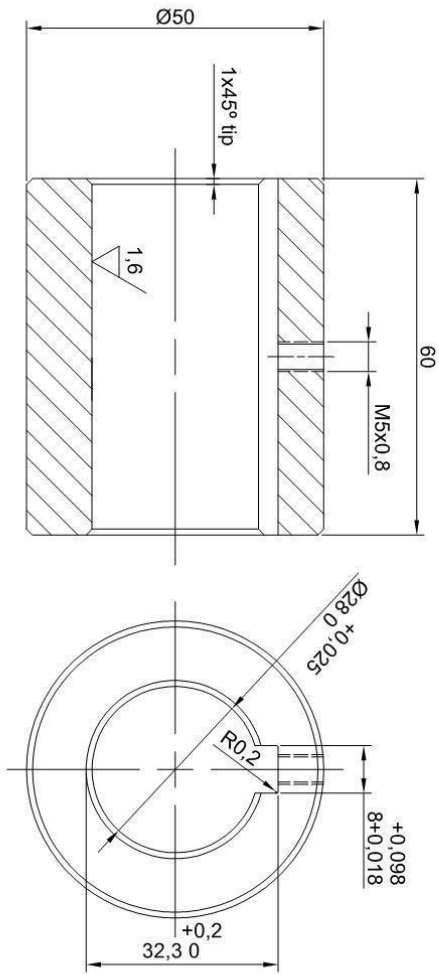
Cantidad	Denominacion	Material	Observaciones
1	Tuerca del adaptador	Acero	.

3,2/
▽



	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Matar filos
Dib.				
Rev.				
Apr.				
Esc. 1:1	Tuerca del adaptador			7 de 10 hojas
Toler. Rug.				

3.2 (1.6)

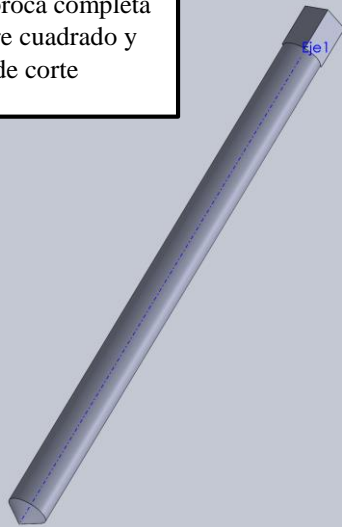


Cantidad	Denominación	Material	Observaciones
1	Acople motor-reductor	Grillon	.

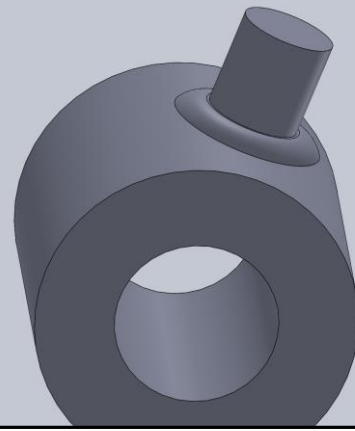
Dib.	Fecha	Nombre	UTN Facultad Regional Delta	Acople motor-reductor	10 de 10 hojas
Rev.					
Apr.					
Esc.					
Toler. Rug.					

Modelos en SOLIDWORKS de algunas piezas correspondientes al modelo de taladradora.

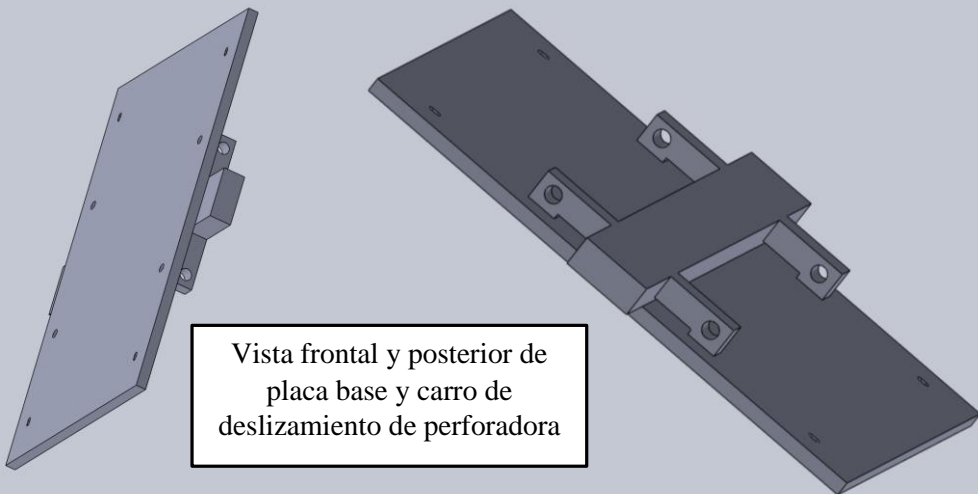
Modelo de broca completa con encastre cuadrado y filos de corte



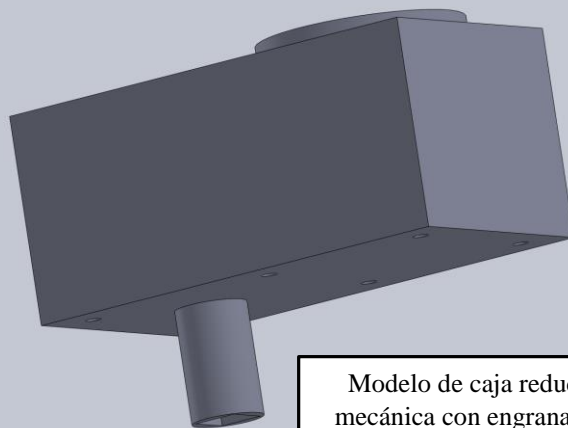
Modelo de guía de ondas hidráulica con sensor piezoeléctrico montado.

