

T  
670  
CAI

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

"ANALISIS COMPARATIVO TECNICO ECONOMICO EN LA MECA  
NIZACION DE HILERAS DE TREFILACION POR PROCESOS NO  
CONVENCIONALES"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR:

LUIS WILFRIDO CAIZA CHAGLIA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1985

A G R A D E C I M I E N T O

AL ING. MANUEL HELGUERO G.  
DIRECTOR DE TESIS, POR SU AYU  
DA Y COLABORACION PARA LA REA  
LIZACION DE ESTE TRABAJO.

D E D I C A T O R I A

- A MIS PADRES

- A MIS HERMANOS



-----  
ING. EDUARDO ORCES P.  
DECANO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERIA MECANICA



-----  
ING. MANUEL HELGUERO  
DIRECTOR DE TESIS



-----  
ING. FREDDY CEVALLOS  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



-----  
ING. IGNACIO WIESNER  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).

-----  
LUIS WILFRIDO CAIZA CHAGLIA

## RESUMEN

El incremento y la difusión de la técnica de obtención de piezas mediante matrices, han sido cada vez mayores, y su aplicación en campos tecnológicos de alta precisión y dureza ha exigido la adopción de nuevos métodos y procedimientos de trabajo, que pueden garantizar una exactitud mayor de la que venía siendo obtenida siguiendo los métodos constructivos convencionales.

Entre las nuevas técnicas aplicadas a la fabricación y mecanización de matrices que las podemos clasificar entre las no convencionales están: el mecanizado por electro erosión, mecanizado por ultra-sonido, mecanizado químico y el mecanizado electro-químico, siendo algunos de ellos ampliamente usados en la actualidad.

Por su forma y dimensiones, y por el trabajo a realizar las hileras de trefilación deben ser maquinadas dentro de límites de tolerancia muy pequeños y grandes durezas, por lo que se hace necesario seleccionar un proceso de mecanización que permita ejecutarlo. Los procesos en los cuales vamos a maquinar las hileras son los siguientes: El de rectificación por abrasivo comúnmente utilizado en esta industria; y el mecanizado por electro erosión que tratamos de introducir en esta industria, por

razones que en esta tesis demostraremos.

Ambos procesos de mecanización se estudian en el presente trabajo, indicando inicialmente cómo se construyen y de que materiales están formadas y, como son mecanizadas las hileras de trefilación, para al final anotar unas tablas de valores de los diferentes programas de trabajo que se utilizan en maquinado por electroerosión y unas tablas de los diferentes diámetros de reducción del alambren.

Realizado un análisis técnico y económico de ambos procesos, aún resultando más caro el mecanizado por electroerosión que por abrasión se demuestra que, es técnicamente más efectivo, al final resulta más económico ya que mantiene las propiedades mecánicas de la trefila se consigue una rugosidad mucho más homogénea y una superficie mayor del depósito del lubricante, ángulo de entrada, lo que permite que la hilera mecanizada por este proceso trabaje con mejor resultado tanto en las dimensiones como en la duración de dicha hilera.

## INDICE GENERAL

	<u>PAGS</u>
RESUMEN-----	VI
INDICE GENERAL-----	VII
INDICE DE FIGURAS-----	XII
INDICE DE TABLAS-----	XV
INTRODUCCION-----	17
CAPITULO I	
HILERAS DE TREFILACION-----	19
1.1. TIPOS DE MATERIALES PARA SU FABRICACION-----	19
1.2. DISEÑO Y CONSTRUCCION-----	26
1.3. ACABADO SUPERFICIAL-----	32
1.4. TIEMPO DE VIDA UTIL-----	33
CAPITULO II	
MECANIZADO POR ELECTROEROSION-----	34
2.1. PRINCIPIO DEL PROCESO DE MECANIZADO-----	36
2.2. OPERACION DEL AVANCE SERVOCONTROLADO DE LA HERRAMIENTA-----	41
2.3. VOLUMEN DEL CRATER DE EROSION EN FUNCION DE LA ENERGIA DE DESCARGA-----	47
2.4. ESTADO DE LA SUPERFICIE MECANIZADA-----	50
2.5. LIQUIDO DIELECTRICO-----	54

