

La herramienta diamantada en la industria de la piedra

por C.P. Hallez

EVOLUCIÓN DEL ASERRADO DE MATERIALES PÉTREOS

Antes de describir en los capítulos siguientes los procedimientos tanto antiguos como modernos utilizados en el aserrado (o corte) de materiales pétreos, quisiéramos recordar algunas bases teóricas que han servido a establecer algunos de estos métodos.

Los métodos más antiguos -algunos de los cuales todavía se utilizan en la actualidad en las canteras- para el trabajo y la extracción de la piedra son: la ruptura (o clivaje) y la talla. Estos métodos han sido descubiertos empíricamente y pueden ahora ser explicados por medio de las leyes de resistencia de materiales.

Contrariamente a los materiales elásticos, puede determinarse el módulo de elasticidad

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \frac{\text{tensión}}{\text{deformación}}$$

y considerar E como una constante hasta el límite elástico (fig. 1), en el caso de los materiales pétreos, se obtiene la curva $\varepsilon = f(\sigma)$ que se incurva desde el origen.

Se toma entonces arbitrariamente una secante y se considera que en este entorno E es convencionalmente constante

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Pueden igualmente utilizarse leyes empíricas como las de Bach-Schule:

$$E\varepsilon = \sigma^\eta \quad (\eta = 1,1 \dots 1,3)$$

De igual modo el módulo dinámico de elasticidad, debido a una aplicación brusca de carga, varía en función de la tensión de la aplicación de carga de acuerdo a una ley no lineal, fig. 2.

El módulo de deslizamiento G es definido de modo análogo a E:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \frac{\text{tensión de corte}}{\text{deformación}}$$

El módulo de deformación transversal, o coeficiente de Poisson, es teóricamente para cuerpos perfectamente elásticos, homogéneos e isótropos de 0,25.

En realidad, encontramos:

- para el acero: $\mu = 0,3$
- el hormigón: $\mu = 0,2$
- las piedras: $\mu = 0,1$

Existe una relación $f(\sigma, \tau)$ que determina la relación entre σ y τ en el momento de la ruptura. La representación gráfica de esta función

se llama la curva intrínseca de Mohr. La ruptura tiene lugar cuando un círculo de Mohr se encuentra tangente o secante a la curva intrínseca.

El círculo de Mohr muestra la variación de tensiones mientras que la curva intrínseca muestra cuales son las tensiones que llevan a la ruptura.

Para materiales pétreos, la curva intrínseca tiene la forma de la fig. 3.

En la figura 3, puede apreciarse que el plano de ruptura se efectuará de modo aproximadamente perpendicular al esfuerzo de tracción, siguiendo el ángulo βt .

En compresión, la ruptura es en primer lugar un corte siguiendo el ángulo βc , figures 4.

Después de este aparte sobre los fenómenos de ruptura en los materiales pétreos que justifican los procedimientos de clivage, examinemos ahora la utilidad económica de estos procedimientos.

Se aprecia inmediatamente que estos métodos de trabajo son lentos y de ventajas dudosas, puesto que la rotura se producirá en los puntos de mínima resistencia, los cuales no son necesariamente los deseados por el usuario del bloque. En consecuencia suele ser necesario un largo proceso de terminación.

El uso de métodos de corte por abrasión, en cambio, permite mejorar considerablemente tanto la calidad como la rapidez del trabajo.

La evolución de los métodos de construcción y de decoración han tenido igualmente gran influencia sobre la investigación de los métodos de corte. En la actualidad la piedra natural es cada vez menos utilizada como elemento portante en la construcción y cada vez más utilizada en la decoración bajo la forma de placas de revestimiento ya sea pulidas o no, en pavimentos, en monumentos. Estas aplicaciones implican la necesidad de gran cantidad de cortes en el material.

PROCEDIMIENTOS GENERALES DE ASERRADO POR ABRASION

Generalidades

El desgaste por abrasión es una forma particular de desgaste de la materia sólida. Se produce cuando dos cuerpos en frotamiento recíproco tienen (o por lo menos uno de ellos) propiedades abrasivas. Son los cuerpos duros y frágiles de baja elasticidad y valencias iónicas o covalentes que poseen esta propiedad.

En el caso de materiales pétreos, el desgaste se efectuará sea por arranque de partículas, descalze de granos o cristales, microclivages y microrayaduras provocadas por las asperezas más duras.

El estado de tensión producido por el abrasivo da lugar a rupturas frágiles de tracción de carácter superficial. Hemos visto más arriba que la resistencia a la tracción de materiales pétreos es muy débil (curva intrínseca de Mohr).

Los primeros procedimientos conocidos de corte por abrasión han utilizado partículas abrasivas libres o aglomeradas como la arena, el carburo de silicio, la granalla.

Las partículas abrasivas libres, son transportadas al trazo de corte por un soporte, generalmente de acero, como un hilo, lamas o discos.

A título ilustrativo, desarrollaremos a continuación rápidamente los procedimientos clásicos de corte con abrasivo libre, el aserrado por hilo y lama.

El aserrado por hilo se efectúa de la manera siguiente: un hilo de acero formando un bucle es tensionado, dirigido y arrastrado por poleas a una velocidad de 20 à 25 m/seg. aproximadamente. Se vierten granos abrasivos libres juntamente con agua en el trazo de aserrado. Arrastrado por el hilo, el abrasivo (generalmente arena) ejerce su acción sobre la piedra y en parte

también sobre el hilo de acero. Se han usado diferentes artificios para aumentar el arrastre de la arena por el hilo: hilos de 2 ó 3 fibras con retorcido alternado invertido. Este sistema es todavía muy utilizado en las canteras dado que los largos de corte pueden ser considerables.

Para limitar el desgaste del hilo (llamado hilo helicoidal) y mejorar el enfriamiento algunos cables sobrepasan los mil metros de largo.

En los talleres de marmolería, la obtención de placas partiendo de bloques se efectúa por medio de lamas (flejes) de acero tensionadas dentro de un marco y animadas de un movimiento de vaivén. Un pequeño levantamiento del marco al fin de cada cartería permite introducir el abrasivo libre (arena, carburo de silicio ó granalla) y penetrar entre la piedra y la parte inferior de las lamas con agua para su refrigeración.