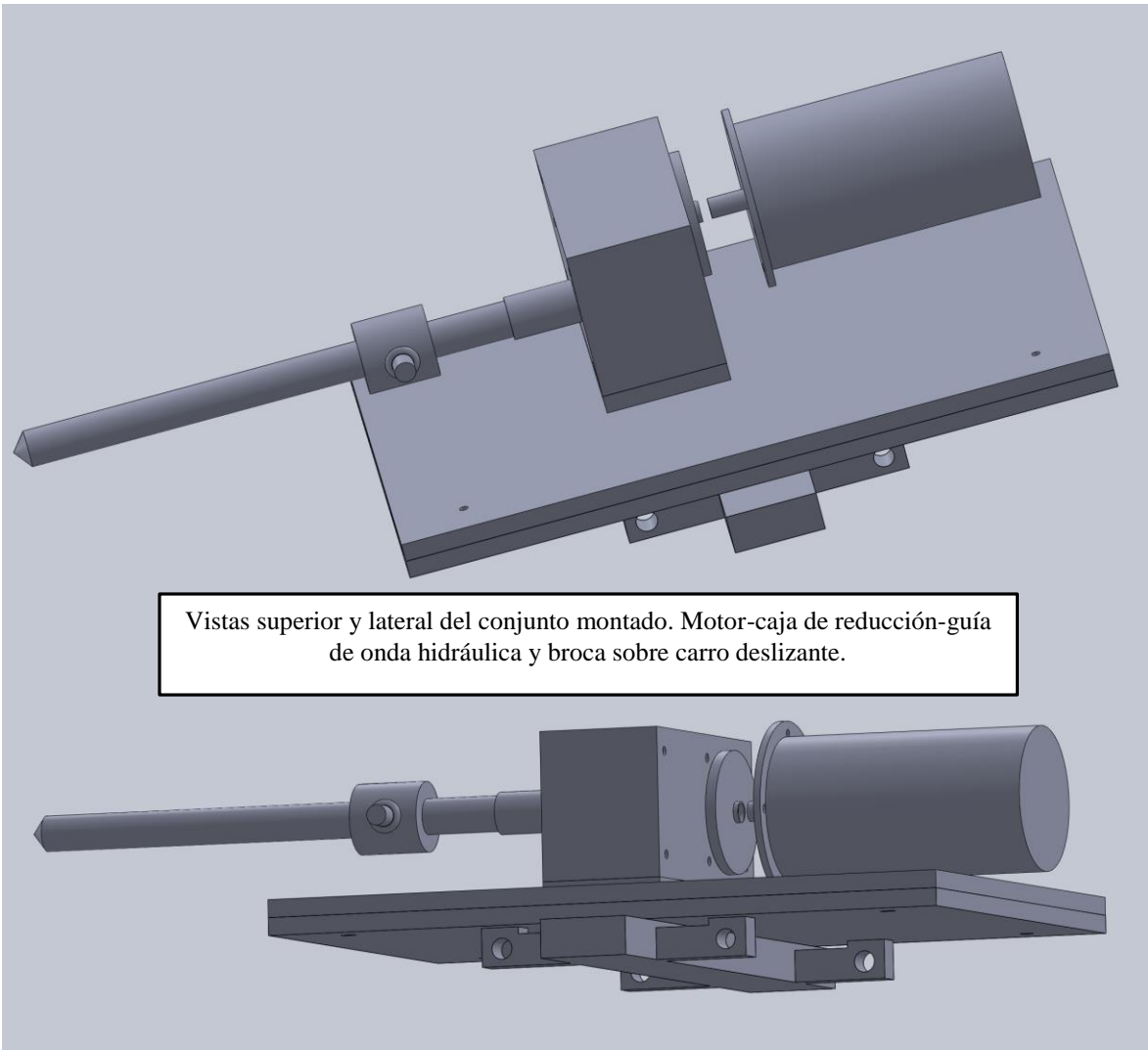


Vista frontal y posterior de placa base y carro de deslizamiento de perforadora



Modelo de caja reductora mecánica con engranajes de dientes planos 1:160





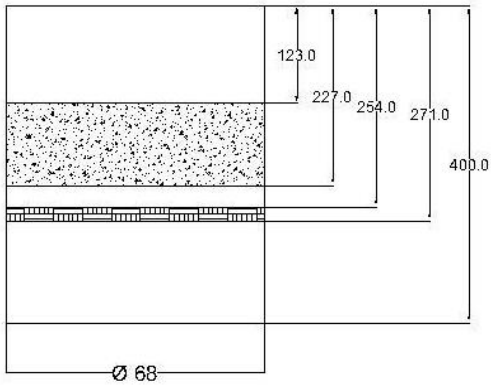
Vistas superior y lateral del conjunto montado. Motor-caja de reducción-guía de onda hidráulica y broca sobre carro deslizante.

Cuadro detalle de los ensayos realizados y estratigrafía de las perforaciones

Nro	Probeta / Agujero	Composición	Tipo de broca	Rotura Filo	Observación	Medición de Estratigrafía	Correlación EA con video
1	P1a1	2 capas de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
2	P1a2	2 capas de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Primera pruebas	Si	Si
3	P1a3	2 capas de roca pizarra	Broca de 4 filos AISI O2	No	Calibración	No	No
4	P1a4	2 capas de roca pizarra	Broca de 4 filos AISI O2	No	Primera pruebas	No	No
5	C1a1	2 capas de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Calibración	Si	Si
6	C1a2	2 capas de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		No	No
7	C1a3	2 capas de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	SI		Si	Si
8	C1a4	2 capas de roca caliza	Broca de 4 filos AISI O2	Si	Ensayo interrumpido y reanunciado	SI	SI
9	A1a1	2 capas de roca arenisca	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
10	A1a2	2 capas de roca arenisca	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
11	A1a3	2 capas de roca arenisca	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		Si	Si
12	A1a4	2 capas de roca arenisca	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
13	CP1a1	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	No se registro PR	SI	SI
14	CP1a2	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		SI	SI
15	CP1a3	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		SI	SI
16	CP1a4	una capa de roca caliza y una de roca pizarra	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
17	AC1a1	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
18	AC1a2	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Calibración	Si	Si
19	AC1a3	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	Si	Si
20	AC1a4	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No	Calibración	No	No
21	AC2a1	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	Si	Calibración	SI	SI
22	AC2a2	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	No		SI	SI
23	AC2a3	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno / Broca de 4 filos AISI O2	Si	Cambio de cortador	SI	SI
24	AC2a4	Una capa de roca arenisca y una de roca caliza	Broca 2 filos de carburo Tungsteno	SI		SI	SI

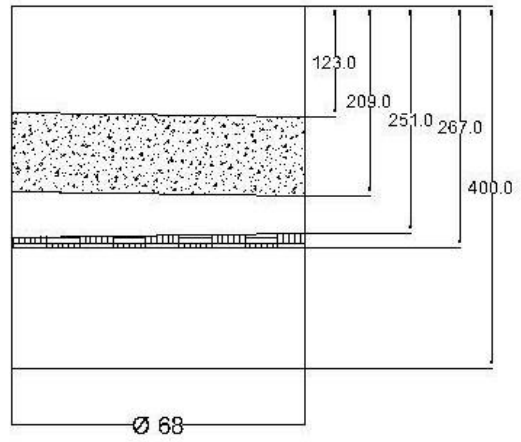
Relevamiento estratigráfico de perforaciones