	<u>PAGS</u>
2.6. ELECTRODOS-----	58
2.6.1. Cálculos de las dimensiones del elec trodo-----	65
2.7. TIEMPO DE TRABAJO-----	70
 CAPITULO III	
MECANIZADO POR ABRASION-----	72
3.1. HERRAMIENTA PARA RECTIFICADO: CARACTERISTI- CAS ESTRUCTURALES-----	76
3.2. CARACTERISTICAS TECNICAS QUE DEBE CUMPLIR EL ABRASIVO-----	77
3.2.1. Tipos de abrasivos más comunes-----	79
3.3. FORMACION DE VIRUTA EN EL PROCESO-----	81
3.4. DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE CORTE---	82
3.4.1. Parámetros de corte para trabajos en rectificado-----	84
 CAPITULO IV	
DESARROLLO EXPERIMENTAL-----	88
4.1. PREPARACION DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS----	88
4.2. MICRO ESTRUCTURAS DE LAS HILERAS A MECANIZAR SE-----	90
4.3. MECANIZACION DE HILERAS DE TREFILACION POR E LECTROEROSION-----	90
4.3.1. Diseño y construcción de electrodos	107
4.3.2. Selección de parámetros-----	111

	<u>PAGS</u>
4.3.3. Programa de desbaste-----	115
4.3.4. Programa de pulido-----	115
4.3.4.1. Implementos de control de me didias-----	115
4.3.5. Efecto de la acción de temporizador--	118
4.4. MECANIZACION DE HILERAS DE TREFILACION POR <u>A</u> BRASION-----	120
4.4.1. Diseño y construcción de herramientas- para rectificado-----	124
4.4.2. Selección de parámetros-----	127
4.5. RESULTADOS EN EL PROCESO DE ELECTROEROSION EN FUNCION DEL PROGRAMA DE PULIDO-----	128
4.5.1. Control dimensional-----	128
4.5.2. Dureza y rugosidad-----	131
4.5.3. Tiempo y costo de mecanización-----	133
4.6. RESULTADOS EN EL PROCESO DE RECTIFICADO DE- HILERAS POR ABRASION-----	140
4.6.1. Control dimensional-----	142
4.6.2. Dureza y rugosidad-----	144
4.6.3. Tiempo y costo de mecanización-----	146
CAPITULO V	
ANALISIS DE RESULTADOS-----	150
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	157

PAGS

APENDICES-----	160
BIBLIOGRAFIA-----	168

## INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
1	ESQUEMA DE UN PROCESO DE SINTERIZACION---	21
2	HILERA PARA TREFILAR ALAMBRE-----	28
3	HILERA DE CARBURO DE TUNGSTENO PARA ESTI- RAR ALAMBRE-----	31
4	COMPONENTES BASICOS DE UNA MAQUINA DE E- LECTROEROSION-----	35
5	TENSION APLICADA EN FUNCION DE LA DISTAN- CIA DE DESCARGA EN GAS Y LIQUIDO-----	37
6	PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL <u>E</u> ROSIONADO-----	38
7	PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL <u>E</u> ROSIONADO-----	38
8	PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL <u>E</u> ROSIONADO-----	39
9	PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL <u>E</u> ROSIONADO-----	39
10	PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL <u>E</u> ROSIONADO-----	40
11	ESQUEMA DE TRABAJO DE MAQUINA ELECTROERO- SIONADORA-----	43
12	SOPORTE HIDROSTATICO-----	46

## XIII

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
13	RELACION ENTRE LA ENERGIA DE CARGA Y EL VOLUMEN DEL MATERIAL EXTRAIDO-----	48
14	RELACION ENTRE EL DIAMETRO DE PROFUNDIDAD- DEL CRATER EN FUNCION DE LA ENERGIA DE CARGA-----	49
15	RELACION ENTRE EL VOLUMEN DEL MATERIAL ARRANCADO Y EL ESTADO DE LA SUPERFICIE-----	51
16	VOLUMEN DEL MATERIAL ARRANCADO EN FUNCION- DE LA SUPERFICIE DE ATAQUE-----	53
17	PORCENTAJE DEL DESGASTE DEL ELECTRODO- HERRAMIENTA Y PIEZA EN FUNCION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE-----	55
18	CIRCULACION Y INYECCION DEL LIQUIDO DIELECTRICO-----	59
19	CIRCULACION POR ASPERSION-----	59
20	CIRCULACION A CONTRA CORRIENTE-----	60
21	DIAGRAMA DE FUERZAS EN EL RECTIFICADO-----	73
22	FORMACION DE VIRUTA ARRANCADA POR UN GRANO ABRASIVO-----	74
23	MAQUINA DE ELECTROEROSION-----	91
24	MAQUINA DE RECTIFICAR HILERAS DE CARBURO DE TUNGSTENO-----	91
25	MICRO ESTRUCTURA DEL CARBURO DE TUNGSTENO-----	93
26	SUPERFICIE A OCUPAR EL CAMPO DE EROSION---	98
27	DIMENSIONES DEL ELECTRODO-----	109

