

# Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería de Minas



## “Investigaciones del Proceso de Corte de Areniscas con Picas Desgastadas”

INFORME DE INGENIERIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO DE MINAS**

**JOSE RAIMUNDO ALMENARA CHAU**

PROMOCION: 1984-2

LIMA - 1993

# Indice

<b>I</b>	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>2</b>
<b>II</b>	<b>Informe Profesional</b>	<b>4</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Modelo de Corte de Roca</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Cortador Perfectamente Afilado</b>	
<b>2.2</b>	<b>Cortador Desgastado . . .</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Condiciones de los Ensayos</b>	<b>9</b>
<b>4.</b>	<b>Determinación de la Línea de Fricción</b>	<b>10</b>
<b>5.</b>	<b>Determinación del Punto de Corte</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>Fuerzas de Rozamiento en el Contacto</b>	<b>16</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>17</b>
	<b>Referencias</b>	<b>19</b>
<b>A</b>	<b>Certificados</b>	<b>20</b>

# Parte I

## Curriculum Vitae

**JOSE RAIMUNDO ALMENARA CHAU**

### **EDUCACION**

1. IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND MEDICINE  
UNIVERSIDAD DE LONDRES (Gran Bretaña)  
Doctorado en Mecánica de Rocas (1988-1992)
2. IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND MEDICINE  
UNIVERSIDAD DE LONDRES (Gran Bretaña)  
Maestría en Mecánica de Rocas (1987-1988)
3. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
Ingeniería de Minas (1982-1984)
4. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
Ingeniería de Minas (1976-1981)

### **GRADOS Y TITULOS**

1. Doctor en Mecánica de Rocas
2. Magister en Mecánica de Rocas
3. Bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería de Minas

### **CARGOS PROFESIONALES**

1. S.V.S. INGENIEROS S.A. (1992 a la fecha)  
Cargo: Ingeniero de Diseño
2. SCHLUMBERGER CAMBRIDGE RESEARCH (Cambridge, Inglaterra) (1991-1992)  
Cargo: Asesor
3. ROCK ENGINEERING CONSULTANTS (Londres, Inglaterra) (1991)  
Cargo: Ingeniero de Campo
4. CIA. MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A. MINA SAN VICENTE (1986-1987)  
Cargo: Asistente de Capitán de Minas (Servicios).

5. CIA. MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A. MINA SAN VICENTE (1985-1986)  
Cargo: Jefe de Guardia
6. CIA. MINERA HUARON S.A. MINA HUARON (1983)  
Cargo: Practicante
7. CUSA COMERCIAL S.C.R.L. (1981-1982)  
Cargo: Representante de Ventas
8. INGENIEROS EJECUTORES S.A. (1980) Segundo Pulmón Hidroeléctrica Pablo Bonner  
Cargo: Practicante.

## **BECAS**

- 1990-1991 **REMIT** (Rock Engineering Mechanisms Information Technology). Otorgada por Rock Engineering Consultants.
- 1990-1991 **WILLIAM SELKIRK** Otorgada por Imperial College, Londres, Inglaterra.
- 1989-1991 **ORS** (Overseas Research Scholarship). Otorgada por el Gobierno Británico, Londres, Inglaterra.
- 1987-1988 **CONCEJO BRITANICO** Otorgada en Lima para estudios de Maestría en Mecánica de Rocas en Londres.
- 1985 **ATLAS COPCO** Otorgada por Atlas Copco Peruana para viajes de visitas técnicas en Europa.

## **PUBLICACIONES**

**ALMENARA, R y DETOURNAY, E.** , "Cutting experiments in sandstones with blunt PDC cutters", publicado en la Conferencia EUROCK'92, Setiembre 1993, Chester, Inglaterra.

## **IDIOMAS**

Castellano, Inglés y Portugués

## Parte II

# Investigaciones del Proceso de Corte de Areniscas con Picas Desgastadas

## 1. Introducción

Comprender el mecanismo de corte de roca a sido siempre un aspecto de gran interés para la industria minera y petrolera, ya que se podrían mejorar las eficiencias en la perforación. Generalmente, las investigaciones en este campo han sido dirigidas hacia el estudio de herramientas cortadoras afiladas (para un resumen en este campo véase por ejemplo[1]); el mecanismo de corte con herramientas desgastadas no ha sido estudiado con detalle suficiente, a excepción de los estudios realizados por Glowka[2], quien condujo investigaciones experimentales sobre la influencia de la superficie desgastada, bajo una pica de Diamante Policristalino Compacto (PDC), en las fuerzas en la pica. Aquí se presenta más trabajo experimental con el propósito de verificar un nuevo modelo[3].

Este trabajo describe los resultados de los ensayos de corte realizados en Imperial College, Londres, durante los años 1988 y 1992, en tres diferentes areniscas (Crosland Hill, Forest of Dean y Red Vosges), utilizando dos picas desgastadas de PDC.

Estos experimentos fueron diseñados e interpretados dentro del marco del modelo de corte de roca recientemente propuesto por Detournay y Defourny [3]. Este modelo esta basado en la hipótesis fundamental que el corte de roca es realmente una combinación de dos procesos, corte "puro" y fricción bajo el cortador o pica. Diversos objetivos fueron tomados en cuenta al realizar estos ensayos:

- probar la predicción teórica de que existe una relación lineal entre la energía específica  $\mathcal{E}$  y la resistencia a la perforación  $\mathcal{S}$  (definidas respectivamente como, la componente horizontal y vertical de la fuerza de corte dividida por el área de la sección transversal del surco trazado por la herramienta);
- probar la conjetura de que el ángulo de fricción en el contacto entre la superficie desgastada de la herramienta y la roca (deducido a partir de la pendiente de la línea de fricción en el diagrama  $\mathcal{E}-\mathcal{S}$ ), realmente refleja el ángulo de fricción interna de la roca (medido de manera convencional en ensayos triaxiales);
- determinar la energía específica intrínseca  $\epsilon$  (un parámetro que describe el proceso de corte puro) y la resistencia del contacto  $\sigma$  (la resistencia límite que puede ser transmitida en este contacto, en dirección normal a la superficie

en contacto) para cada una de las rocas ensayadas, y analizar las posibles relaciones entre estos dos parámetros y las características geomecánicas de estas rocas.

Este trabajo presenta primeramente las relaciones básicas del modelo de corte de roca. Los resultados del programa experimental son resumidos. Luego los parámetros del modelo de corte de roca son determinados.

## 2. Modelo de Corte de Roca

El modelo de respuesta al corte [3] se basa en el supuesto de que el corte de roca es realmente una combinación de dos procesos, uno de corte “puro” y otro de fricción en el contacto entre la superficie desgastada y la roca. Las ecuaciones básicas del modelo de respuesta al corte de roca se resumen a continuación.