Para pequeños bloques y placas, se han usado también discos de acero con abrasivo libre.

Origen del fenómeno de corte con abrasivo libre

Si bien no todas las teorías concuerdan en cuanto al proceso de aserado, podemos distinguir las cuatro posibilidades siguientes:

1. Fenómeno de golpeado: el abrasivo es apretado contra la piedra de la cual pequeños fragmentos ya sea se desprenden o se pulverizan (acción de formón).
2. Fenómeno del cepillo (entendemos con esto el mecanismo similar al de un cepillo de carpintero): el abrasivo se incrusta en el soporte de acero, separando en su desplazamiento minúsculos fragmentos de piedra. Al comparar esta acción a la de un cepillo de carpintero el resultado de la abrasión puede entenderse como la obtención de microvirutas.
3. Fenómeno de arrollado bajo presión: particularmente en el caso de la granalla redonda, esta es arrollada (rodada) bajo presión en el trazo de corte con la consiguiente destrucción de la capa superior de piedra.
4. Una combinación de los fenómenos mencionados más arriba.

La evolución hacia los abrasivos fijos y hacia el diamante

La evolución de los abrasivos libres hacia los abrasivos aglomerados se ha efectuado primeramente con los discos de corte y las muelas de carburo de silicio.

El reemplazo de los antiguos discos de fundición o acero usados con abrasivos libres por discos de carburo de silicio aglomerado conoció al principio un período de auge. Infortunadamente los rendimientos de corte obtenidos eran sumamente variables, la duración baja, esto especialmente en las piedras duras. Estas herramientas provocaban numerosos accidentes por rotura y el trabajo estaba limitado por las bajas velocidades de corte. La evolución de esta herramienta se efectuó entonces hacia el uso del mejor abrasivo conocido actualmente, vale decir, el diamante.

Este fué al principio utilizado en piedras enteras engastadas una a una sobre la periferia de un disco metálico. Gracias a la invención de la « concreción », la herramienta diamantada se ha rápidamente extendido en el trabajo de la piedra. En efecto, permite al mismo tiempo velocidades elevadas de trabajo con larga duración, lo cual ha hecho su utilización económica.

Una concreción diamantada está constituida por aranos de diamante cuidadosamente calibrados, mantenidos en una masa apropiada, generalmente metálica.

Las características principales de las concreciones son:

- la calidad de los diamantes,
- el tamaño de los granos,
- la concentración del diamante,
- la naturaleza de la liga.

La influencia de las características más arriba será discutida cuando tocaremos el tema de los parámetros de estas herramientas.

Como hemos dicho, la dureza de los materiales en contacto tiene gran influencia sobre el fenómeno de abrasión.

La dureza de los minerales se expresa generalmente en la escala de Mohs por cifras que varían de 1 a 10. La escala Knoop da sin embargo una mejor idea de las diferencias de dureza.

		Dureza Mohs	Dureza Knoop
1	Talco	$Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$	12
2	Gypsa	$Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$	32
3	Fluorita	CaF_2	135
4	Calcita (mármoles, etc.)		163
5	Hematita	Fe_2O_3	395
6	Feldespato	$Al_2O_3 + SiO_2$	560
7	Cuarzo	SiO_2	750
8	Topacio	$Al_2(FOH_2SiO_4)$	1250
9	Corindón	Al_2O_3	1900
9,5	Carburo de silicio (SiC)		2300
10	Diamante	C	8300

Existe una mayor diferencia entre la dureza del diamante (10), del carburo de silicio (9,5) y del corindón (9) que entre el carburo de silicio (9,5) y el cuarzo (7).

Esto explica que si bien es posible aserrar granito (dureza 6) con carburo de silicio, será netamente más económico hacerlo con herramientas diamantadas.

METODOS DE ASERRADO CON HERRAMIENTAS DIAMANTADAS

Las herramientas diamantadas están constituídas por un soporte, generalmente de acero, sobre el cual se han fijado segmentos de dimensiones apropiadas.

Pueden clasificarse las herramientas en movimiento continuo, como los discos, hilos, sierras sin fin, y las herramientas de movimiento alternado: las lamas.

Descripción resumida de las herramientas

Discos

Los discos diamantados están constituídos por un alma de acero especial con ranuras a lo largo de su periferia formando dientes, fig. 5. Sobre esta alma se han soldado segmentos de concreción diamantada. El espesor de estos segmentos es ligeramente mayor que el espesor del alma de acero para permitir su introducción en la piedra.

Los discos diamantados usados en la industria de la piedra, se fabrican desde un diámetro de 200 hasta 3.000 mm., su espesor estando en relación al diámetro, de acuerdo a las leyes de resistencia de los materiales empleados en su fabricación.

Los « dientes » cumplen la función de permitir la evacuación de barros de aserrado, y de aumentar el enfriamiento en la zona de trabajo.

Hilos diamantados

La tecnología del hilo diamantado es aún muy reciente y nuestra empresa se preocupa de su promoción, especialmente en el aserrado de mármoles y calcáreos.

Nuestra solución consiste en utilizar un cable especial multifibra de alta resistencia. Sobre este cable se han enhebrado « perlas diamantadas » mantenidas a distancias apropiadas entre sí por separadores elásticos formados por resortes cilíndricos. Asimismo se disponen « perlas » especiales de tope en forma regular, fig. 6.

En este caso, las perlas diamantadas solamente se encuentran recubiertas de una delgada capa de diamante fijada por depósito electrolítico.

El largo total de este tipo de cable se sitúa entre los 16 y 20 m.

Sierra sin fin

Se utilizan segmentos fabricados en forma similar a los usados en los discos, soldándolos en forma de dientes a lo largo del fleje de una sierra sin fin, fig. 7

Lamas

Esta es la única herramienta de movimiento alternado utilizada en la industria de la piedra.

Está constituida por un fleje de acero sobre el cual se han soldado a intervalos segmentos diamantados. La separación entre segmentos se llama el « paso », fig. 8.

En cada extremo de una lama se fijan refuerzos que permiten fijarlas y tensionarlas sobre el marco de la máquina. Ese marco está animado de un movimiento de vaivén sobre carreras de 400 à 600 mm.