AC1a1

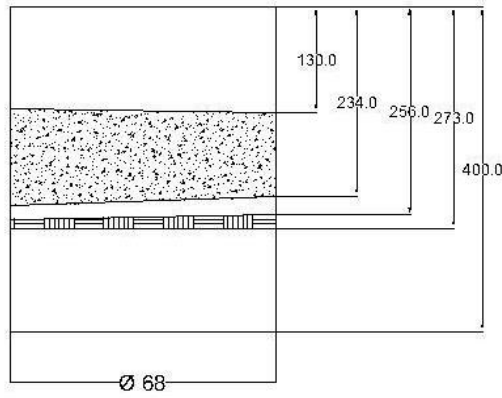


Dimensiones en mm

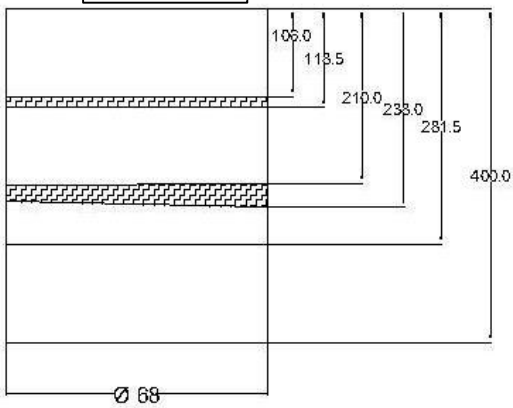
AC1a2



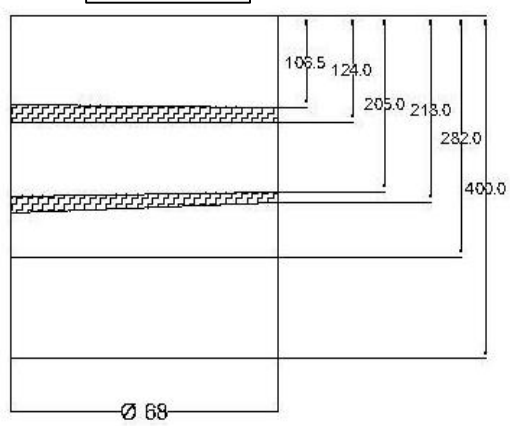
AC1a3



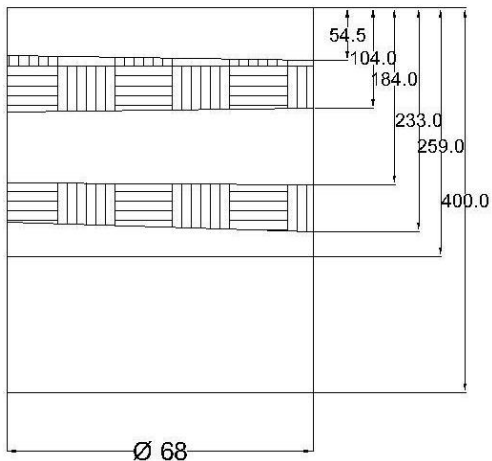
P1a1



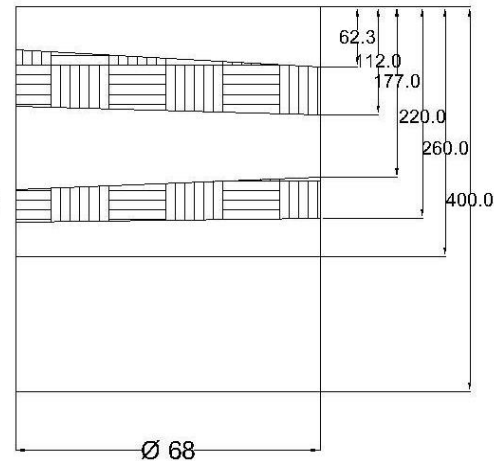
P1a2



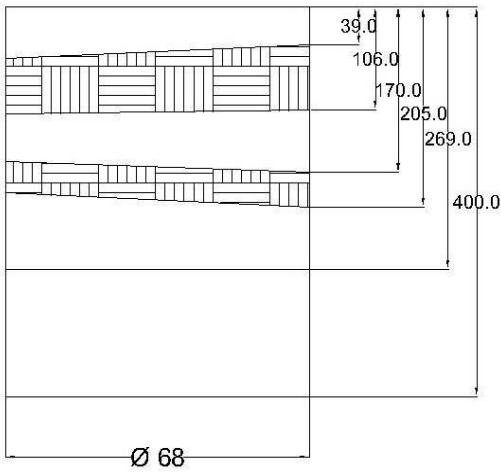
C1a1



C1a3

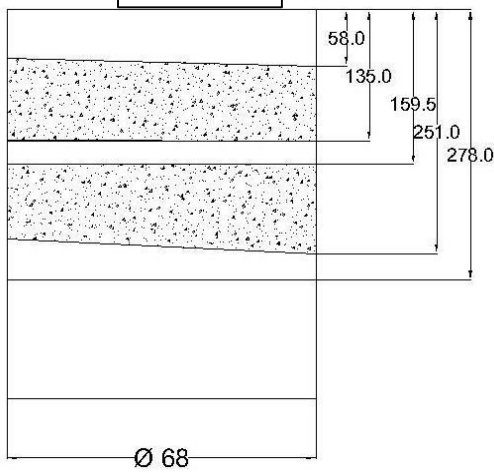


C1a4

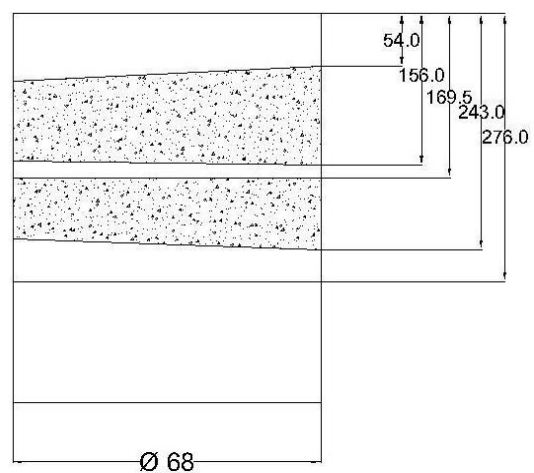


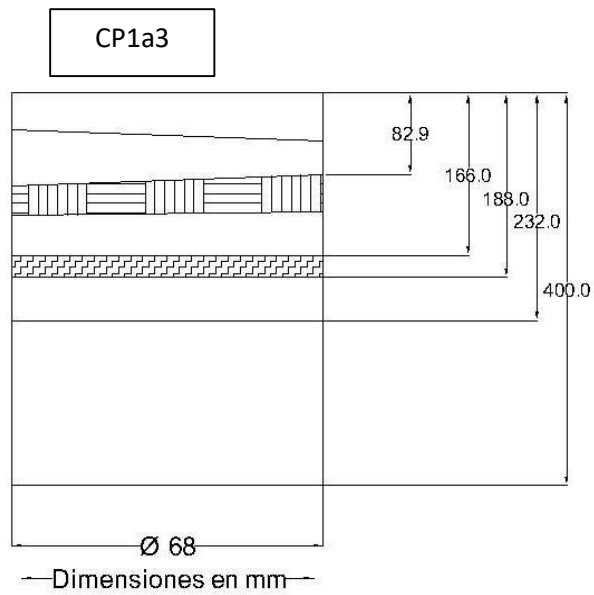
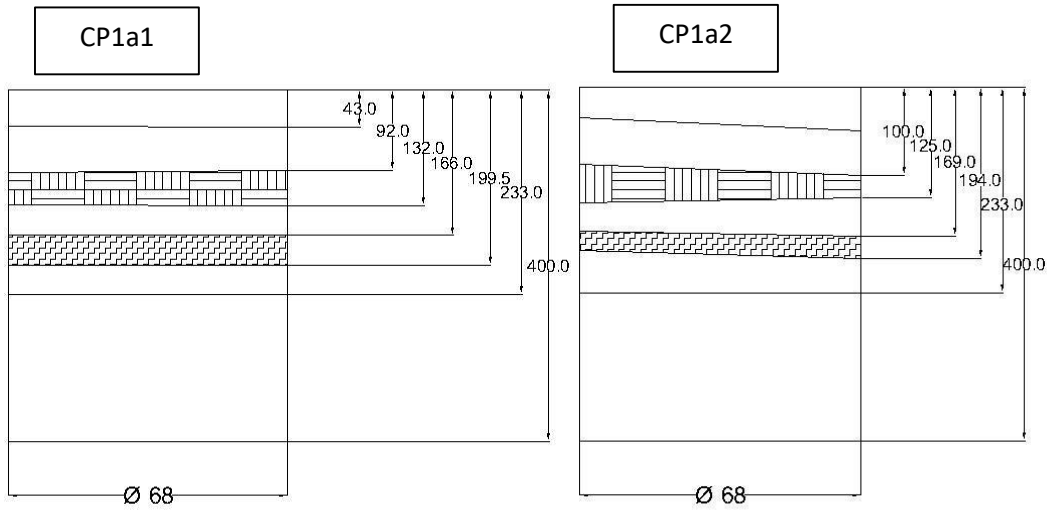
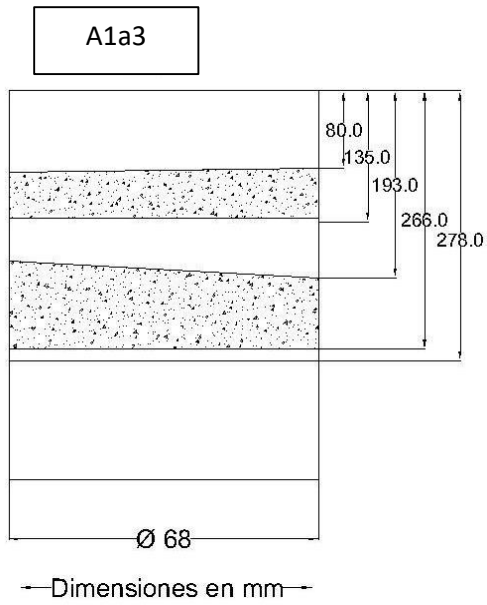
— Dimensiones en mm —