### 2.1 Cortador Perfectamente Afilado

Considerese primero un cortador perfectamente afilado que crea un surco de sección transversal constante de área  $A$ , cuando se mueve a través de una superficie horizontal de roca bajo un control puramente cinemático (profundidad de corte constante). Para tal cortador, una fuerza es transmitida por la cara de corte de la herramienta a la roca. Sea  $\vec{F}^c$  esta fuerza, y  $F_s^c$  y  $F_n^c$  las componentes de las fuerzas paralela y normal a la superficie de la roca respectivamente, ver Fig. 1. Motivados por consideraciones de similaridad, se asume que las fuerzas en la dirección horizontal y vertical (promediadas en una distancia larga comparada a la profundidad de corte) son proporcionales al área de la sección transversal,  $A$ :

$$F_s^c = \epsilon A \quad (1)$$

$$F_n^c = \zeta \epsilon A \quad (2)$$

donde la constante  $\epsilon$  es la energía específica intrínseca de la roca, y  $\zeta$  es la razón de la componente vertical a la horizontal de la fuerza actuando en el plano de corte. Si la roca fallada fluye hacia arriba a lo largo del plano de corte, no existe componente transversal de la fuerza de corte, y el ratio  $\zeta$  toma un valor particular máximo  $\zeta_*$

$$\zeta_* = \tan(\theta + \psi) \quad (3)$$

donde  $\psi$  denota el ángulo de fricción de la interface y  $\theta$  el ángulo de inclinación del plano de corte (positivo cuando se inclina hacia adelante).

### 2.2 Cortador Desgastado

**Descomposición de Fuerzas.** Para una herramienta de corte desgastada, el modelo se extiende asumiendo que dos vectores fuerza  $\vec{F}^c$  y  $\vec{F}^f$  actúan en el

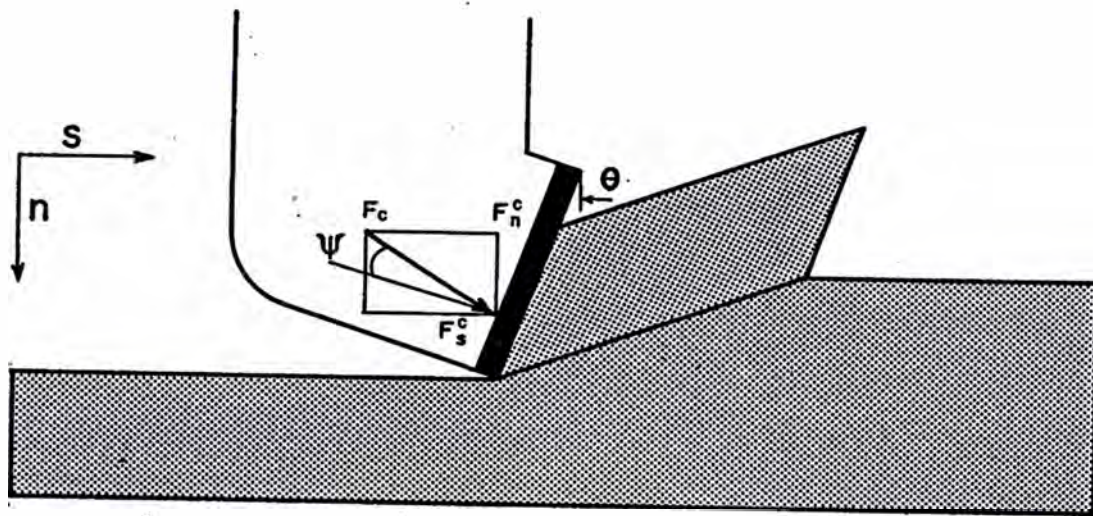


Figura 1: Fuerzas actuando en un cortador afilado.

cortador durante el corte. El primer vector fuerza,  $\vec{F}^c$  es transmitido por el plano de corte, mientras que el segundo,  $\vec{F}^f$ , actúa a través de la superficie desgastada de la herramienta, ver Fig. 2. Este segundo vector fuerza puede descomponerse en una componente horizontal y otra normal  $F_s^f$  y  $F_n^f$  que están relacionadas por la ley de rozamiento:

$$F_s^f = \mu F_n^f \quad (4)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción.

De estas ecuaciones básicas, una relación lineal entre  $F_s$ ,  $F_n$ , y  $A$  puede definirse:

$$F_s = (1 - \mu\zeta)\epsilon A + \mu F_n \quad (5)$$

**Diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$**  Dos cantidades son ahora introducidas: la energía específica  $\mathcal{E}$  definida como,

$$\mathcal{E} = F_s/A \quad (6)$$

y la resistencia de perforación  $\mathcal{S}$

$$\mathcal{S} = F_n/A \quad (7)$$

Notese que  $\mathcal{E}$  es la energía consumida para mover el cortador, indiferentemente del estado del cortador (afilado o desgastado), mientras que  $\epsilon$  tiene solo significado



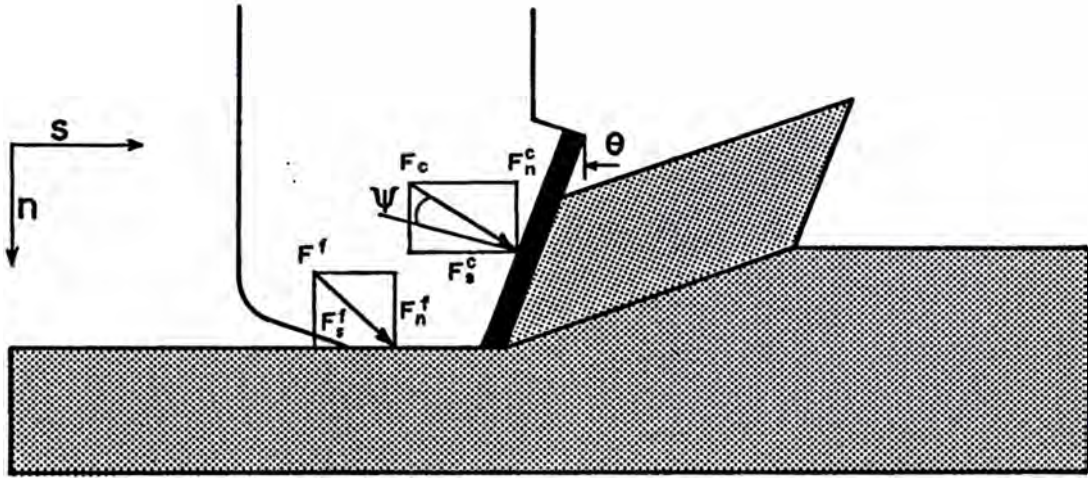


Figura 2: Fuerzas actuando en un cortador desgastado.

para la acción de corte puro. Esto significa que para un cortador perfectamente afilado:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \epsilon \\ \mathcal{S} &= \zeta \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

Para un cortador desgastado, existe una relación lineal entre  $\mathcal{E}$  y  $\mathcal{S}$ , que se obtiene al dividir la Eq. (5) por A:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_o + \mu \mathcal{S} \quad (9)$$

donde la cantidad  $\mathcal{E}_o$  está definida por:

$$\mathcal{E}_o = (1 - \mu \zeta) \epsilon \quad (10)$$

Realmente, la Eq. (9) representa una restricción a la respuesta del cortador. Tres parámetros aparecen en esta ecuación: dos para la acción de corte, y uno para el proceso friccionante en el contacto,  $\mu$ . Análisis de ensayos de laboratorio previos han llevado a sugerir [3] que  $\mu$  realmente refleja el ángulo de fricción interno  $\phi$  de la roca.