El principio de la lama tensionada en un marco permite montar en forma conjunta una cantidad suficiente de lamas para convertir en placas de espesor adecuado un bloque de cantera en una sola operación.

Máquinas

Los factores comunes a todas las máquinas que usan herramientas diamantadas son la precisión del mecanismo, la rigidez y la potencia. En efecto, la herramienta diamantada, siendo de precio inicial elevado, encontrará su máxima rentabilidad solo si se utiliza en condiciones de trabajo apropiadas.

Máquinas para discos diamantados

Existe en el mercado actual un elevadísimo número de máquinas diversas para el uso racional de discos diamantados.

Las más simples han sido previstas para una sola herramienta. Se componen de una base con una columna portadora del motor y husillo. Diversas colisas permiten ubicar con precisión la herramienta con respecto a la mesa. Esta mesa a su vez recibe el material a ser cortado y puede desplazarse manual o hidráulicamente con respecto al cabezal de la máquina. Estas son las cortadoras llamadas « de columna ».

Las máquinas « de puente » son más rígidas que las anteriores y permiten potencias más elevadas.

En estas máquinas, el cabezal portadisco se desplaza sobre una viga horizontal formando puente. A su vez, el desplazamiento de toda la viga

sobre dos rieles laterales permite ubicar el cabezal en forma transversal. El ajuste en altura se suele efectuar por medio de la mesa, la cual puede a menudo efectuar movimientos giratorios para cortes a escuadra.

Se encuentran igualmente en el mercado máquinas multidisco de discos paralelos cuya distancia es ajustable, permitiendo así efectuar cortes paralelos en una placa de piedra en forma simultánea.

Igualmente existen máquinas con un disco vertical y un disco horizontal que pueden, partiendo de un bloque de cantera, obtener en forma consecutiva vigas rectangulares de diversas dimensiones hasta consumir totalmente el bloque.

Máquina de hilos diamantados

Estas máquinas están constituidas generalmente por un marco que soporta a dos poleas de gran diametro (1,5 a 2 m) que se desliza verticalmente sobre dos columnas. Una de las poleas es motriz y mientras que la otra es ajustable para someter el cable a la tensión apropiada por medio de contrapesos o hidráulicamente.

Durante el aserrado, el marco y sus poleas van bajando en el bloque de piedra por medio de un tornillo sin fin o cilindro hidráulico.

En general estas máquinas aceptan bloques de hasta 5 m. de largo.

Telares

Los telares han sido previstos para utilizar lamas tensionadas en un marco y animadas de un movimiento alternado para el aserrado. El movimiento alternativo es transmitido al marco por medio de una biela y manivela.

Distinguimos:

- los telares de marco vertical y lamas horizontales que permiten solo un reducido número de lamas — hasta 15 lamas — Estas van bajando en la piedra por un sistema de tornillos, mientras que el guiado se efectúa sobre el marco.
- los telares de marco horizontal que permiten hasta 100 lamas. El sistema clásico comprende un marco que baja en la piedra durante el aserrado. Una versión más reciente (sistema Clycor ó Rapidor) permite elevar la frecuencia de batido al hacer funcionar el marco en un plano único. En ese caso el bloque está animado de un movimiento ascendente hacia el marco.

Una nueva técnica ha hecho recientemente su aparición: el telar de marco vertical y lamas verticales. Esta máquina ha sido prevista para el aserrado de bloques standard con lamas cortas que presentan la ventaja de una mayor rigidez. Asimismo, siendo el marco más liviano, se pueden alcanzar velocidades de batido más elevadas.

La resistencia de lamas cortas permite el aserrado de granitos que los telares convencionales no pueden efectuar debido a las presiones elevadas necesarias.

La tensión de cada lama en el marco puede ser reducida a 6 toneladas en lugar de las 8 a 12 toneladas necesarias en las máquinas convencionales. Es posible así montar hasta 60 lamas en un solo marco. Si además se equipa la máquina con dos marcos gemelos, se puede llegar a telares de 120 lamas de alta productividad.

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS

Los factores que influyen en el rendimiento económico de la herramienta diamantada son numerosos.

En lo que se refiere a la herramienta citaremos, por ejemplo:

- las dimensiones de los dientes y de las herramientas,
- el número de dientes,
- la liga,
- la granulación del diamante,
- la calidad del diamante,
- la concentración del diamante,
- la precisión de fabricación.

En lo que se refiere a la utilización, tenemos:

- el material:
 - naturaleza,
 - composición,
 - estructura
- la máquina:
 - precisión
 - estabilidad estática y dinámica
 - potencia
- las condiciones de trabajo:
 - velocidad de rotación o de desplazamiento
 - profundidad de corte.
 - velocidad de avance.
 - calidad de refrigerado.
 - trabajo manual o automático.

Estos parámetros han sido y siguen siendo objeto de estudios intensivos tanto en laboratorio como en ensayos prácticos.

Es imposible, en este trabajo, describir todos los estudios realizados. Diremos solamente algunas palabras sobre los parámetros más importantes.

La concreción diamantada se caracteriza por cuatro parámetros: liga-granulación — concentración — calidad del diamante.

La función de la liga es mantener los granos de diamante en su lugar mientras sean capaces de cortar y permitir la aparición regular de nuevos granos a medida de su desgaste. Cada liga debe entonces ser cuidadosamente elegida en función de la acción erosiva de la piedra y de la resistencia de los diamantes en este material. En esta forma por ejemplo, el aserrado de la piedra Sandstone necesitará una liga sumamente dura debido al hecho que los barros de aserrado de esta piedra son sumamente abrasivos.

La influencia de la granulación es igualmente importante. Para un mismo material, como el granito, el rendimiento aumenta con el tamaño de los granos. Esto se puede ver claramente en el diagrama de la figura 9.

La concentración en diamante representa el peso de diamante por unidad de volumen. Debe ser adaptada al tamaño de los granos de modo de tener siempre un número suficiente de diamantes en acción. Si no se tiene en cuenta más que el rendimiento de corte, este aumenta con la concentración. El rendimiento económico, por otra parte, pasa por un óptimo que debe ser establecido en las condiciones de producción normal y puede por lo tanto variar de un taller a otro.