A1a1

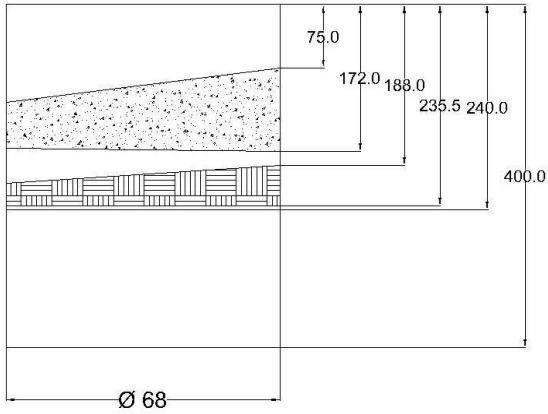


A1a2



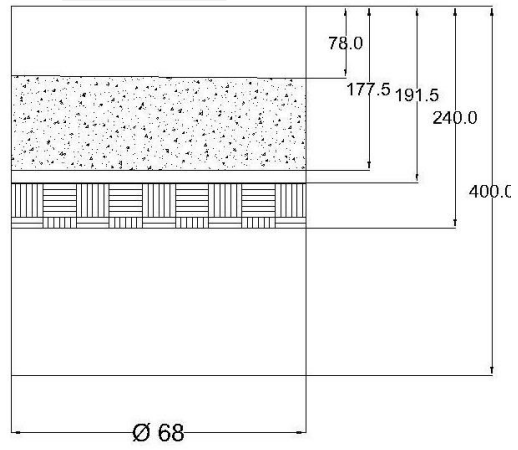


AC2a1



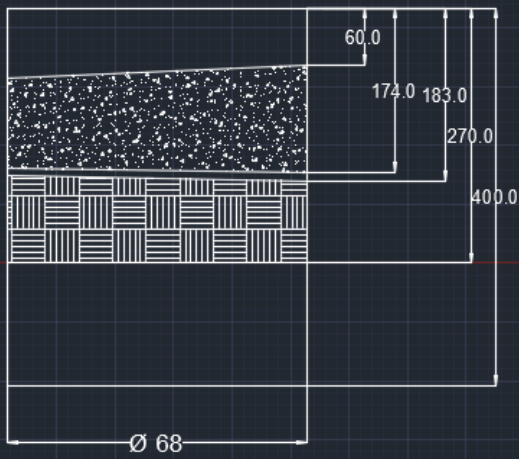
←Dimensiones en mm→

AC2a2



←Dimensiones en mm→

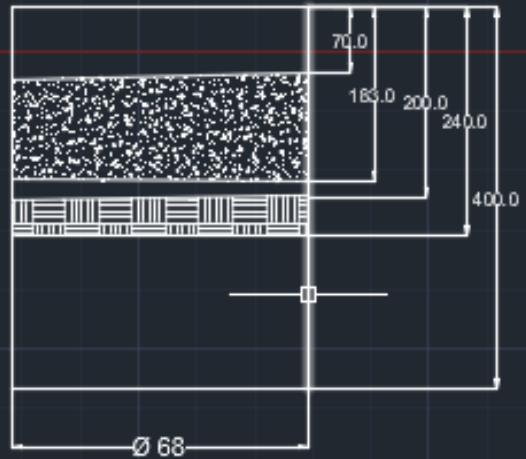
AC2a3



←Dimensiones en mm→

Se fracturo el filo al comienzo de la arenisca

AC2a3

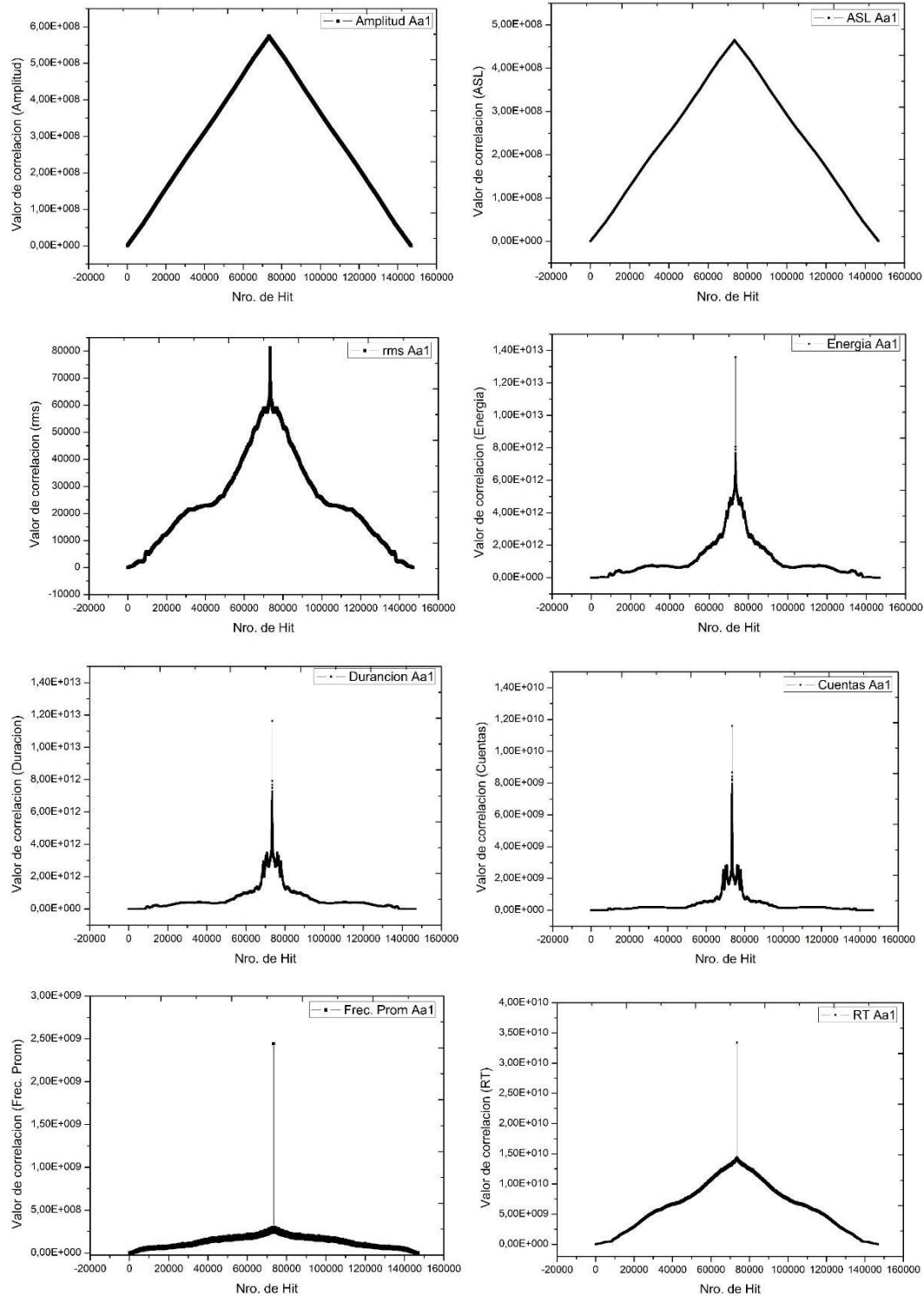


←Dimensiones en mm→

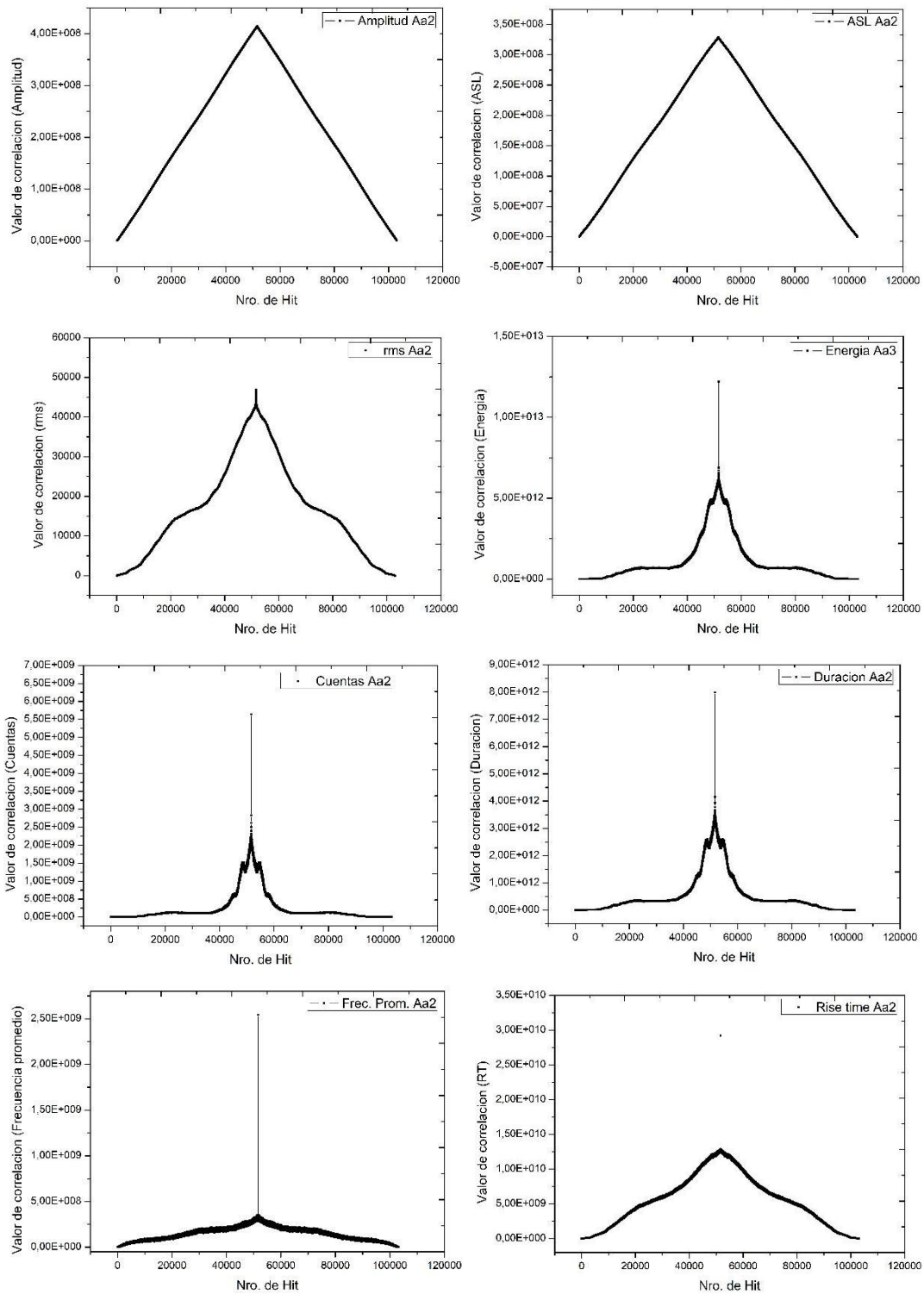
Se fracturo en 104 mm de profundidad

Figuras de autocorrelación para los parámetros amplitud, ASL, rms, energía, duración, cuentas, Frec. promedio y rise time.