## XIV

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
28	ELEMENTOS DE MANDO DEL GENERADOR-----	116
29	IMPLEMENTOS DE CONTROL DE MEDIDAS-----	117
30	MAQUINA RECTIFICADORA DE HILERAS-----	121
31	MAQUINA RECTIFICADORA DE AGUJAS-----	122
32	MAQUINA PARA PULIDO MANUAL-----	123
33	PRE-PULIDO DEL ANGULO DE ENTRADA DE LA <u>HI</u> <u>LER</u> A-----	125
34	PRE-PULIDO DEL ANGULO DE SALIDA DE LA <u>HILE</u> <u>RA</u> -----	126
35	MECANIZACION DEL ELECTRODO EN EL TORNO----	129
36	TOMA DE DIMENSIONES QUE DEBE TENER EL <u>ELEC</u> <u>TRODO</u> -----	130
37	INSTRUMENTO DE MEDICION DE DUREZA-----	132
38	CONTROL DE MEDIDAS DE HILERAS RECTIFICADAS POR ABRASION-----	143
39	INSTRUMENTO DE MEDICION DEL ESTADO DE LA <u>SU</u> <u>PERFICIE</u> -----	145
40	MICRO ESTRUCTURA DEL CARBURO DE TUNGSTENO MECANIZADO POR ELECTROEROSION-----	152
41	MICRO ESTRUCTURA DEL CARBURO DE TUNGSTENO- MECANIZADO POR ABRASION-----	153

## INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
1	CLASIFICACION DE CARBUROS CEMENTADOS-----	24
2	PROPIEDADES MECANICAS COMPRESIVAS TIPICAS-- DE CARBUROS SINTERIZADOS-----	25
3	CARACTERISTICAS DE DIELECTRICOS-----	57
4	VENTAJAS Y DESCENTAJAS DE VARIOS MATERIALES PARA ELECTRODOS-----	66
5	APLICABILIDAD DE VARIOS MATERIALES PARA E- LECTRODO-HERRAMIENTA-----	67
6	TAMAÑO DE GRANO DE LOS ABRASIVOS-----	78
7	DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 3,6 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	99
8	DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 4,16 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	105
9	DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 4,16 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	106
10	DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA - DE 3,6 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	112
11	DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA - DE 4,16 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	113
12	DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA DE 4,16 MM DE DIAMETRO DE SALIDA-----	114

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
13	RESULTADOS OBTENIDOS EN RECTIFICACION DE HILERAS POR ELECTROEROSION-----	141
14	RESULTADOS OBTENIDOS EN RECTIFICACION DE HILERAS POR ABRASION-----	149
15	POSICIONES Y VALORES RESULTADOS DE MAQUINA DE ELECTROEROSION-----	161
16	POSICIONES Y VALORES RESULTADOS DE MAQUINA DE ELECTROEROSION-----	162
17	POSICIONES Y VALORES RESULTADOS DE MAQUINA DE ELECTROEROSION-----	163
18	POSICIONES Y VALORES RESULTADOS DE MAQUINA DE ELELTROEROSION-----	164
19	NUMERO DE PASOS DE REDUCCIONES DE HILERAS- DE REFERENCIA QUE UTILIZA SOLECSA-----	165
20	DIAMETRO FINAL OBTENIDO CON SUS RESPECTIVAS TOLERANCIAS DE HILERAS DE REFERENCIA QUE U TILIZA SOLECSA-----	166
21	VALORES INDICATIVOS DE RUGOSIDAD PARA VA- RIOS MECANIZADOS-----	167

## INTRODUCCION

En la industria de trefilación de nuestro país, existe el problema de construcción y rectificación de las matrices de trefilar, que son fabricadas de carburo de tungsteno. Estas una vez variado el diámetro de salida por el trabajo realizado son abandonadas en algunos casos o trabajadas en un procesos de rectificación por medio del abrasivo, que indica el fabricante. Su costo de importación es muy elevado.