Los diamantes se clasifican actualmente en diferentes calidades. Estas clasificaciones se basan sobre su origen: diamante natural o sintético, sobre la forma, los tratamientos soportados, la friabilidad, etc. Aquí también deberá encontrarse una solución de compromiso entre la liga utilizada y el material a trabajar.

En las características de utilización, las propiedades del material son fundamentales.

Para el uso de herramientas diamantadas, el conocimiento de la dureza y de la abrasividad pueden ser suficientes en la mayoría de los casos. Los parámetros utilizados por el geólogo son indudablemente más completos:

Composición, granulación, textura, densidad, porosidad, resistencia al desgaste, a la compresión, a la tracción,... Infortunadamente, las clasificaciones geológicas no corresponden casi nunca a las utilizadas por los marmoleros.

Para simplificar, clasificaremos los materiales en tres grupos:

1. Materiales blandos y abrasivos (areniscas)
2. Materiales semi-blandos (mármoles, calcáreos)
3. Materiales duros (granitos)

A estas tres categorías corresponden los mecanismos de desgaste de las herramientas diamantadas descritas en la tabla siguiente. Se encontrarán igualmente las características mínimas a conocerse para determinar la herramienta apropiada:

Grupo	Forma de desgaste	Características mínimas útiles
1º Blandos y abrasivos arenisca	erosión de la liga	resistencia a la compresión — tamaño del grano
2º Semi-duros (mármoles, calcáreos)	erosión lenta de la liga — erosión lenta del diamante	resistencia a la compresión — dureza Shore (rebote)
3º Duros (granitos)	desgaste más rápido del diamante	coeficiente de desgaste de una herramienta diamantada tipo ¹

Las condiciones de trabajo se caracterizan por lo menos por la profundidad de corte, velocidad de rotación y velocidad de avance. Estos tres factores no pueden ser disociados.

Numerosos ensayos han sido efectuados y demuestran que en el caso de discos utilizados en granito, es conveniente reducir la velocidad periférica. El óptimo, a un caudal de corte constante, varía de acuerdo a la clase de material, mientras los más blandos y abrasivos exigen velocidades más elevadas (50 a 60 m/seg.).

Influencia de la velocidad periférica sobre el rendimiento en granitos

Velocidad periférica V_p m/c	Resultado de investigaciones en U.S.A. Duración de vida en %	Resultados de investigaciones en Europa (Diamant Boart) Duración de vida en %
23	—	160
35	100	100
46	—	75
52	—	65
56	66	—
67	42	—

1. Una escala de este tipo se usa actualmente en Italia. El número mayor representa el granito más difícil de cortar:

— hematita verde	7
— Sierra Chica (Argentina)	5
— Baveno — Montorfano	4
— Sienita de Biella	3
— Diorita de Anzolla	2
— Cerino — Beola — Langhadone	2
— Negro de Suecia — Negro de Africa	1

El producto de la profundidad de corte (h) y de la velocidad de avance (Va) da el caudal de corte o velocidad de corte (V).

Para los materiales blandos y semi-duros, la curva de Rendimientos en función del caudal de corte tiene la forma de la figura 10.

Se distinguen tres zonas. La primera (I) es aquella donde el trabajo es imposible por satinado o pérdida de la capacidad de corte del disco. Esta zona no existe para materiales abrasivos puesto que representa un desgaste del diamante sin desgaste de liga.

La zona (II) es la zona de trabajo. Se observará una reducción de rendimiento con el aumento de caudal de corte.

La zona (III) corresponde a un desgaste excesivo de la liga. Su límite superior corresponde a las posibilidades de potencia de la máquina o de la resistencia mecánica del alma.

Teoría sobre las condiciones de trabajo

Se ha desarrollado una teoría que evidencia las ventajas del trabajo en pasadas profundas con lentos avances en el caso de materiales duros. Solo es valedera, sin embargo, para máquinas potentes y sumamente estables, así como para herramientas especialmente diseñadas.

M. Faber ha establecido una función $X = f(V, h, \text{dimensión del disco})$.

Ha constatado que cuando esta función se mantiene constante, la duración de vida o el rendimiento del disco permanece constante, lo que permite un estudio de las condiciones óptimas de uso.

Nuestras propias investigaciones nos han permitido establecer una función $f(x) = f(Va, h, Vp, La)$, donde:

Va = velocidad de avance
 H = profundidad de pasada
 Vp = velocidad periférica
 La = largo activo de contacto

Dentro de determinados límites, ha sido demostrado que el producto de la velocidad de corte en cm.2/min. por el rendimiento en metros cuadrados (m^2) permanece constante para $f(x) = \text{constante}$, o sea $V \times \eta = K$.

Las curvas de rendimiento en función de $f(x)$ tendrán el aspecto de la fig. 11 para $V_1 > V_3$.

Se puede, desde aquí, dibujar una curva de velocidad/rendimiento para $f(x) = \beta_2$ que representa el óptimo.

Se obtiene así una hipérbola equilátera cuyo vértice se encuentra en $K\sqrt{2}$, figura 12.

Se puede también elegir las condiciones de trabajo más económicas determinando las que reducen al mínimo la ecuación del precio de costo.

$$\text{Ecuación del precio: } P = \frac{D}{\eta} + \frac{M}{V}.$$

El primer término corresponde al precio de costo de la herramienta y el segundo al de la mano de obra.

$$\text{Con la relación } V \times \eta = K \text{ tenemos } P = \frac{D}{K} V + \frac{M}{V}.$$

$$\text{El mínimo tendrá lugar para } \frac{\delta P}{\delta V} = 0 \text{ ó sea, } V = \sqrt{\frac{K \times M}{D}} m^2/h.$$

ENSAYO SISTEMÁTICO DE DISCOS EN LA PIEDRA

La constante mejora de calidad de los discos diamantados solo puede obtenerse mediante un conocimiento profundo de los parámetros de corte de la herramienta.

La herramienta ideal presenta un desgaste regular de la liga y un rendimiento elevado en estas condiciones típicas de trabajo.

El rendimiento no es el único parámetro importante durante la puesta a punto de una herramienta nueva.