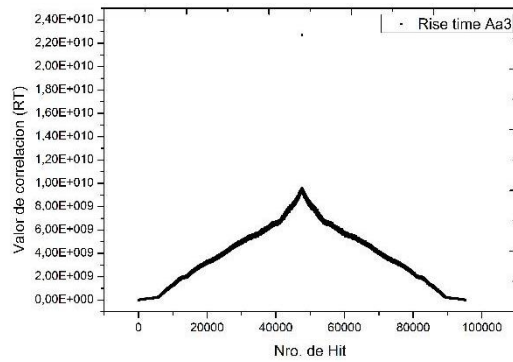
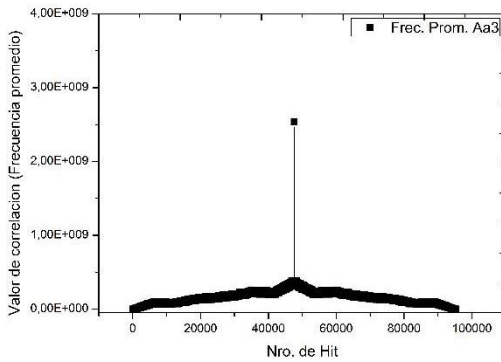
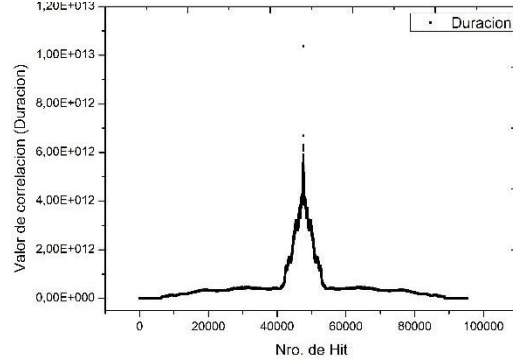
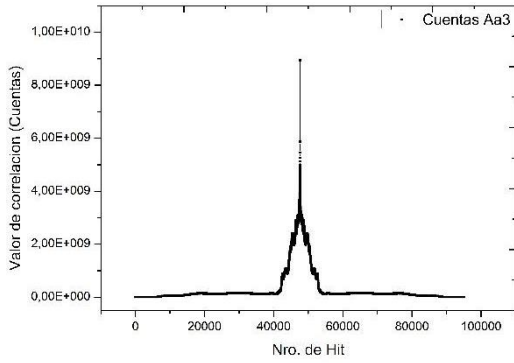
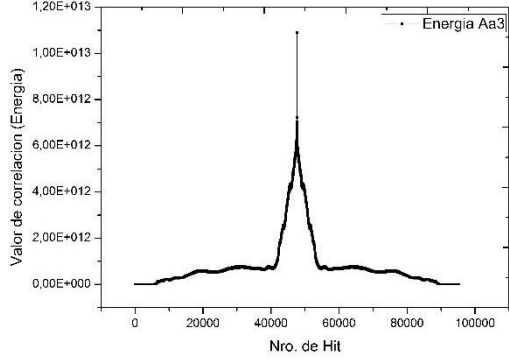
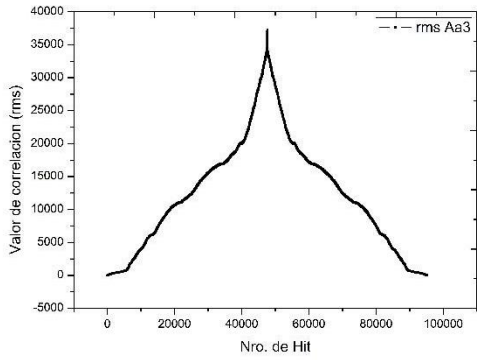
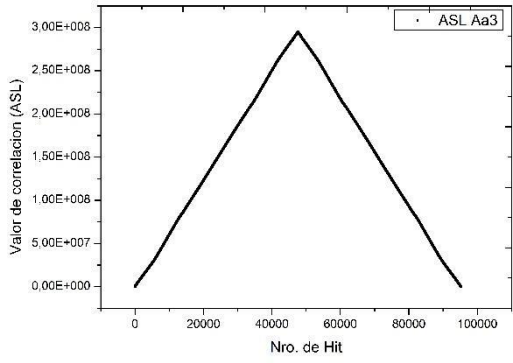
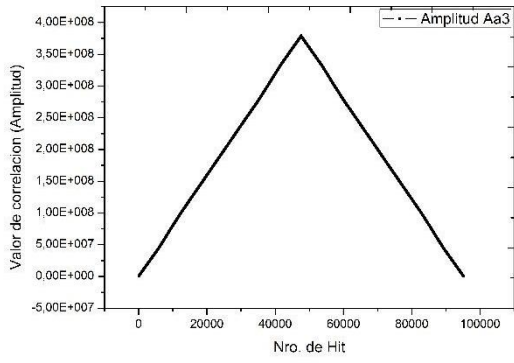
Autocorrelación de ensayo Aa1



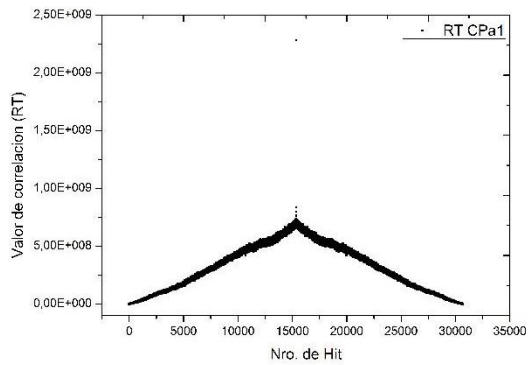
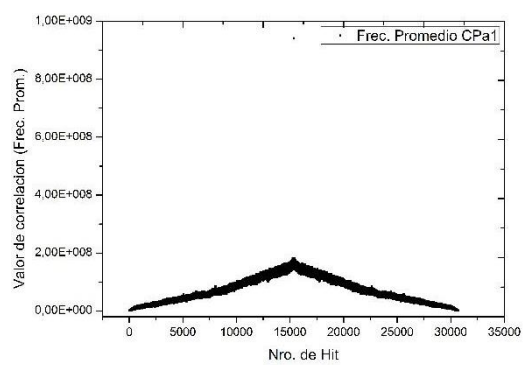
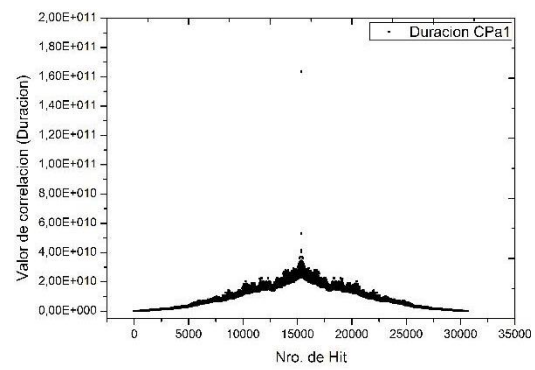
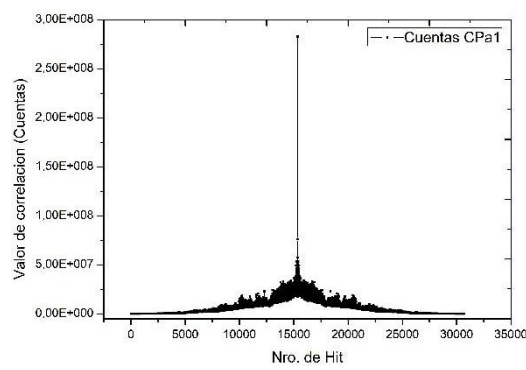
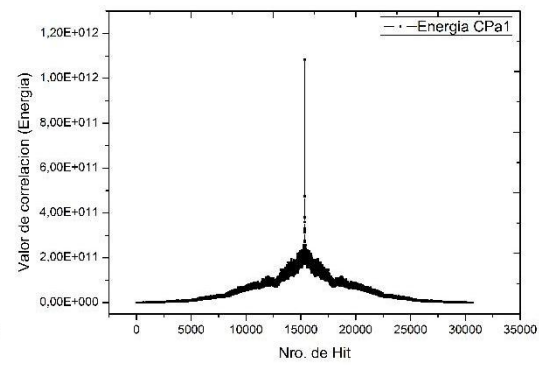
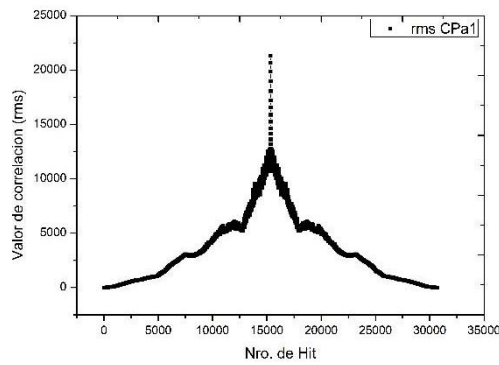
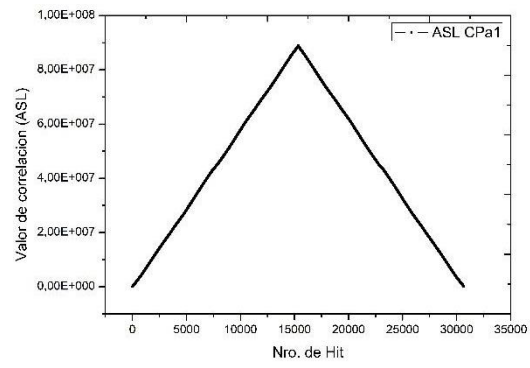
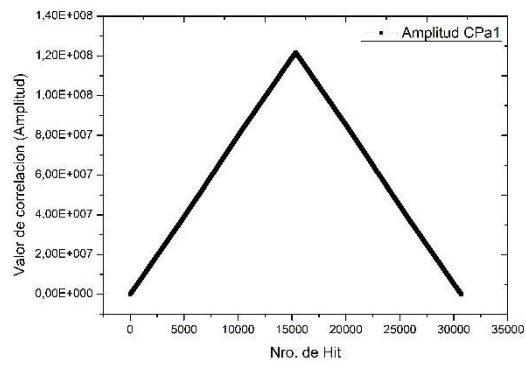
Autocorrelación de ensayo Aa2