La Eq. (9) se puede representar gráficamente en un diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$  (ver Fig. 3) por una línea de pendiente  $\mu$ , interceptando al eje  $\mathcal{E}$  en  $\mathcal{E}_o$ . Esta línea es definida como la línea de fricción. Todos las respuestas admisibles del cortador caerán en la línea de fricción por encima y a la derecha del punto de corte. El punto de corte es el punto de intersección de la línea de fricción con la línea de corte, que es la recta que pasa por el origen y tiene una pendiente de  $\zeta^{-1}$ .



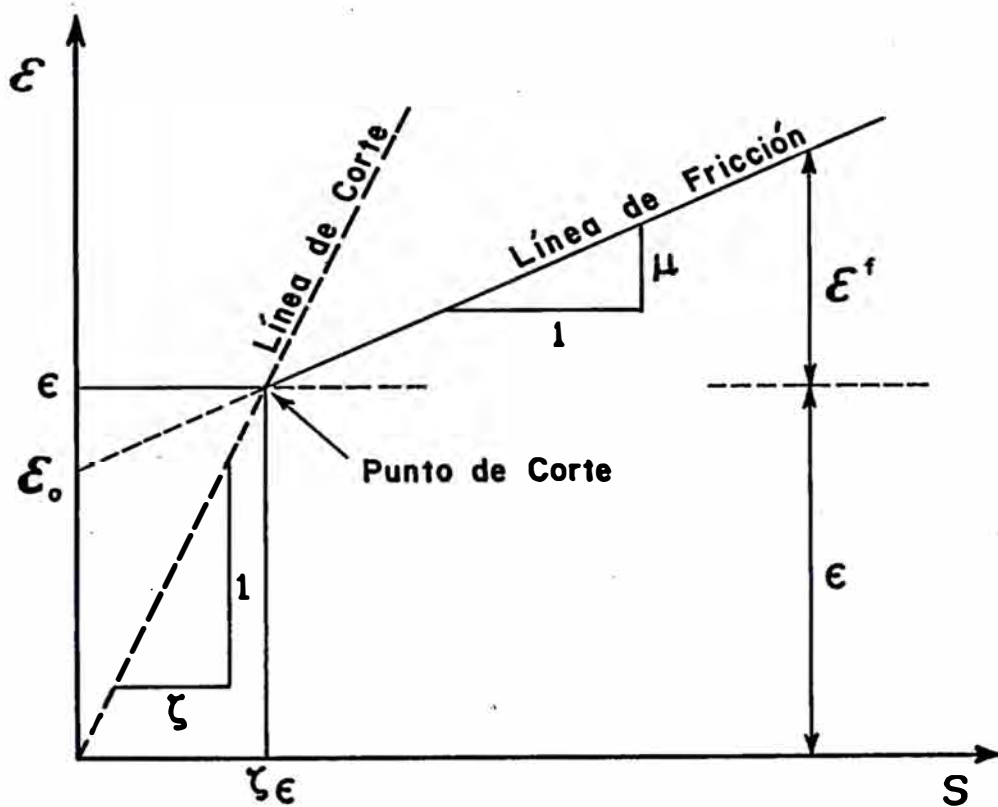


Figura 3: Diagrama  $E-S$

**Fuerzas de Contacto.** Nada se ha dicho hasta ahora sobre la magnitud de las fuerzas de fricción en el contacto. Se espera que exista un límite superior a estas fuerzas debido a que la roca falla debajo de la superficie de contacto del desgaste.

Hay diferentes maneras (cada una requiere una presunción diferente) para estimar esta fuerza de contacto. Una manera sería remover la contribución de la acción de corte de la fuerza en el cortador; esto asume que ambos parámetros de corte  $\epsilon$  y  $\zeta$  son conocidos:

$$\begin{aligned} F_s^f &= F_s - \epsilon A \\ F_n^f &= F_n - \zeta \epsilon A \end{aligned} \quad (11)$$

Otra forma sería descomponer la fuerza de corte directamente en sus componentes de corte y fricción en el contacto, asumiendo que se conocen  $\zeta$  y  $\mu$ :

$$\begin{aligned} F_s^c &= \frac{F_s - \mu F_n}{1 - \mu \zeta} \\ F_n^f &= \frac{F_n - \zeta F_s}{1 - \mu \zeta} \end{aligned} \quad (12)$$

Entonces,  $F_n^c = \zeta F_s^c$  y  $F_s^f = \mu F_n^f$ .

### 3. Condiciones de los Ensayos

El programa experimental consistió en llevar a cabo una serie de ensayos de corte en tres areniscas diferentes con dos cortadores de PDC desgastados. Para cada combinación tipo de roca/cortador, dos series de seis ensayos a diferentes profundidades de corte fueron realizados.

Las tres areniscas que fueron seleccionadas para estos experimentos son: Crosland Hill Millstone Grit Hard York Stone, Forest of Dean Pennant y Arenisca Roja de Vosges. En el presente trabajo serán llamadas Crosland Hill, Pennant y Vosges respectivamente. Estas rocas fueron seleccionadas debido a que se disponía de ensayos de corte con herramientas afiladas (Cortador 3) realizados previamente en Imperial College por Chaput[4] bajo las mismas condiciones de ensayos. Un resumen de los resultados de los ensayos de compresión triaxial elaborados en Imperial College, se presentan en la Cuadro 1.

Los ensayos de corte fueron realizados en una cepilladora instrumentada. La velocidad de corte durante los ensayos era aproximadamente constante e igual a 14 cm/s. Las fuerzas horizontal y normal fueron registradas en una computadora AT compatible via un convertidor analógico/digital de 12 bits. Los resultados de las fuerzas de corte fueron promediadas a lo largo de todo el ensayo que variaba entre 30 y 37.5 cm. La profundidad de corte, medida a partir del borde de corte de la superficie desgastada, variaba entre 0.25 y 1.5 mm, en incrementos de 0.25 mm. Dos cortadores de PDC con un ángulo de inclinación de 15° hacia adelante y diferente área de desgaste maquinadas fueron empleados para estos ensayos. Previo

Roca	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$c$ (MPa)
Crosland Hill	32	35
Pennant	29	27
Vosges	34	17

Cuadro 1: Resultados de Ensayos Triaxiales.

Cortador	Radio del Cortador (mm)	Superficie desgastada (mm <sup>2</sup> )	Filo de Corte (mm)
1	6.65	26	7.71
2	6.65	17	6.34
3	6.65	(0)	(0)

Cuadro 2: Características de los cortadores.

a los ensayos, las áreas del desgaste fueron medidas siguiendo la técnica utilizada por Glowka[2], que consiste en presionar la herramienta contra una superficie de roca poniendo un papel carbón y un papel milimetrado entre ambas superficies para dejar impresa la superficie del área de contacto. Las características más saltantes de la geometría de los cortadores se presentan en el Cuadro 2. Sin embargo, la superficie de contacto del desgaste iba evolucionando de ensayo en ensayo; para poder llevar un control sobre esta evolución, se realizaron ensayos de referencia a 1mm de profundidad después de cada serie de ensayos.