Se agregan la capacidad de corte, llamada, también mordiente o dureza de la herramienta.

Generalmente, una herramienta «mordiente» exige poca energía durante el corte, pero presentará un desgaste más rápido. Un justo equilibrio debe entonces encontrarse entre la dureza y el rendimiento.

El mordiente debe ser definido en condiciones precisas de trabajo y para materiales típicos. Depende de la propiedades de la liga (resistencia, dureza, cristalización, ...) de la calidad del diamante (friabilidad, forma...) del tamaño de los granos de diamante y de su concentración.

El estudio sistemático se efectúa sobre una máquina diseñada especialmente para permitir mediciones continuas:

- El husillo de la máquina está equipado de un torsiómetro y la mesa de un dinamómetro,
- El avance de la mesa es comandado hidráulicamente y su velocidad instantánea es controlada eléctricamente y registrada,
- las velocidades de rotación son regulables con variadores.

El conocimiento de la cupla necesaria para el aserrado, así como el esfuerzo horizontal sobre la mesa permite calcular las dos componentes del esfuerzo sobre el disco: La presión radial y la presión tangencial volcadas a la unidad de superficie del disco: cm.2. Se puede considerar en primera aproximación que la presión tangencial es la que representa el esfuerzo de aserrado y de frotamiento del disco. Para condiciones de trabajo idénticas, la presión tangencial más débil caracterizará al disco menos duro.

Montaje del torsiómetro

El torsiómetro montado sobre la máquina de ensayos se presenta bajo la forma de una caja con husillo de entrada y de salida. Este ha sido intercalado sobre el husillo motor de la máquina que ha sido cortado en dos partes montadas sobre doble rodamiento. Un limitador de cupla ha sido colocado del lado polea para proteger el torsiómetro.

El principio del aparato está basado sobre la torsión de un árbol de sección reducida y calibrada. El ángulo de torsión es proporcional a la cupla transmitida. La medida de este ángulo se efectúa por medio de un puente inductivo alimentado con 10 volts a 8 K Hz/seg. Unos transformadores rotativos permiten la entrada y salida de las señales eléctricas.

El desequilibrio del puente produce una señal modulada en amplitud que luego es decodificada y llevada a un aparato de registros.

Montaje de la mesa dinamométrica

La medida del esfuerzo horizontal en la piedra se efectúa igualmente por medida de la deformación de un elemento elástico en forma de anillo. La deformación del anillo es medida por medio de un transductor inductivo de desplazamiento. Este transductor está constituido por una doble bobina que constituye un semipunto, fig. 13. El desplazamiento de un núcleo en las bobinas determina un desequilibrio. La señal luego de su decodificación es proporcional al desplazamiento en la zona de medición y por consiguiente a la presión ejercida.

El anillo elástico se coloca entre dos mesas: una solidaria de la máquina y la otra sirviendo de portapiedra. La fijación a las mesas ha sido realizada por medio de rótulas que permiten una fácil alineación y la medida de los sólos esfuerzos de compresión o de tracción.

El conjunto se ha hermetizado con juntas de caucho y llenado de nitrógeno a una ligera sobrepresión.

Durante estos ensayos se procede igualmente a un recuento estadístico de los diamantes. En efecto, su número, la presencia de aristas cortantes, los arrancamientos... tienen una influencia primordial sobre el rendimiento.

El examen se efectúa al microscopio y los diamantes aparentes en la superficie son clasificados en : intactos, tendencia al pulido, a la trituración, poco aparentes, triturados a ras de la liga y arrancados.

Recuentos regulares demuestran así la evolución de la herramienta y se ha podido establecer los límites de empleo, el modo de desgaste o la eliminación de los diamantes y corregir así la dureza de la liga, la calidad del diamante, etc.

La tabla siguiente muestra los valores de rendimiento y de presión tangencial de un disco para granito en función de la concentración y del caudal de corte en un granito negro de Suecia y para el granito rojo Imperial.

Las características constantes son la liga (L 1005), la granulación (6), la calidad del diamante (sintético).

Concentración	NEGRO DE SUECIA				ROJO IMPERIAL			
	200 cm ² /min.		320 cm ² /min.		100 cm ² /min.		200 cm ² /min.	
	rend. η m ²	pression tg.kg/cm ²	η	pt.	η	pt.	η	pt.
20	93	4,18	35,6	4,25	21,27	6,58	13,51	7,32
25	103	4,9	56,8	5,9	23,9	9,02	20,32	10
30	129	5,3	75,7	6,4	26,9	9,8	27,32	11
35	142	5,7	—	—	30,3	10,9	27,5	13,4
40	130	5,7	125	9,3	35,2	12,6	29,8	14,6

Comparando estos valores de ensayo, puede concluirse que para esta liga y estos diamantes, el rendimiento absoluto y la presión tangencial aumentan juntamente con la concentración en todos los casos, salvo en concentración 40 en el Negro de Suecia al caudal de corte de 200 cm²/min., donde el rendimiento absoluto decrece.

El examen de los diamantes muestra que el 25 % son arrancados, por lo que el disco se consume por desgaste de la liga.

Al caudal de 320 cm./minutos los granos arrancados no representan más que el 12 a 15 % del total. El equilibrio de desgaste es por consiguiente mejor que el anterior.

En el granito rojo, la mayoría de los diamantes (50 %) tienden al pulido. Esto explica las presiones tangenciales elevadas y los rendimientos crecientes con la concentración.

El estudio completo de esta herramienta se hará por comparación con los rendimientos económicos en función de las condiciones de trabajo impuestas. En efecto, el precio de la herramienta aumenta con la concentración y el aumento del rendimiento absoluto puede no justificar una concentración elevada. Se deberá tener en cuenta igualmente el aumento del caudal de corte posible que influye directamente sobre los costos de amortización y mano de obra.

VENTAJAS ECONOMICAS DE LAS HERRAMIENTAS DIAMANTADAS ORGANIZACIÓN, PRECIO DE COSTO

Hemos podido ver hasta ahora que el uso de la herramienta diamantada presenta numerosas ventajas. Es sin embargo útil comparar los diversos métodos posibles para elegir el más económico. Esto puede hacerse bajo dos enfoques, ya sea substituir la herramienta diamantada a un método más antiguo, ya sea buscar entre las herramientas diamantadas los procedimientos más interesantes en función de los niveles de producción a alcanzar y del tipo de material a tratar.