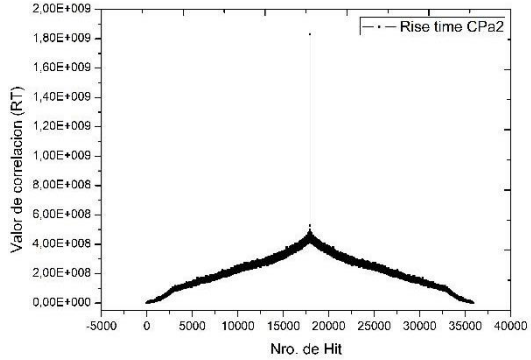
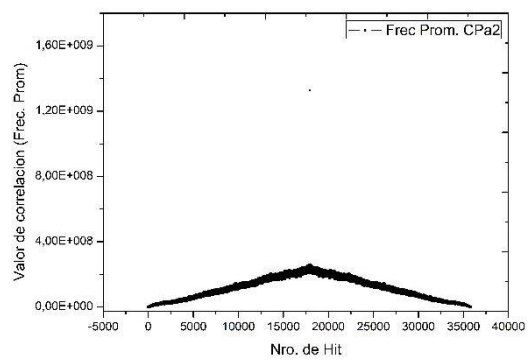
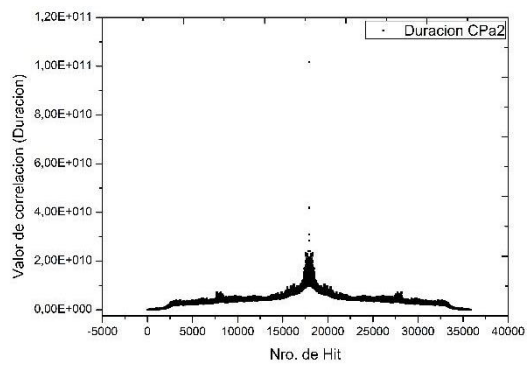
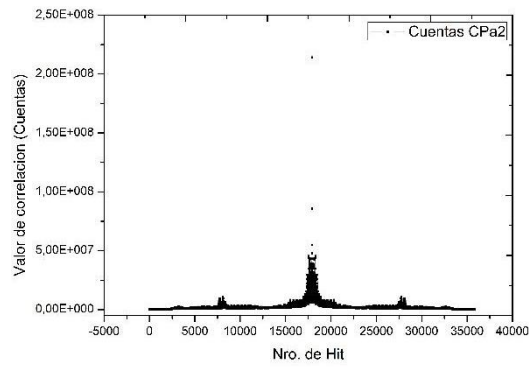
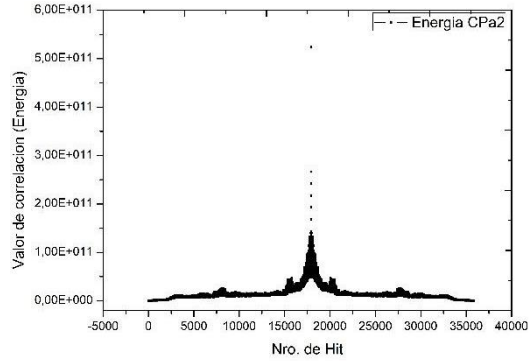
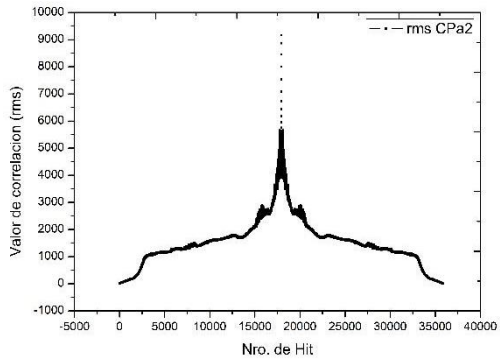
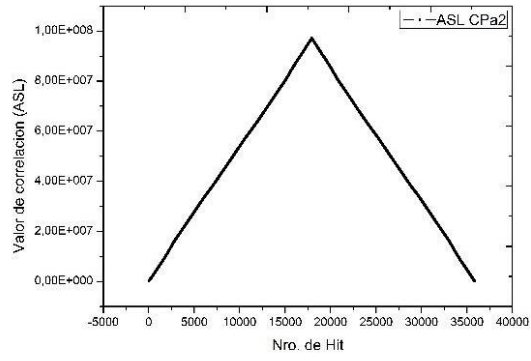
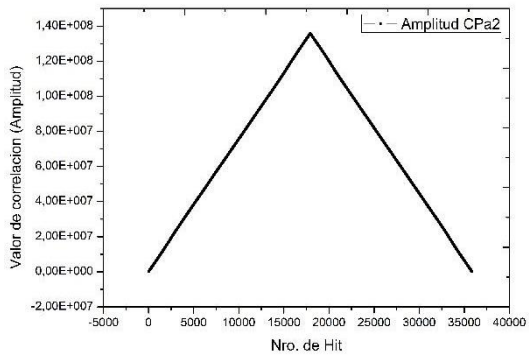
Autocorrelación de ensayo Aa3



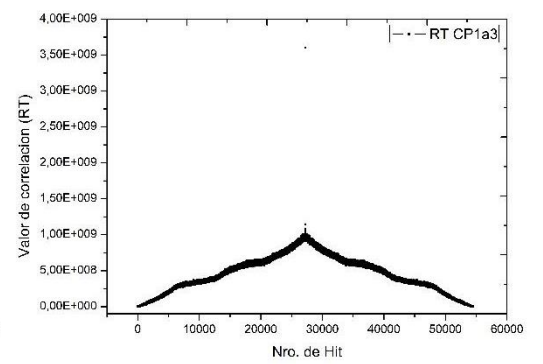
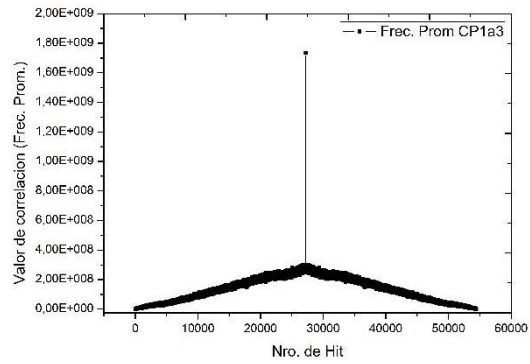
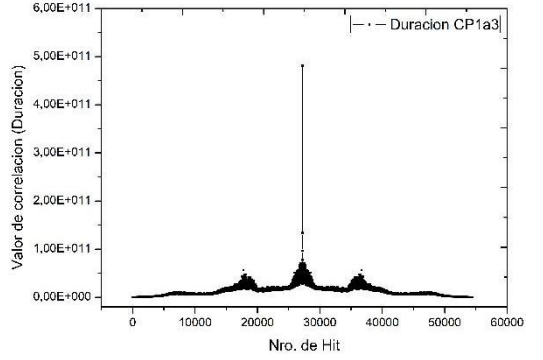
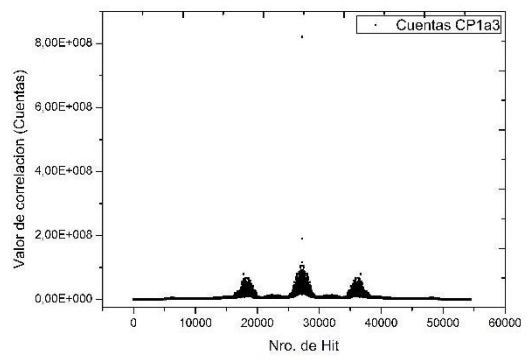
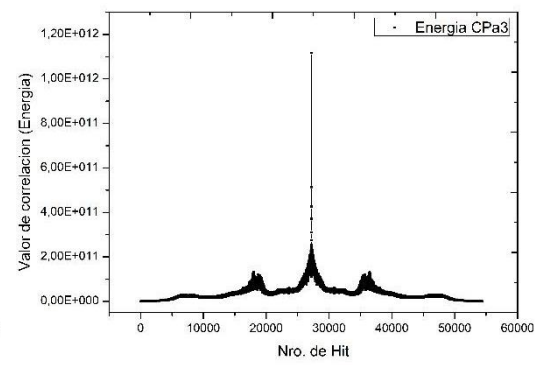
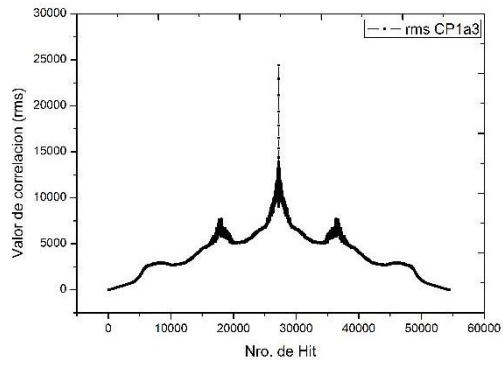
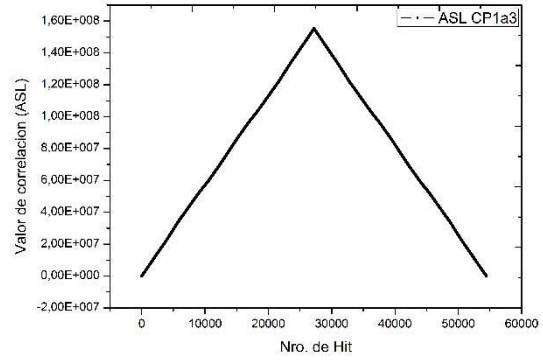
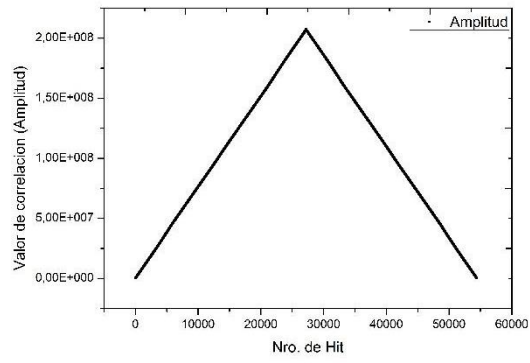
Autocorrelación de ensayo CPa1



Autocorrelación de ensayo CPa2



Autocorrelación de ensayo CPa3



Bibliografía capítulo 1

K. Du, X. Li, M. Tao, S. Wang, “Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 133 (2020) 104411.

M.C. He, J. L. Miao, J. L. Feng, “Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47 (2010) 286–298.