#### 4. Determinación de la Línea de Fricción

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran el diagrama  $\mathcal{E}-\mathcal{S}$  para los ensayos de corte para cada una de las rocas ensayadas indicándose el cortador utilizado. Estos gráficos sustentan la afirmación de que existe una relación lineal entre la energía específica  $\mathcal{E}$  y la resistencia de perforación  $\mathcal{S}$ . Los dos parámetros  $\mathcal{E}_o$  y  $\mu$ , que caracterizan la línea de fricción, han sido calculados mediante regresión lineal, ver Cuadro 3

El diagrama  $\mathcal{E}-\mathcal{S}$  para todos los ensayos de corte, Fig. 7, claramente indica diferentes pendientes para las líneas de fricción de cada arenisca. Los valores de los ángulos de fricción  $\arctan \mu$ , extraídos de una regresión lineal con los datos del diagrama  $\mathcal{E}-\mathcal{S}$ , pueden ser comparados a los ángulos de fricción internos obtenidos mediante ensayos de compresión triaxial (Cuadro 1). Esta comparación muestra una muy buena correlación entre los ángulos obtenidos mediante estos dos métodos, en los casos de las areniscas Vosges y Pennant. Existe sin embargo, una pequeña discrepancia entre los ángulos de fricción para la arenisca Crosland Hill. Una

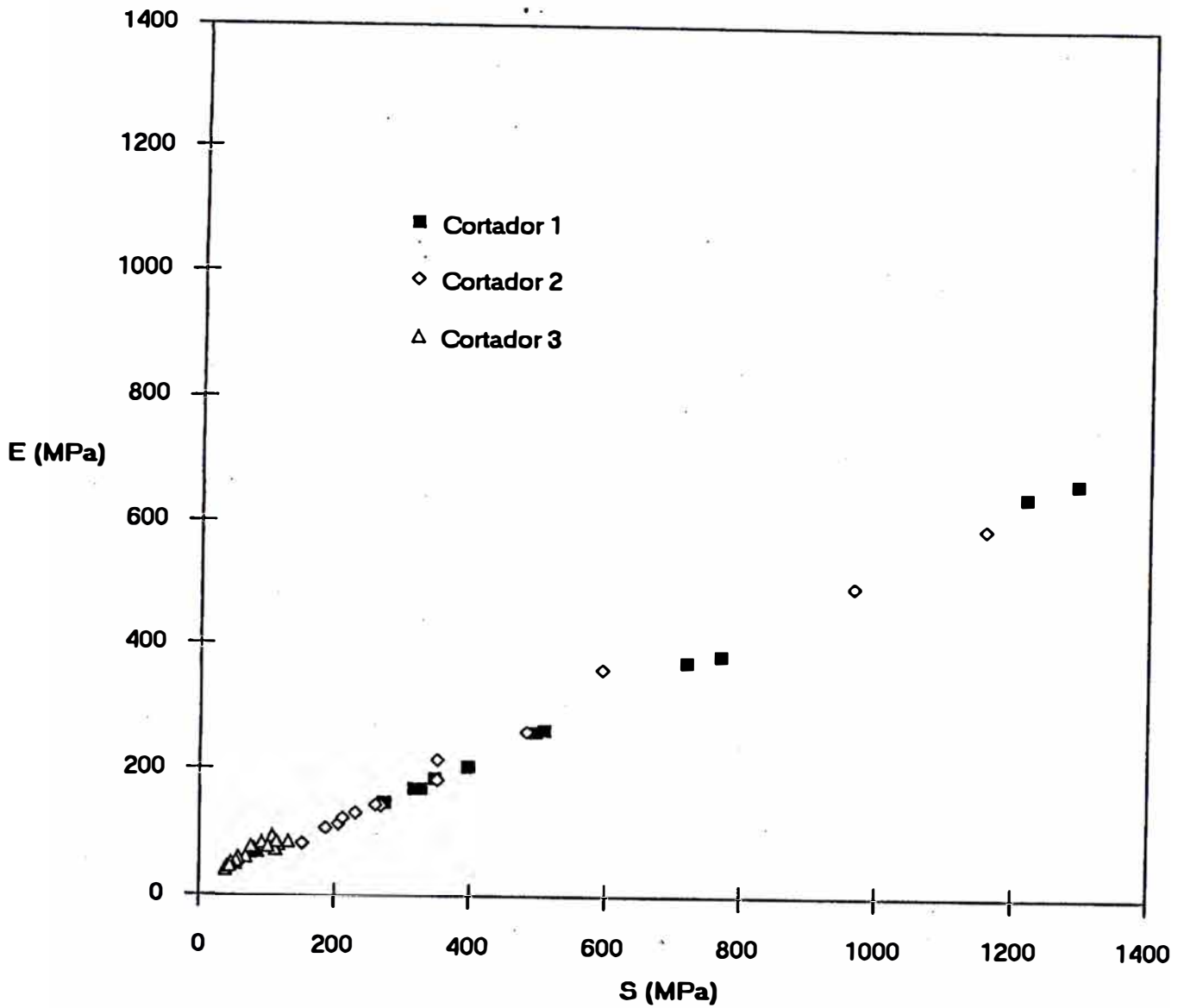


Figura 4: Diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$  para los ensayos en Crosland Hill.

Roca	$\mu$	$\arctan \mu$ ( $^{\circ}$ )	$\mathcal{E}_o$ (MPa)	$r^2$
Crosland Hill	0.51	27	9.7	0.994
Pennant	0.58	30	10.6	0.997
Vosges	0.67	33	9.0	0.998

Cuadro 3: Características de la regresión lineal del diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$  .