Las tablas siguientes dan ejemplos de cálculos de precios de costo comparados:

1° En el caso de la substitución de una herramienta por otra diamantada para el recuadrado (partiendo de bloques brutos de cantera). Se trata en este caso de un mármol francés (Bretigny), tabla I.

En el ejemplo dado la producción con hilo diamantado es superior a la del hilo helicoidal con carburo de silicio para un mismo tiempo de uso. El precio de costo es más ventajoso para el hilo diamantado.

2° Siguiendo el enfoque de la elección de un método para el mismo problema de recuadrado y para producción de un nivel equivalente, obtenemos los valores de la tabla. Otra vez observamos que el hilo diamantado es más económico.

3° Comparando esta vez los métodos y niveles de producción podemos establecer las tablas III y IV.

Este último demuestra que para bloques de altura inferior o igual a 1 m. es el disco de diámetro 2.500 mm. que es el más rentable para ambos niveles registrados. Esto se explica fácilmente por el hecho que el caudal de corte horario varía según las dimensiones para un telar monolama, pero en menor grado para el hilo diamantado, y poco para los discos.

Recordaremos que se trata en estos ejemplos, de recuadrado, lo que implica el corte de una sola placa por vez. En la producción normal de placas por telares, se obtendría un precio de costo de 20 a 30 FB/m² sobre las mismas bases.

Estos pocos ejemplos muestran que para un caso simple los problemas encontrados para la creación, la modernización o la organización de una marmolería completa utilizando herramientas diamantadas.

Organización

Por regla general, se conocen los productos a obtener y su naturaleza. En función de estos elementos y de una primera elección de los telares, es posible determinar las dimensiones de los bloques a la entrada.

Se dará luego un esquema lógico de las operaciones y se estiman, partiendo del final de la cadena, los rendimientos y por consiguiente las cantidades de materia a procesar en cada puesto.

Puede luego calcularse los caudales reales de cada puesto, de acuerdo a los métodos elegidos, así como los tiempos de trabajos necesarios, los consumos resultantes de energía, agua, electricidad.

Es posible entonces calcular los precios de costos parciales y totales, los que podremos limitar a:

- amortizaciones
- mano de obra
- gastos de herramienta
- energía

Los cuales constituyen los elementos principales del precio de costo. Es necesario entonces ajustar los métodos en determinados puntos del proceso ya sea eligiendo otro tipo de máquina, aumentar los caudales, distribución de mano de obra, etc.

El esquema de la figura 14 siguiente, da la (articulación) de una empresa importante que produce 300 m². de grandes placas, 1.000 m². de mosaicos monolíticos y 200 m². de zócalos por día. La continuidad de las operaciones contempladas puede ser aplicada a empresas de menor importancia.

La misma empresa ha sido desarrollada en la fig. 15 con una breve descripción del tipo de máquinas utilizadas. Este esquema ha sido obtenido por medio de aproximaciones sucesivas. La elección final del proceso acarrea inversiones y precios de costo que aparecen en las tablas V, VI, VII.

CONCLUSIÓN

La introducción masiva de herramientas diamantadas bajo todas sus formas en el aserrado de materiales pétreos, ha sido beneficiosa según varios puntos de vista:

- producción elevada que permite satisfacer una clientela cada vez mayor.
- Reducción masiva de los precios de costo, especialmente en el caso de materiales que deben sufrir aserrados repetidos, como es el caso para la producción de placas, mosaicos monolíticos y zócalos.
- Calidad de los productos obtenidos.

Los fabricantes de herramientas diamantadas mejoran constantemente la calidad de sus productos y contribuyen de hecho a esta evolución.