D. Lockner, “The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.30, No.7, pp. 88.~899, 1993 0148-9062/93

J. Zhang “Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks” *Hindawi Shock and Vibration* Volume 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/3057628>.

L. Chen, J. Zhao, and Z. Zheng “Acoustic Emission Characteristics of Compressive Deformation and Failure of Siltstone under Different Water Contents” *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4035487>

A. Voznesenskii, A. Ertuganova, S. Vil'yamov and M. Tavostin “Comparative analysis of the acoustic emission parameters recorded in carnallite under deformation and dissolution” *J Min Sci* 42, 548–555 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10913-006-0098-4>.

V. Shkurantnik, Y. Filimonov, S. Kuchurin, “Regularities of Acoustic Emission in Coal Samples under Triaxial Compression *Journal of Mining Science* 41(1):44-52, November 2005, DOI:10.1007/s10913-005-0062-8

T. Hirata, “Omori's power law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment”. *J. Geophys. Res.* 92, 6215-6221 (1987).

A. Evans, “Acoustic emission sources in brittle solids. In *Fundamentals of Acoustic Emission*” (Edited by K. Ono), pp. 209-227. Materials Dept., UCLA, Los Angeles (1978).

Hardy, H. R. J. and Leighton F. W. (Editors) *Proceedings First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structures and Material/s*. 489 p. Trans Tech Publications, Clausthal- Zellerfeld, Germany (1977).

Mogi, K. "Magnitude frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes", *Bul. Earthquake Res. Inst.* 40,831-853 (1962).

J. Zhang "Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks" *Hindawi Shock and Vibration Volume 2018*, <https://doi.org/10.1155/2018/3057628>

M. Ohnaka and K. Mogi, "Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure.," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 87, no. 5, pp. 3873–3884, 1982.

M. Ohnaka and K. Mogi, "Frequency Dependence of Acoustic Emission Activity in Rocks under Incremental Uniaxial Compression," *Bull Earthquake Research Institute*, vol. 56, pp. 67–89, 1981.

M. Gómez. "Fundamentos de la Emisión Acústica" (2012).

D. Blanksma. "Investigation of In-Situ Stresses in Rocks via Acoustic Emission and the Kaiser Effect". Undergraduate Theses and Senior Projects. 107. <http://commons.und.edu/senior-projects/107>

T. Yanagidani, S Ehara, O. Nishizawa, K. Knsunose and M. Terada "Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress" *J. Geophys. Res.* 90, 6840-6858 (1985).

D. Lockner, J. Byerlee, "Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress". *Bull of the Seismological Society of Amcr.* 67, 247-258 (1977).

L. Costin, "Deformation and failure" In *fracture Mechanics of Rock* (Edited by B. K. Atkinson), pp. 167-215. Academic Press, New York (1987).

M. Ashby, C. Sammis "The damage mechanics of brittle solids in compression", *Pure and Appl. Geophys.* 133,489-521 (1990).

H. Horii, S. Nemat-Nasser "Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure". *J. Geophys. Res.* 90, 3105-3125 (1985).

Hopwood, T., and McGogney, C. (1987): "Acoustic emission applications in civil engineering", *Nondestructive testing handbook*, College of Engineering University of Kentucky Lexington, Kentucky, 325-345.

J. Knill, J Franklin, A. Malonea "study of acoustic emission from stressed rock" Article in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* January 1968 DOI: 10.1016/0148-9062(68)90025-9.

H. Niitsuma, N. Chubachi, "AE monitoring of well-drilling process by using dowhole AE measurement system", *Progress in Acoustic Emission III*, The Japanese Society of NDI 1986.

H. Asanuma, H. Niitsuma, N. Nakabachi "Extraction of rock mass information by AE peak sequence analysis during well excavation" *Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol. 46, No. 1 (1990).

S. Jung, K. Prisbrey, G. Wu. "Prediction of Rock hardness and drillability using coustic Emission Hardness" *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 31, No. 5, pp. 561-567, 1994 Copyright, Elsevier Science Ltd.

M. Zborovjan, I. Leško, L. Dorčák, "Acoustic identification of rocks during drilling process" *Acta Montanistica Slovaca* Volume 8 (2003), Nro. 4.

I. Leško, P. Flegner, B. Pandula, P. Horovcak "New principles of process control in geotechnics by acoustic methods" *METABK* 46 (3) 165-168 (2007).

B. Kumar, H. Vardhan, M. Govindaraj "Estimating rock properties using sound level during drilling: field investigation" *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, Vol. 2, No. 3, 2010.

B. Kumar, H. Vardhan, M. Govindaraj "A new approach for estimation of properties of metamorphic rocks" *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, Vol. 3, No. 2, 2011.

M. Yari, R. Bagherpour, "Implementing Acoustic Frequency Analysis for Development the Novel Model of Determining Geomechanical Features of Igneous Rocks Using Rotary Drilling Device" *Geotech Geol Eng*, <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0433-3>.

D. Crosland, R. Mitra, P. Hagan, "Changes in Acoustic Emissions When Cutting Difference Rock Types" in Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds.), *Proceedings of the 2009 Coal*

Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 18-20 February 2019.

K. Wang, Y. Hu, K. Yang, M. Qin, Y. Li, G. Liu, G. Wang. "Experimental evaluation of rock disintegration detection in drilling by a new acoustic sensor method" *Journal of Petroleum Science and Engineering* 195 (2020) 107853.

X. Q. Sun, "A study of acoustic emission in drilling applications", *The 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Rock mechanics for industry (USRMS)*, A Balkema, Vail, CO, pp. 983-990, (1999).

E. Williams, P. Hagan, "Observations on the variation in acoustic emissions with changes in rock cutting conditions", Paper presented at the Coal Operators' Conference, (2006).

J. Futó, K. Kostúr, J Kacur, "Control and optimisation of rock disintegration based on acoustic background of drilling machine" *Institute of production process control, Technical University of Košice, Volume 8, number 4*, (2003).

V. Miklusova, L'. Usalova, L. Ivanicova, F. Krepelka, "Acoustic signal new feature in monitoring of rock disintegration process" *Contributions to Geophysics and Geodesy Special issue*, 2006.

H. Vardhan, G.R. Adhikari, M. Raj "Estimating rock properties using sound levels produced during drilling", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 604–612, (2009).

C. Grald, A. Eustes, G. Thonhauser, "An analysis of noise characteristics of drill bits", *Journal of energy resource technology*, 134 (2011).

M. Klaic, T. Staroveski, T. Udiljak, "Tool Wear Classification Using Decision Trees in Stone Drilling Applications". A Preliminary Study, *Procedia Engineering*, 69, 1326-1335, (2014).

P. Flegner, J. Kcur, M. Durdán, I. Lesso, M. Laciak, "Measurement and processing of vibro-acoustic signal from the process of rock disintegration by rotary drilling", *Measurement* 00 1–23, Elsevier (2014).