Las hileras de trefilar que han sido trabajadas en la reducción del diámetro del alambón, que es el elemento que se utiliza para la fabricación de electrodos para soldadura en SOLECSA, al ser rectificadas con abrasivo es poca la eficiencia que demuestran, al presentarse problemas de diámetros no controlados técnicamente, o a la forma ovalada con que sale el alambón de diámetro reducido el cual también suele romperse.

Existe una máquina herramienta del tipo no convencional, como es la máquina de electroerosión, en la que debido a su forma de trabajar se pueden maquinar las hileras originales y aquellas que han perdido sus diámetros de trabajo pero que aún tienen vida útil.

El presente trabajo estriba en recuperar las hileras que

han sido ya trabajadas y han perdido su diámetro original de salida, mecanizándolas por electro erosión y rectificado por abrasivo, efectuar un estudio técnico y económico de ambos procesos para evidenciar la benevolencia de cada uno de ellos y recomendar el de mayor eficiencia.

## CAPITULO I

### HILERAS DE TREFILACION

Una parte importante de cualquier trabajo de moldeo, es la matriz misma. Este es el corazón de la operación, ya que define el tamaño y forma del artículo moldeado; si el producto no es correcto el primer lugar para buscar la causa de la dificultad es la matriz.

En las operaciones de estirado se fuerza al metal a pasar a través de una matriz o hilera, mediante la aplicación de una fuerza de tracción al extremo del material que ya ha pasado por la matriz y aparece por la cara de salida; es decir que se lo fuerza a pasar por la matriz "tirando de él". Normalmente es parte de productos con simetría circular, aunque no es condición necesaria. La reducción de sección de una barra o varilla, por operaciones sucesivas de estirado, se llama estirado de una barra o varilla, y dentro de esta denominación genérica se llama trefilado al proceso de fabricación del alambre por estirado. Las matrices de estirar se pueden llamar hileras o dados, especialmente en el caso de trefilado.

#### 1.1. TIPOS DE MATERIALES PARA SU FABRICACION

Los carburos cementados usados para la fabricación de herramientas y moldes de estirar, consisten de carburos de tungsteno, titanio, molibdeno y tantalio, aglomerados en cobalto o níquel dúctiles. Los carburos

ros usados y las proporciones en que se emplean se seleccionan de acuerdo con la aplicación particular - que se va a dar al carburo, se construyen también de acero endurecido o de diamante.

Desde su introducción como material para hileras, hace algunos años, se ha hecho cada vez más frecuente el uso de carburo de tungsteno debido a la larga vida que ofrece su superficie dura. Actualmente es el material para hileras que más se usa.

Suponiendo que se va a fabricar carburo de tungsteno aglomerado con cobalto, las materias primas consistirán de carbono en forma de negro humo, óxido de tungsteno y cobalto en polvo. El óxido de tungsteno y el óxido de cobalto se calientan primero separadamente en una corriente de hidrógeno para reducirlos al estado metálico. El tamaño de las partículas de los polvos metálicos resultantes se controla hasta cierto punto, por la duración en la temperatura del proceso de producción. La figura N° 1 muestra el esquema de un proceso de sinterización.

El polvo de tungsteno se muele aún más fino, mezclándolo con el negro humo en las proporciones moleculares correctas para dar carburo de tungsteno, y la mezcla se calienta a unos  $1.500^{\circ}$  C. por dos horas en una atmósfera neutra. La masa de carburo de tungsteno que se produce, se muele entonces en un molino de