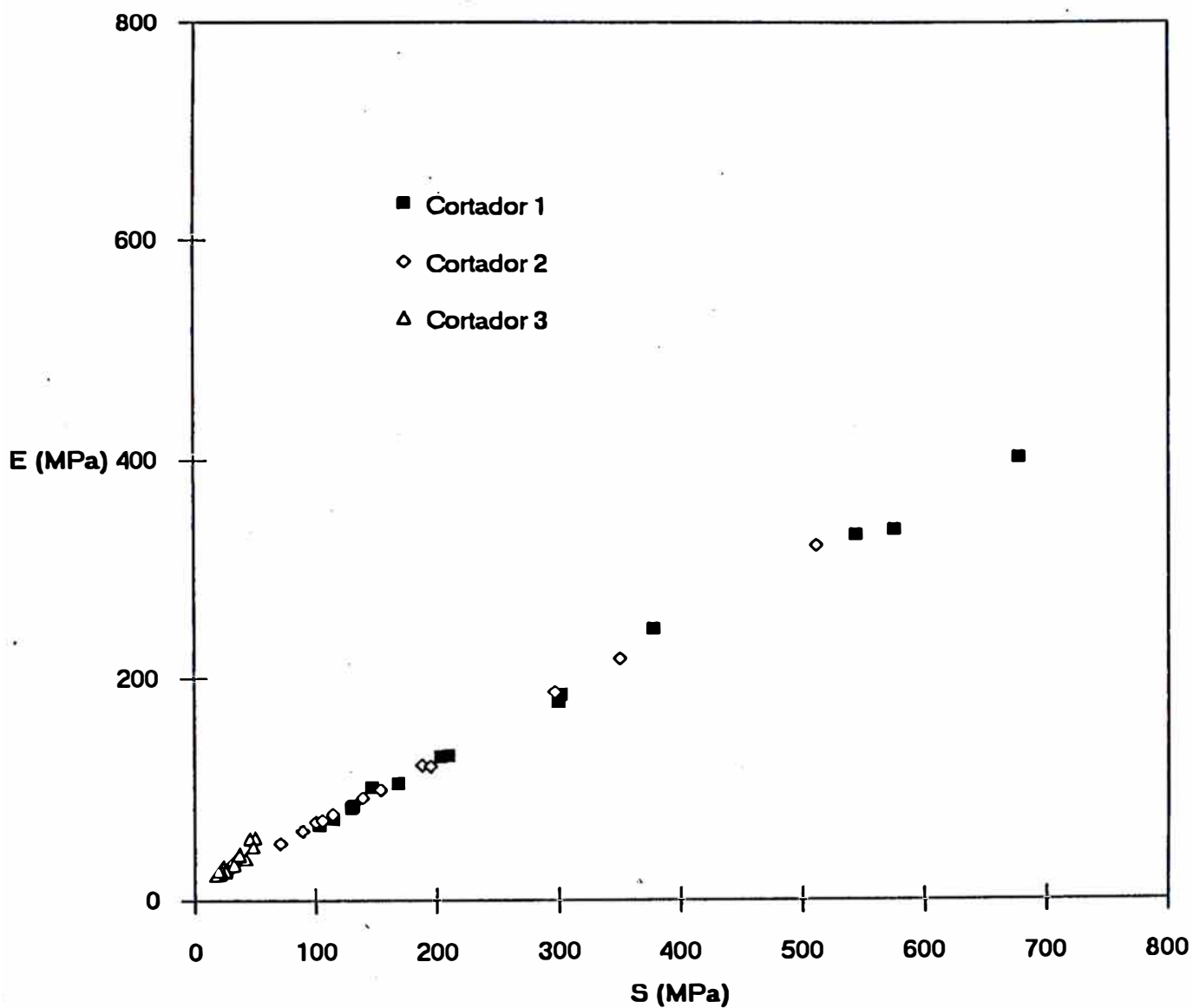


Figura 5: Diagrama  $\mathcal{E}$ - $S$  para los ensayos en Pennant.

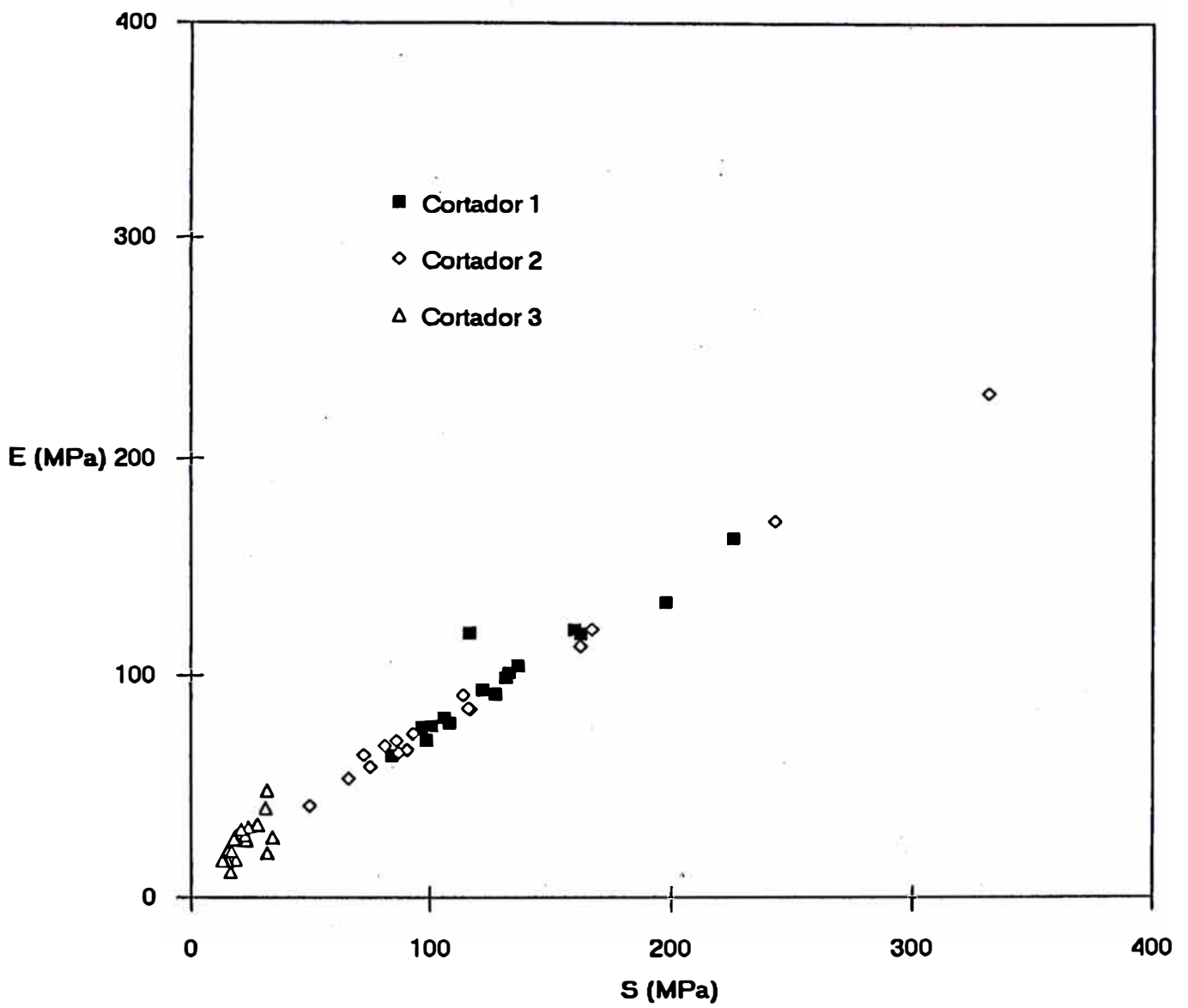


Figura 6: Diagrama  $\mathcal{E}$ - $S$  para los ensayos en Vosges.