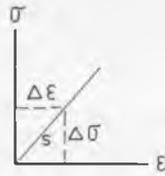


fig.1

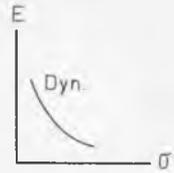


fig.2

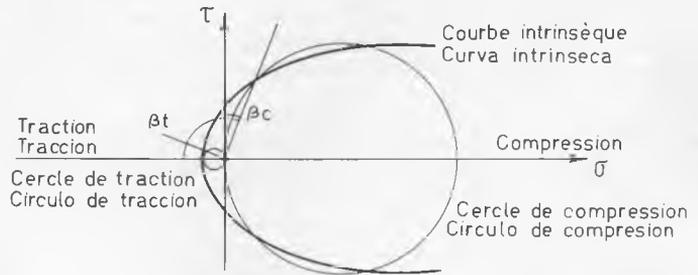


fig.3

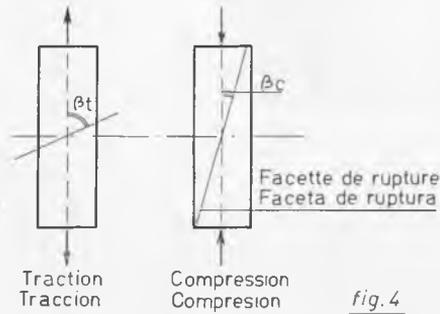


fig.4



fig.5

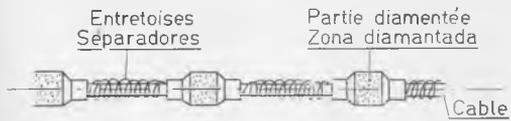


fig. 6



fig. 7

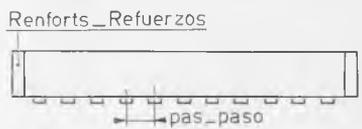


fig. 8

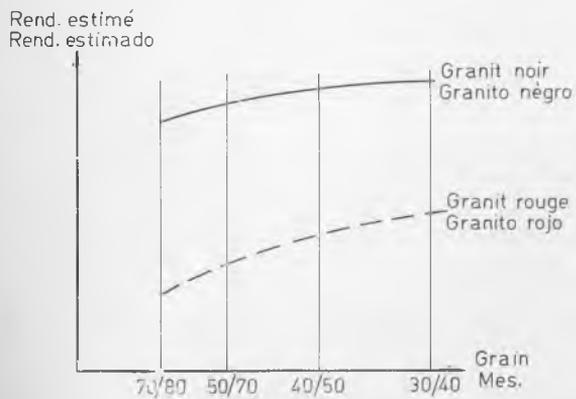


fig. 9

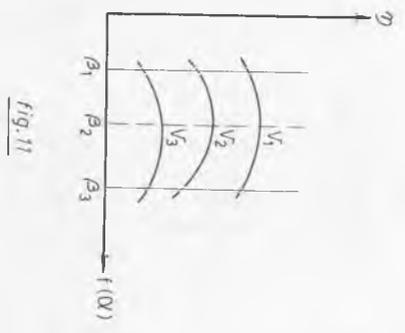


fig. 10

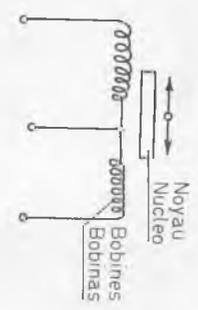
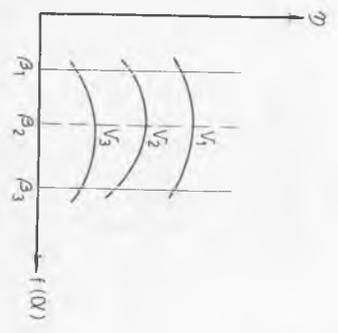


fig. 13



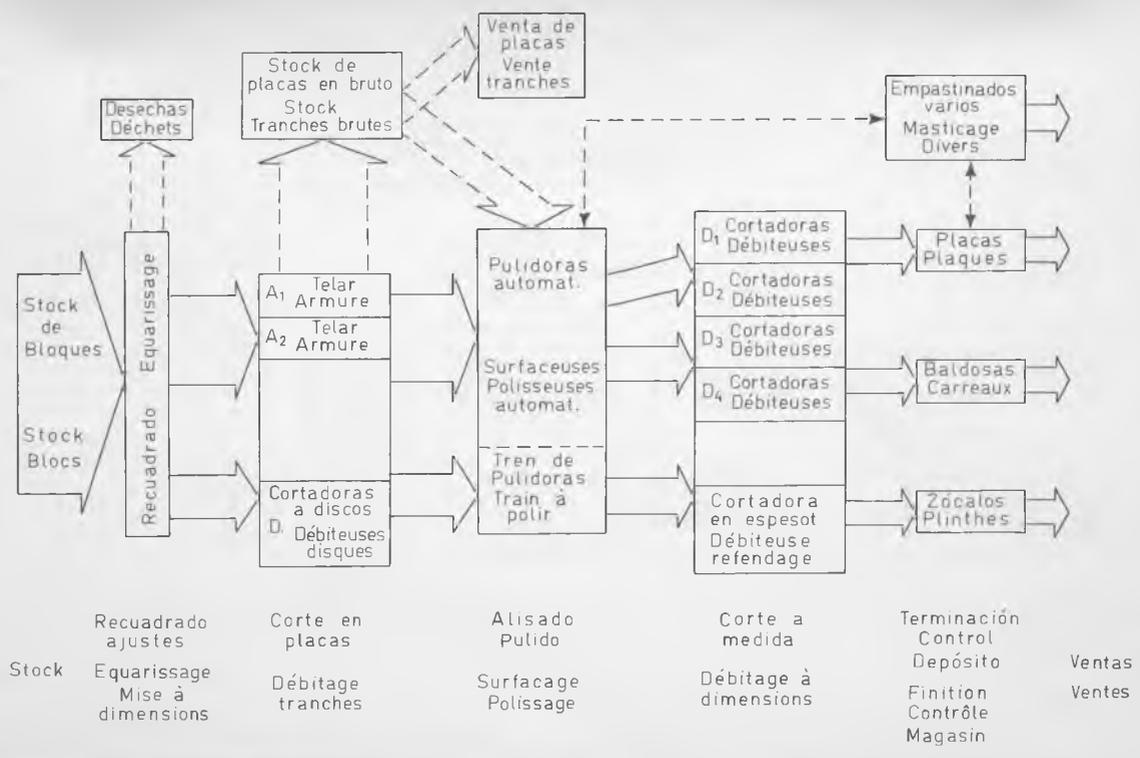
fig. 12

fig. 11



GRANDES EMPRESAS
GRANDES ENTREPRISES

fig. 14



Stock Equarissage Mise à dimensions
 Débitage tranches
 Surfacement Polissage
 Débitage à dimensions
 Finition Contrôle Magasin
 Ventas Ventes

TABLE II. — Elección de un metodo

Marmol Francés (Brétigny)

N. B. El disco no puede trabajar con bloques de más de 1 m. de altura.

Hilo Carborundum sobre 2.500 m ² /año		Hilo diamantado sobre 3.570 m ² /año		Monolama sobre 2.500 m ² /año		Disco Ø 2,50 m sobre 2.500 m ² /año	
	FB/m ²		FB/m ²		FB/m ²		FB/m ²
Amortización	17	Amortización	16,00	Amortización	37,70	Amortización	180
Carbura de silicio	22	Mano de obra	41,50	Mano de obra	66,70	Mano de obra	24
Cable	9	Cable diamantado	50,—	Herramientas	20,—	Herramientas	27
Mano de obra	120						
	168		107,50		126,40		231
Sea: 13,44 DM 2.100.— Liras 3,36 US 16,80 FF		Sea: 8,60 DM 1.343,75 Liras 2,15 US 10,75 FF		Sea: 10,11 DM 1.580.— Liras 2,52 US 12,64 FF		Sea: 18,48 DM 2.887,50 Liras 4,62 US 23,10 FF	
1 hombre		1 hombre/2 máquinas		1 hombre/3 máquinas		1 hombre	

Bases: Inversiones — Máquina a cable: 500.000 FB — { 40.000 DM 10.000 \$US
6.250.000 Liras 50.000 FF

— Monolama: 700.000 FB — { 56.000 DM 14.000 \$US
8.750.000 Liras 70.000 FF

— Disco: 2.000.000 FB — { 160.000 DM 40.000 \$US
25.000.000 Liras 200.000 FF

Amortización en 7 años de 220 días de trabajo/año.
Producción: hilo + carborundum 1,5 a 2 m²/h.
hilo diamantado 2 m²/h.
monolama 0,7 m²/h.
disco diamantado 5 m²/h.