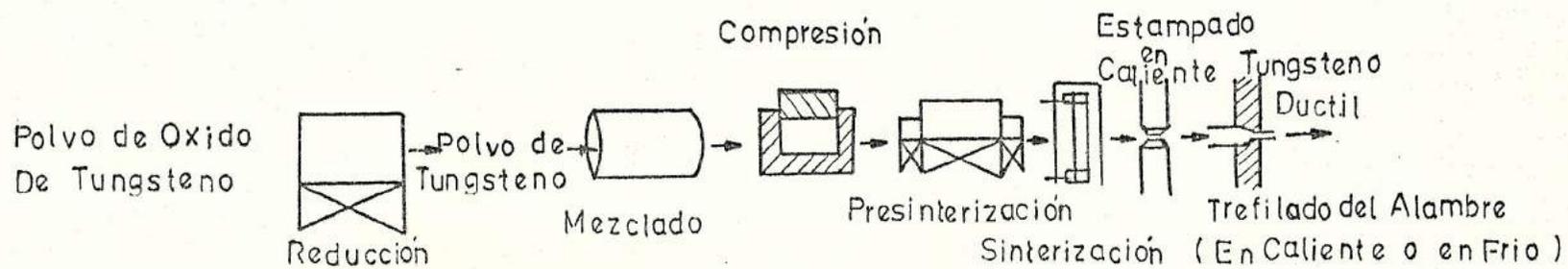


FIGURA N° 1.- ESQUEMA DE UN PROCESO DE SINTERIZACION

bolas de manera que la partícula resultante es del orden de 20 micras.

El carburo de tungsteno molido se mezcla íntimamente con polvo de cobalto de manera que las partículas de carburo se revisten con una película de polvo de cobalto que da la cohesión necesaria durante el estado subsiguiente de sinterización. Se puede agregar también en este caso una pequeña cantidad de glicerina a la mezcla, ya que ésta ayuda al proceso de compactado. La compactación de la mezcla se lleva a cabo en moldes de acero duro, a presiones de 1.4 a 2  $\text{ton/cm}^2$ , siendo el volumen del material compactado resultante de las dos terceras partes de los polvos mezclados. En esta parte del proceso las dos partes compactadas son suficientemente robustas para ser manejadas con precauciones razonables.

Se da luego un tratamiento preliminar de sinterización a  $850 \div 1000^\circ\text{C}$ . en una atmósfera controlada, y los componentes tienen ya la resistencia suficiente para ser conformados por los procesos ordinarios de máquinas herramientas. La sinterización final generalmente se lleva a cabo en hornos eléctricos tubulares a través de los cuales pasa una corriente de hidrógeno seco, siendo el tiempo de tratamiento superior, generalmente a 90 minutos, según el espesor de la sección. La temperatura usada se encuentra en la

región de  $1350 \div 1550^{\circ}\text{C}$ . la distorsión durante esta operación a altas temperaturas se reduce al mínimo - cargando los componentes sobre soportes especiales que se ajustan a sus controles. Después de la sinterización, se permite a los componentes enfriarse lentamente a la temperatura ambiente.

Los carburos pueden clasificarse dentro de dos grandes categorías; a) los grados con sólo carburo de tungsteno utilizados principalmente para maquinar - hierro fundido, acero austenítico, materiales no ferrosos y no metálicos; b) los grados que contienen mayores cantidades de carburo de titanio ( $\text{TiC}$ ) y carburo de tantalio ( $\text{TaC}$ ), utilizados principalmente para maquinar acero ferrítico. En la tabla N° 1 aparece una clasificación más detallada de los carburos - en base a su composición.

El excepcional desempeño como herramienta del carburo sinterizado resulta de la alta dureza y gran resistencia compresiva. La mínima dureza del carburo sinterizado es aproximadamente la misma que la máxima dureza disponible en aceros para herramientas. La tabla N° 2 muestra las propiedades mecánicas compresivas típicas de carburos sinterizados.

Las hileras de acero no son muy utilizadas debido a las enormes fuerzas friccionales que se desarrollan en ellas. Las hileras de carburo de tungsteno cemen-

TABLA N<sup>o</sup> 1

## CLASIFICACION DE CARBUROS CEMENTADOS

Grupo carburo	composición por centaje WC dual Co	por resi- (T <sub>ac</sub> +T <sub>ic</sub> )	Dureza R <sub>A</sub>	Aplicaciones Típicas
CARBURO DE TUNGSTENO PURO				
1	2.5 ÷ 6.5;	0-3	; 93-91	troqueles para cargas aplicadas con poco impacto.
2	6.5 - 15	; 0-2	; 92-85	troqueles para cargas aplicadas con impacto moderado.
3	15 - 30	; 0-5	; 88-85	troqueles para cargas aplicadas con gran impacto.
CARBURO AGREGADO PREDOMINANTEMENTE T <sub>ic</sub>				
4	3 - 7	; 20-42;	93.5-92	Ligeros cortes finales a alta velocidad en acero
5	7 - 10	; 10-22;	92.5-90	cortes y velocidades medios en acero
6	10 - 12	; 8-15	; 92-89	Burdos cortes en acero.
CARBURO AGREGADO PREDOMINANTEMENTE T <sub>ac</sub>				
7	4.5 - 8	; 16-25	; 93-91	Ligeros cortes en <u>a</u> cerro
8	8 - 10	; 12-20	; 92-90	grandes cortes en <u>a</u> cerro.
CARBURO AGREGADO EXCLUSIVAMENTE T <sub>ac</sub>				
9	5.5 - 16	; 18-30;	91.5-84	Aplicaciones que requieren resistencia al desgaste particularmente donde hay calor.