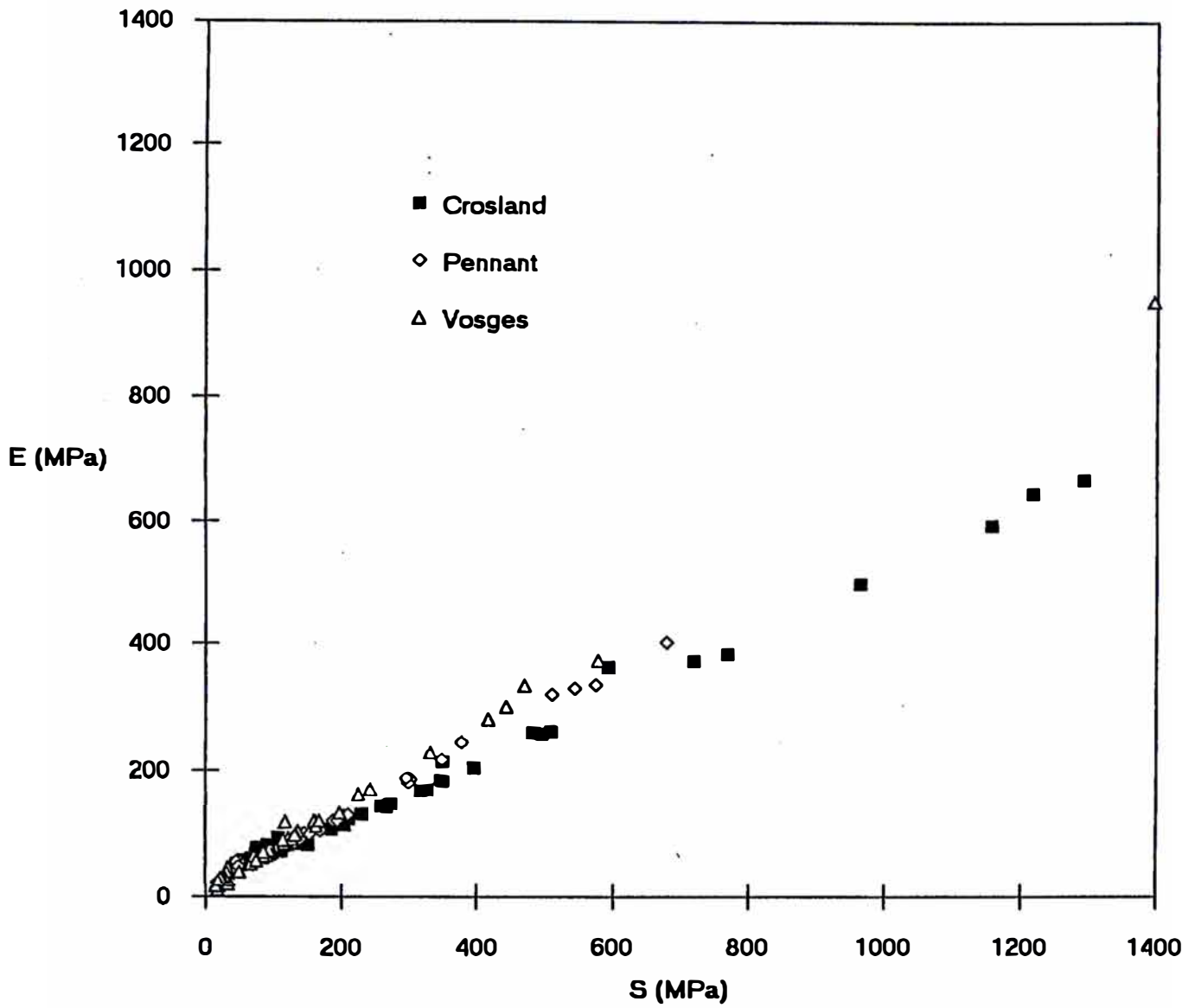


Figura 7: Diagrama  $\mathcal{E}$ - $S$  para todos los ensayos de corte.



posible explicación para esta discrepancia es que esta roca fue humedecida antes de realizar los ensayos para evitar que se indujeran altas temperaturas al cortador debido a la alta abrasividad de esta roca. El contenido de agua ciertamente afecta los resultados de ensayos de compresión uniaxial y triaxial. Dos ensayos triaxiales drenados fueron realizados para determinar el ángulo de fricción interna de la Crosland Hill en condiciones saturadas. Los ensayos dieron un ángulo de fricción de  $28^\circ$ .

## 5. Determinación del Punto de Corte

El punto de corte en el diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$  caracteriza las condiciones ideales de corte que solo se consiguen con un cortador perfectamente afilado. El primer camino que se viene a la mente para determinar el punto de corte es explotar los resultados de los ensayos de corte con el cortador afilado[4], que están agrupados en la parte inferior izquierda del diagrama  $\mathcal{E}$ - $\mathcal{S}$ . Sin embargo, este método no siempre conduce a un estimado confiable del punto de corte, porque no se conoce la magnitud de la fuerza de contacto. Una mejor manera es determinar el punto de corte apartir de la intersección de la línea de fricción con la línea de corte. Efectivamente, la estimación de la línea de fricción es muy confiable y existe evidencia experimental que sugiere que  $\zeta$  no es muy sensible al tipo de roca cortada (para un ángulo dado de inclinación de la cara de un PDC). Aquí,  $\zeta$  es estimada apartir de los ensayos en la roca más debil (Vosges) ya que el error introducido debido a la existencia de las fuerzas de contacto es probable que sea el menor. Esto conduce a un estimado de  $\zeta$  (denotado como  $\hat{\zeta}$ ) igual a 0.65; este valor de  $\zeta$  corresponde a  $\psi = 18^\circ$  (para un cortador con ángulo de inclinación de  $15^\circ$ ), ciertamente es un límite superior del valor "real" de  $\psi$ , pero seguramente muy cercano a éste. Un estimado de la energía específica de corte, computada apartir de la intersección del estimado de la línea de corte y de la línea de fricción calculada esta dada por:

$$\hat{\epsilon} = \frac{\mathcal{E}_o}{1 - \hat{\zeta}_1 \mu} \quad (13)$$

donde  $\mathcal{E}_o$  es el intercepto de la línea de fricción en el eje  $\mathcal{E}$ . El Cuadro 4 resume los valores obtenidos mediante este método. Los estimados de  $\epsilon$  mostrados en el Cuadro 4 estan muy cercanos entre sí, a pesar de que las rocas tienen resistencias picos significativamente diferentes (ver Cuadro 1 para ensayos de compresión triaxial). Esta falta de correlación entre la energía específica para el proceso de corte y la resistencia pico de la roca puede ser explicado conceptualmente como sigue: Más alla de la resistencia pico, una roca friable (tal como estas areniscas) se comportan básicamente como un material "friccionante". En vista de la gran deformación característica del proceso de corte, la energía específica intrínseca es es dominada por la energía empleada cuando la roca a perdido su cohesión. La resistencia pico de la roca no se espera que influya mayormente a  $\epsilon$ .

Roca	$\hat{\epsilon}$ (MPa)	$\hat{\zeta}$
Crosland Hill	14.5	0.65
Pennant	17.0	0.65
Vosges	15.9	0.65

Cuadro 4: Parámetros de corte estimados.

## 6. Fuerzas de Rozamiento en el Contacto

Las fuerzas de contacto pueden ser estimadas por diferentes métodos. Anteriormente, hemos identificado dos de ellos: o se resta la contribución del corte de la fuerza total, o se descompone vectorialmente la fuerza total de corte en sus componentes de corte y de contacto. Aquí, se describe el segundo método que requiere de un conocimiento de  $\zeta$  y  $\mu$ .

La fuerza normal de contacto está graficada en las Figuras 8 y 9 de acuerdo a la secuencia de ensayos para los cortadores 1 y 2, para poder mostrar su evolución. Estas figuras también muestran un estimado de las fuerzas normales de contacto para los ensayos referenciales realizados en la arenisca Vosges a 1 mm de profundidad, después de cada serie de ensayos de corte. Los resultados de los ensayos de referencia proporcionan una medida de la evolución del cortador debido al desgaste.

Ahora hay que tratar dos puntos:

- Podemos hablar de resistencia de contacto para caracterizar el proceso de contacto friccionante para una roca dada; es decir, son las fuerzas de contacto proporcionales a la superficie de desgaste para una roca dada:

$$F_n^f = \sigma A^f \quad (14)$$

donde  $\sigma$  es la resistencia de contacto.