- M. Karakus, S. Perez “Acoustic emission analysis for rock–bit interactions in impregnated diamond core drilling”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (2014).
- S. Perez, M. Karakus, F. Pellet, “Development of a Tool Condition Monitoring System for Impregnated Diamond Bits in Rock Drilling Applications”, *Rock Mech Rock Eng.* DOI 10.1007/s00603-016-1150-6, (2016).
- M. Khoshouei, R. Bagherpour, M. H. Jalalian, M. Yari, “Investigating the acoustic signs of different rock types base on the values of acoustic signal RMS”, *MGPB, The Mining-Petroleum Engineering Bulletin* (2020), DOI: 10.17794/rgn.2020.3.3
- S. Tian, M. Sheng, Z. Li, H. Ge, G. Lil, “Acoustic Emission Characteristics of Sedimentary Rocks under High-Velocity Waterjet Impingement”. *Rock Mech Rock Eng.* (2017), DOI 10.1007/s00603-017-1252-9
- Y. Kawamura, H. Jang, D. Hettiarachchi, Y. Takarada, H. Okawa and T. Shibuya, “A Case Study of Assessing Button Bits Failure through Wavelet Transform Using Rock Drilling Induced Noise Signals” *J. Powder Metall Min* 2017, 6:1 DOI: 10.4172/2168-9806.1000162.
- M. Qin, K. Wang, K. Pan, T. Sun, Z. Liu, “Analysis of signal characteristics from rock drilling based on vibration and acoustic sensor approaches” *Applied Acoustics* 140, 275–282 (2018).
- Y. Xiao, C. Hurich, J. Molgaard, S.D. Butt, “Investigation of Active Vibration Drilling Using Acoustic Emissions and Cuttings Size Analysis”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2018), doi: 10.1016/j.jrmge.2017.10.002.
- S. Liu, P. Shi, Z. Wan, S. Lu, J Lv, y F. Meng. “Interrelationships between Acoustic Emission and Cutting Force in Rock Cutting”, *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, *Hindawi Geofluids* Article ID 6694532, 12 pages, (2021), <https://doi.org/10.1155/2021/6694532>
- R. K. Miller, E. K. Hill, P. O. Moore. *Nondestructive Testing Handbook*. “Acoustic emission testing” Volume 6 (2005).
- M.P. Gómez, A.M. Hey, J.E. Ruzzante, C.E. D’Attellis, “Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission”, *Physics Procedia*, Vol. 3 (2010), p. 819–825.

D.E. Dimla Sr., P.M. Lister, "On -Line metal cutting tool condition monitoring. II: Tool-State classification using multi-layer perceptron neural networks. *International Journal of Machine and Manufacture*, 40, p. 769-781(2000).

E. Dimla Sr., "Application of perceptron neural networks to tool-state classification in metal-cutting operation", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12, p. 471-477 (1999).

E. Dimla Jr, P Lister, N. Leighton, "Automatic tool state identification in metal turning operation usin MLP neural networks and multivariate process parameters", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 38, No.4, p. 343-352 (1998).

M. Balazinski, E. Czogala, K. Jemialniak, J. Leski. "Tool condition monitoring using artificial intelligence methods". *Engineering applications of artificial Intelligence* 15, p. 73-80 (2002).

T. Kohonen."Self -Organizing Maps". Third Edition, Springer (2001).

G. Barrera, G. Carreón, M Ruiz, "Control de Calidad de Piezas Cerámicas por Medio de Análisis de Vibraciones y Redes Neuronales Artificiales" *Computación y Sistemas* Vol. 8 Núm. 3, pp. 187-195 © 2005, CIC-IPN, ISSN 1405-5546.

J. Zupan, J. Gasteiger, "Neural networks for chemists. An introduction", VCH, Weinheim, 1993, ISBN 3-527-28603-9.

N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, "Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites" *NDT&E International*, Elsevier 38 (2005).

C. Yen, M. Lu, J. Chen. "Applying the Self-Organization feature map algorithm to AE-based tool wear monitoring in micro-cutting", *Mechanical systems and signal processing*, 34, 353-366 (2013).

Bibliografía capítulo 2

Y. Hatamura, K. Chijiwa, "Analyses of the mechanism of soil cutting", 1st report. *Bulletin of JSME*, vol. 18, no. 120, 619-626, (1975).

- Y. Hatamura, K. Chijiwa “Analyses of the mechanism of soil cutting”, 2nd report. Bulletin of the JSME, vol. 19, no. 131., 555-563, (1976).
- Y. Hatamura, K. Chijiwa, “Analyses of the mechanism of soil cutting”, 3rd report. Bulletin of the JSME, vol. 19, no. 139., 1376-1384(1976).
- Y. Hatamura, K. Chijiwa, “Analyses of the mechanism of soil cutting”, 4th report. Bulletin of the JSME, vol. 20, no. 139., 130-137, (1977).
- Y. Hatamura, K. Chijiwa, “Analyses of the mechanism of soil cutting”, 5th report. Bulletin of the JSME, vol. 20, no. 141., 388-395, (1977).
- S. Miedema, “The Delft Sand, Clay & Rock Cutting Model”, IOS Press BV, (2014).
- P. Verhoef, “Wear of rock cutting tools: Implications for site investigation of rock dredging projects”. Delft, Netherlands: Balkema Rotterdam. (1997).
- J. Hudson, J. Harrison, “Engineering a rock mechanics, an introduction to the principles”, Pergamon, Elsevier Science (1997).
- E. Hoek, C.D. Martin. “Fracture initiation and propagation in intact rock - A review” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6, (2014).
- K. Mogi, “Pressure Dependence of Rock Strength and Transition from Brittle Fracture to Ductile Flow”, Bulletin of earthquake research institute, Vol. 44, 1966.
- S. Peng, J. Zhang,” Engineering Geology for Underground Rocks”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- W. Vlasblom “Lecture wb3413/oe4626 dredging processes, cutting of rock”, 2007.
- C. Fairhurst, “On the validity of the Brazilian test for brittle materials”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 1., 535-546, (1964).
- Y. Nishimatsu, “The mechanics of rock cutting”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, vol. 9, 261-270, (1972).
- M. Merchant, “Basic mechanics of the metal cutting process” Journal of Applied

Mechanics, vol. 11A., 168-175, (1944).

I. Evans, “The force required to cut coal with blunt wedges” Mining Research Establishment Isleworth, (1964).

A. Bourgoyne Jr., K. Millhenim, M. Chenevert, F. Young Jr. “Applied drilling engineering”, Second Printing, Society of petroleum engineer, Richardson, TX, (1991).

J. Ramos, “Estado del arte de brocas de perforación” Ingeniería de Petróleos, Revista de investigación Volumen 4, No. 2, (2011).

Smith Bits Product Catalog, Schlumberger (2016)

Schlumberger, “Drilling and measurements”, Sugar Land learning center, Drill bit Self Learning Package (2001).

Sandvick Coromant Academy, “Metal cutting technology”, Training Handbook (2017).

R. Teale, “The concept of specific energy in rock drilling” Int. J. Rock Mech. Mining ScL Vol. 2, pp. 57-73. Pergamon Press (1965).

V. Rajabov, S. Miska, L. Mortimer, M. Yu, E. Ozbayoglu, “The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures”, IADC/SPE Drilling conference and exhibition, (2012).

D. Antoljak; D. Kuhinek; T. Korman; T. Kujundži “Dependency of Specific Energy of Rock Cutting on Specific Drilling Energy” The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin (2018), DOI: 10.17794/rgn.2018.3.3.

National Audubon Society, “Field guide to rocks and minerals”, Chanticleer Press (1979).

J. Erickson Rock “Formations and unusual geologic structures Exploring the Earth’s Surface”, Revised Edition Copyright © 2001.

Bibliografía Capítulo 3

Training Handbook, Metal Cutting Technology. AB Sandvik Coromant 2017.

- S. Panthee, M. Khanal and T. N. Singh, “Geotechnical and geomechanical characteristics of the rocks along tunnel of Kulekhani III Hydro-electric Project”, Journal of Nepal Geological Society, Vol. 50, pp 39-50, 2016.
- R. G. Budynas, J. Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley”, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, (2008).
- R. Hibbeler, “Mecánica de materiales”, Pearson Education, Preantice hall, Inc. 2011.
- W. Pilkey, D. Pilkey, “Stress concentration factors” John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- S. R. Ravishankar, C. R. L. Murthy, “Characteristics of AE signals obtained during drilling composite laminates”. NDT&E International. Vol 33, (2000), 341-348.
- B. Mascaro, V. Gibiat, M. Bernadou, Y. Esquerre, “Acoustic Emission of the drilling of Carbon/Epoxy Composites” Forum Acusticum (2005).
- C. E. Everson, S H. Cheraghi. “The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring”. Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 39 (1999), 371-387.
- D. Dornfeld and E. Kannatey Asibu, “Acoustic emission during ortogonal metal cutting”, Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, 285-296 (1980). .
- E. Kannatey-Asibu, Jr., D. Dornfeld, “Quantitative relationships from orthogonal metal cutting” Transactions of the ASME, Vol. 103 (1981).
- D. Saini, Y Park, “A quantitative model of acoustic emission in rtogonal cutting operations”, Journal of materials processing technology, Vol. 58, 343-350 (1996).
- I. Grabec, P Leskovar, “Acoustic emission of a cutting process”, Ultrasonics (1977).
- K. Jemielniak, O. Otman, “Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals” Journal of Materials Processing Technology. Vol. 76, (1998), 192-197.
- Héctor A. Leanza y Carlos A. Hugo, “Hoja Geológica 3969-I”, Zapala, Provincia del Neuquén, Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos minerales, Boletín N° 275, Buenos Aires – 2001.
- American Standard Testing Materials, “Standard Terminology for Nondestructive Examinations”- ASTM E1316, (2005).