TABLEAU III. — Sciage de grands blocs à différents niveaux de production à 13.50 heures par jour

Monolame					Fil diamanté			
6.600 m ² /an	13.200 m ² /an	22.000 m ² /an	23.500 m ² /an		6.600 m ² /an	13.200 m ² /an	22.000 m ² /an	12.000 m ² /an
3	6	10	6	nombre de machines nécessaires	2	3	4	2
44,50 61,— 5,—	44,50 61,— 5,—	45 61 5	44 59 5	Amortissement Main-d'œuvre * Énergie	20 40 3	17 40 3	16,50 36,— 3,—	16 34 3
110,50	110,50	111	108	Sous-total	63	60	55,50	53
20,—	20,—	20	20	Outils	50	50	50,—	50
130,50	130,50	131	128	Total en FB	113	110	105,50	103
10,44 DM 1631,25 Liras 2,61 US 13,05 FF	10,44 DM 1631,25 Liras 2,61 US 13,05 FF	10,48 DM 1637,50 Liras 2,62 US 13,10 FF	10,24 DM 1600,— Liras 2,56 US 12,80 FF	soit	9,04 DM 1412,50 Liras 2,26 US 11,30 FF	8,80 DM 1375,— Liras 2,20 US 11,— FF	8,44 DM 1318,75 Liras 2,11 US 10,55 FF	8,24 DM 1287,50 Liras 2,06 US 10,30 FF

* M.O. calculée sur débit horaire et partagé entre 2 ou 3 machines.

TABLEAU IV. — Sciage de blocs de hauteur maximum 1 m., de petite longueur : 1 à 2 m.

	Disque ø 2500		Monolame		Fil diamanté	
	6,600 m ² /an	13,200 m ² /an	6,600 m ² /an	13,200 m ² /an	6,600 m ² /an	13,200 m ² /an
	1	1	6	12	3	4
Nombre de machines	47	23,50	89	89	30	22
Amortiss./m ²	24	24,—	120	120	60	54
Main-d'œuvre *	10	10,—	10	10	6	6
Énergie	81	57,50	219	219	96	82
Sous-total	30	30,—	20	20	50	50
Outils	111	87,50	239	239	146	132
Total en FB	8,88 DM 1,387,50 Liras 2,22 US 11,10 FF	7,— DM 1,093,75 Liras 1,75 US 8,75 FF	19,12 DM 2,987,50 Liras 4,78 US 23,90 FF	19,12 DM 2,987,50 Liras 4,78 US 23,90 FF	11,68 DM 1,825,— Liras 2,92 US 14,60 FF	10,56 DM 1,650,— Liras 2,64 US 13,20 FF
<i>soit</i>						

* Main-d'œuvre calculée sur base de débit horaire.

Diámetro...
 TABLA V. — Grandes empresas. — Inversiones

<i>Operación</i>	<i>Maquinas</i>	<i>Inversiones</i>	<i>Amortización diaria sobre 220 días/año sobre 7 años</i>
Recuadrado de bloques (2 caras)	2 máquinas de hilo diamantado	FB 800.000	FB 520
Corte en placas	2 telares de 60 lamas	8.000.000	5.200
<i>Corte: Placas</i>	1 cortadora de un disco de Ø 500	400.000	260
<i>Baldosas</i>	1 cortadora multidisco con 5 discos de Ø 500	2.500.000	1.630
	1 cortadora multidisco con 9 discos de Ø 500		
Alisado y pulido	2 trenes de pulido ancho 800-900 para baldosas	2.600.000	1.690
	1 tren idem para placas	1.300.000	845
<i>Corte: bloques para zócalos</i>	1 cortadora de 2 discos Ø 1.200	1.500.000	975
<i>Grandes placas</i>	1 cortadora de 4 discos Ø 500	600.000	390
Corte a medida del largo	1 cortadora transversal	600.000	390
Pulido de 2 caras y 1 canto	1 pulidora especial combinada con la cortadora en espesor	700.000	455
Corte en espesor	1 cortadora de 2 discos Ø 350	600.000	390
		FB 19.600.000 (50 FB = 1 US)	

TABLA VI. — Grandes empresas. — Precios de costo. Placas y baldosas.

Máquina u operación	Costo diario total				Costo por m ² del producto				
	Amort.	herram.	M.O.	Agua Electr.	Amort.	herram.	M.O.	Agua Electr.	TOTAL
Recuadrado 2 máquinas de hilo diamantado	520	2.500	*	600	0,4	1,92	1,73	0,47	4,52
Corte: 2 telares de 60 lamas	5.200	30.000	*	7.000	4	23,10	2,77	5,40	35,27
Cortadora de baldosas: 5 discos Ø 500 + 9 discos Ø 950	1.630	1.800	1.250	735	1,6	1,8	1,25	0,75	5,40
Corte de placas	260	240	1.425	120	0,87	0,80	4,75	0,40	6,82
Alisado y pulido de placas y baldosas	850	4.200	900	1.400	2,85	14	3	4,70	24,54

* 1 operario para 2 máquinas
50 FB = 1 US

TABLA VII. — Grandes empresas. Costos-Zocalos.

Máquina u operación	Costo diario total				Costo por m ² del producto				
	Amort.	herram.	M.O.	Agua Electr.	Amort.	herram.	M.O.	Agua Electr.	TOTAL
Corte bloques 2 discos de Ø 1200	975	486	1.350	205	4,88	2,43	6,75	1	15,05
Corte placas al doble esesor	390	1.560	1.350	150	1,95	7,80	6,75	0,75	17,25
Corte medida en largo	390	180	1.500	150	1,95	0,90	7,50	0,75	11,10
Pulido	455	2.250	750 *	530	2,28	11,25	3,75	2,65	19,93
Corte en esesor	390	1.500	750 *	150	1,95	7,50	3,75	0,75	13,95

* Un solo operario puede manejar estas 2 máquinas
50 FB = 1 US