- Existe una relación entre la resistencia de contacto  $\sigma$  y otras propiedades geomecánicas de la roca?

Como se ha expresado anteriormente, la superficie de contacto está evolucionando continuamente de ensayo en ensayo y es por lo tanto difícil de verificar rigurosamente la validez de la hipótesis de la Eq. (14). Una forma sería comparar la razón de fuerzas (Cortador 1/Cortador 2) para cada serie de ensayos (la separación por series se hace para minimizar la evolución de la superficie de contacto). Si la Eq. (14) es válida, entonces esta razón deberá ser igual a la razón entre las áreas de la superficie desgastada en contacto. En el Cuadro 5 se muestran las razones calculadas para las fuerzas; estas razones están aceptablemente cerca a 1.53, que es la razón entre las áreas de desgaste de los dos cortadores, medidos antes de realizar los ensayos. Estos ensayos por lo tanto sugieren que en una primera

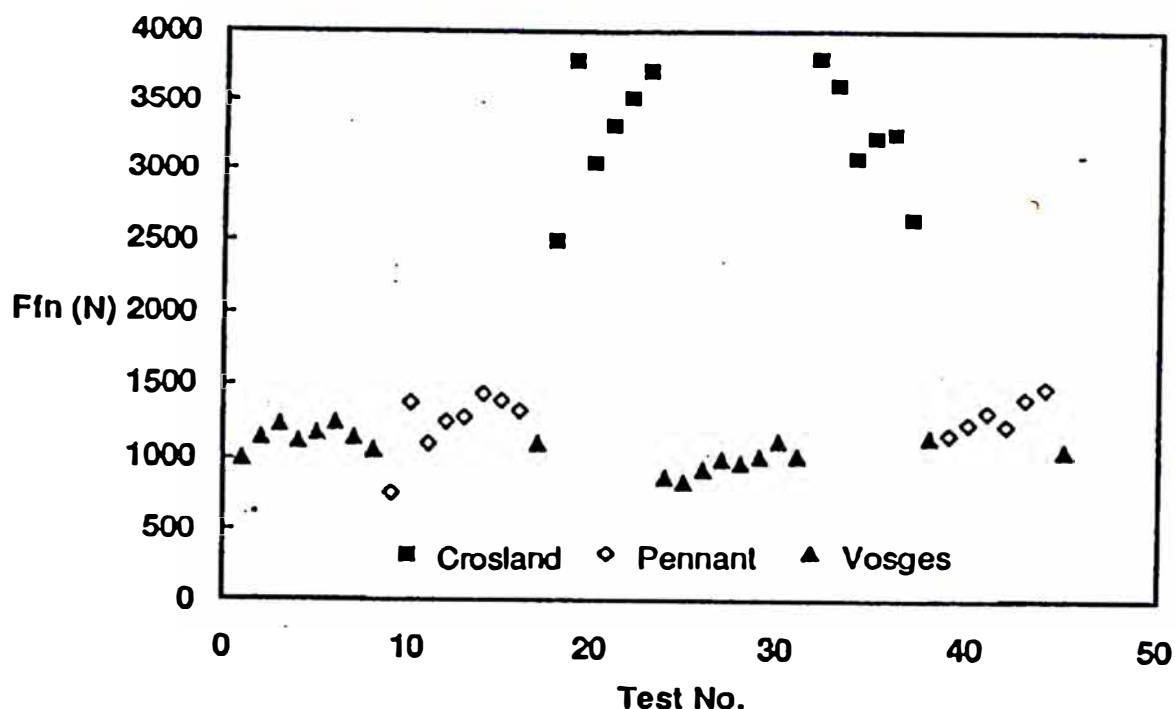


Figura 8: Fuerza normal de contacto  $F_n^f$  de acuerdo a la secuencia de ensayos (cortador 1).

aproximación, las fuerzas de contacto son proporcionales al área de la superficie desgastada. La resistencia de contacto para cada arenisca puede ser estimada utilizando el valor inicial del área de contacto. En Cuadro 6 se presenta el promedio y la desviación estándar de  $\sigma$  con ambos cortadores para cada tipo de roca. Se puede apreciar que la desviación estándar es menor al 20 %, que es razonable en vista de la evolución del área de contacto. Una comparación del estimado valor de  $\sigma$  con  $c$ , la cohesión de la roca (listado en el Cuadro 1), claramente indica una correlación entre estas dos cantidades;  $\sigma$  y  $c$ .

$$F_n^f = \sigma A^f \quad (15)$$

## 7. Conclusiones

Se ha presentado una investigación experimental de la acción de corte de roca con cortadores de PDC desgastados en tres areniscas y los resultados han sido analizados siguiendo las pautas del modelo de corte de roca recientemente propuesto por Detournay y Defourny [3].

Las principales conclusiones que se han alcanzado durante la presente investigación pueden ser resumidas como sigue:

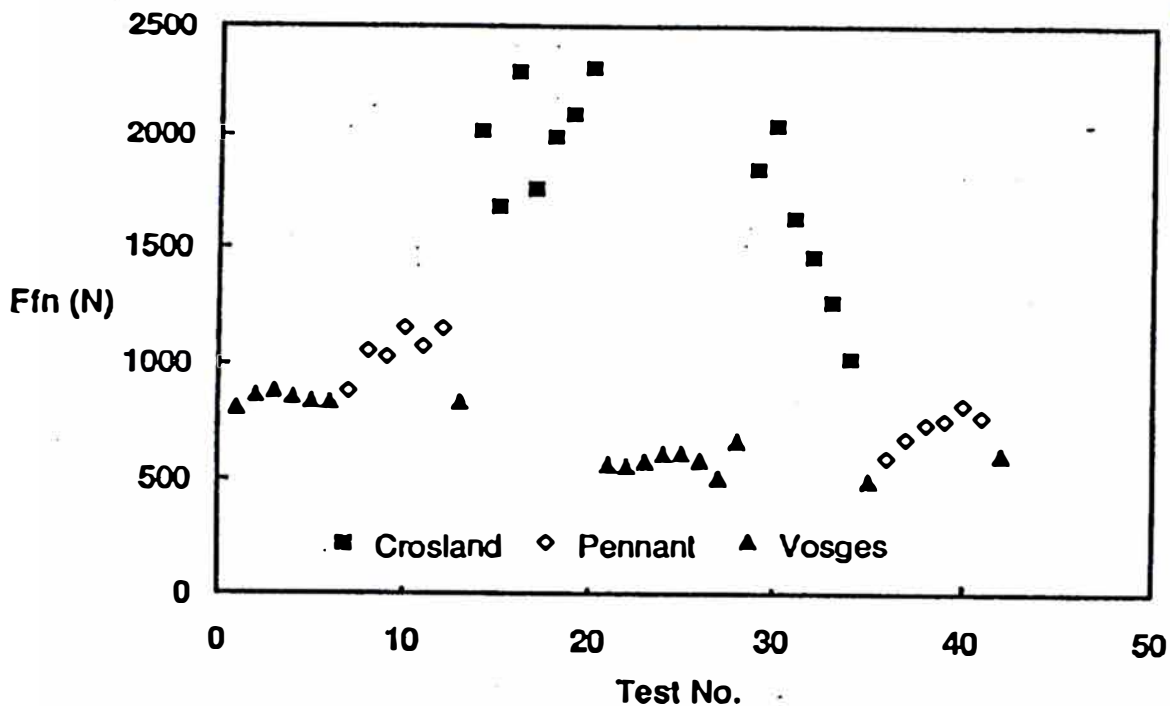


Figura 9: Fuerza normal de contacto  $F_n^f$  de acuerdo a la secuencia de ensayos (cortador 2).

Roca	Serie 1	Serie 2
Crosland Hill	1.58	2.77
Pennant	1.24	1.82
Vosges	1.35	1.45

Cuadro 5: Razón de fuerzas de contacto friccionantes para Cortador 1/Cortador 2 por series.

	Crosland Hill	Pennant	Vosges
$\bar{\sigma}$ (MPa)	116.2	50.7	41.6
Desv. Est. (MPa)	22.2	9.3	6.5

Cuadro 6: Promedio y desviación estándar de los esfuerzos de contacto friccionante.

- La predicción de que existe una relación entre  $\mathcal{E}$  y  $\mathcal{S}$  esta bien sustentada por los resultados experimentales. Para una roca dada, la respuesta del cortador esta restringida a una misma línea de fricción, independientemente del estado del desgaste del cortador y de la profundidad de corte. Esto implica que la acción de un cortador de PDC es, como mínimo, adecuadamente caracterizada por tres constantes  $\epsilon$ ,  $\zeta$  y  $\mu$ , que son independientes del estado de desgaste del cortador y de la profundidad de corte.
- La energía específica intrínseca  $\epsilon$  es esencialmente la misma para las tres areniscas ensayadas, a pesar de que la resistencia pico de estas tres rocas varía significativamente entre una y otra (la resistencia pico varia mas de uno a dos entre la Vosges y la Crosland Hill). Esta conclusión es alcanzada sin embargo bajo el supuesto de que  $\zeta$  es idéntico para las tres rocas ensayadas. Este supuesto se piensa que es legítimo ya que no se espera que el ángulo de fricción característico entre la superficie de PDC/roca triturada cambie significativamente de una arenisca a otra.
- El coeficiente de fricción  $\mu$  aparentemente refleja la propiedad de fricción interna de la roca. Para las areniscas Vosges y Pennant, los valores del ángulo de fricción medidos en los ensayos de corte y los ensayos de compresión triaxial son los mismos dentro de un límite de  $2^\circ$ . Para la Crosland Hill, la discrepancia entre los dos valores de  $\phi$  es alrededor de  $5^\circ$  (los ensayos de corte dan un valor menor). Esta diferencia ha sido atribuida a que la roca no estaba completamente seca, por lo tanto debilitada.
- La resistencia en el contacto  $\sigma$  parece estar fuertemente correlacionada con la cohesión de la roca.

## Referencias

- [1] W.C. Maurer. "The state of rock mechanics in drilling". In *Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech.*, pages 355–395, Minnesota, Missouri, 1967.
- [2] D.A. Glowka. "Development of a method for predicting the performance and wear of PDC drill bits". Report SAND86-1745, Sandia National Laboratories, 1987.
- [3] E. Detournay and P. Defourny. "A phenomenological model of the drilling action of drag bits". *Int.J.Rock Mech. Min.Sci.*, 29(1):13–23, 1992.
- [4] E. Chaput. *Observations and Analysis of Hard Rock Cutting Failure Mechanisms using PDC Picks*. M.Phil. Thesis, Imperial College, University of London. To be published.

# A Certificados

# UNIVERSITY OF LONDON



JOSE RAIMUNDO ALMENARA CHAU

of

IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

having completed an approved course of study in

ENGINEERING ROCK MECHANICS

as an Internal Student in the Faculty of ENGINEERING

and passed the prescribed examinations has this

day been admitted by the Senate to the degree of

**MASTER OF SCIENCE**

21 DECEMBER 1988

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dunn', written over a light grey rectangular background.

*Vice-Chancellor*



# Imperial College of Science and Technology

LONDON



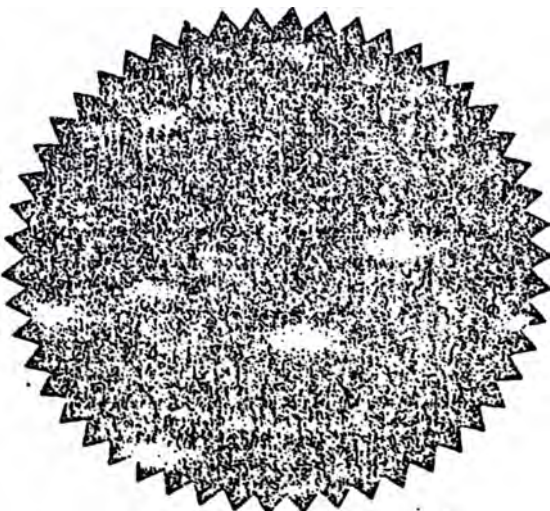
The Governing Body of the Imperial College of Science and Technology  
has conferred on

JOSE RAIMUNDO ALMENARA CHAU

the **DIPLOMA** of the **IMPERIAL COLLEGE** in

**ENGINEERING ROCK MECHANICS**

Sealed by authority of the Governing Body



Rector

*Mr A Ash*

Registrar

*P. E. Rose*

Date of award 31 DECEMBER 1988



UNIVERSITY OF LONDON

**Jose Raimundo Almenara Chau**  
of  
**Imperial College of Science, Technology and Medicine**

having completed the approved course of study and passed the  
examinations as an Internal Student in the Faculty of Engineering  
has this day been admitted by the Senate to the Degree of

**DOCTOR OF PHILOSOPHY**

A handwritten signature in black ink, appearing to read "SR Sutherland".

*Vice-Chancellor*

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mr. A. Th".

*Rector, Imperial College of Science, Technology  
and Medicine*

17 June 1992

CERTIFICADO DE TRABAJO

A QUIEN CORRESPONDA

JUAN BERNUY PUENTE

Gerente de Administración de la Compañía  
Minera San Ignacio de Morococha S.A.

CERTIFICA QUE

El Ing. José Raimundo Almenara Chau, identificado con L.E. Nº 07840760, ha laborado en nuestra Empresa desde el 15 de junio de 1985 hasta el 14 de julio de 1987, como Asistente Capitán Mina en la Unidad San Vicente.

Se expide el presente Certificado a petición del interesado y para los fines que él estime convenientes.

San Borja, 17 de agosto de 1992

COMPAÑIA MINERA  
SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.

  
Juan Bernuy Puente  
Gerente de Administración



**INGENIEROS S.A.**

**CERTIFICADO DE TRABAJO**

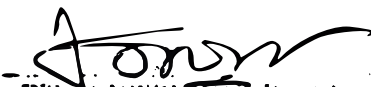
Certificamos por el presente que el Sr. Raimundo Almenara Chau trabaja en nuestra empresa como Consultor Asociado en la especialidad de Mecánica de Rocas, desde Setiembre de 1992 hasta la fecha.

Se expide el presente certificado para los fines y usos que el interesado estime conveniente.

Lima, 01 de Setiembre de 1993

**S.V.S. INGENIEROS S.A.**

**SVS INGENIEROS S. A.**

  
ING. RAIMUNDO ALMENARA CHAU