TABLA N° 2

PROPIEDADES MECANICAS COMPRESIVAS TIPICAS DE CARBUROS SINTERIZADOS

Grupo carburo	Resistencia compresiva KG/cm <sup>2</sup>	Límite Elástico KG/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad KG/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>6</sup>	Razón de poisson	Ductilidad %	Resistencia a cargas aplicadas con impacto KG-m.	Límite a la fatiga KG/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup>
1 (3%Co)	46591	37879	7,95	0,24	0,6	--	--
2 (6%Co)	46515	21666,67	7,95	0,28	0,85	0,1	7,99
3 (10%Co)	45454,5	9469,7	6,59	0,20	1,90	0,152	7,95
4 (16%Co)	41287,8	7197	5,75	0,22	2,70	0,2415	--
5	47348,5	17424,2	5,91	0,22	1,00	0,082	6,81
6	46378,8	7348,5	6,06	0,22	2,0	0,055	6,81
7	48106	13106	6,21	0,21	0,9	--	--
8	47803	18939,4	6,13	0,22	1,0	0,082	6,44
9	53404,1	18181,8	6,51	0,22	1,7	0,082	6,44

Los valores para resistencia de cargas aplicadas con impacto se tomaron de muestras no muescadas en secciones cuadradas de aproximadamente 6.35 mm. Los valores para el límite a la fatiga se basan en ciclos de esfuerzos de 20 millones, para muestras del tipo de haz rotatorio.

tado, tal como el carboloy, se usan por lo regular - para tamaños de hasta 0,50 mm. de diámetro. Para - tamaños más pequeños se prefieren generalmente las hileras de diamante.

Se puede producir un rompimiento excesivo del alambre, fallas de tensión, cuando se usan dados de carburo de tungsteno en los tamaños más pequeños, a causa de la fricción excesiva. Por otra parte, los dados de diamante tienen una tendencia mínima a asirse durante el estirado, debido a su dureza extemada. Es característico de los dados de diamante que si uno grafica el costo del dado contra el tamaño, la curva pasa a través de un mínimo en la vecindad de los 0.125 mm. de diámetro. La razón para esto será en que con tamaños grandes, el costo del diamante - es el factor determinante, mientras que para los tamaños más pequeños el costo aumenta por la dificultad de horadar y desbastar con seguridad hoyos en hileras muy pequeñas.

#### 1.2. DISEÑO Y CONSTRUCCION

La fuerza de tracción total necesaria para estirar un alambre a través de la hilera, es la suma de la fuerza necesaria para causár deformación del metal por compresión transversal y corte y la fuerza requerida para vencer la fricción entre el alambre y la

superficie del dado. En consecuencia, cualquier aumento de fricción disminuye la cantidad de reducción que puede darse al alambre en un solo paso, y es por tanto importante que la fricción se reduzca al mínimo por lubricación eficiente y diseño correcto de la hilera.

Una hilera para estirar alambre consiste de un agujero cónico, cuya superficie debe ser tersa, hecho en un material de resistencia mecánica al desgaste muy considerable. La figura N° 2 muestra una hilera típica para trefilar alambre. La hilera en si está formada por las siguientes partes:

- 1.- La campana o cono.
- 2.- El ángulo de entrada.
- 3.- El ángulo de ataque o de hilera
- 4.- La superficie de apoyo.
- 5.- El relevador posterior.

La campana es el radio grande en la entrada de la hilera y sirve realmente para guiar al alambre punteado hacia el ángulo de entrada, sección AB, el cual es suficientemente grande y sirve como recipiente del lubricante que es arrastrado por el trabajo y ha de entrar en la hilera. Este ángulo puede variar desde unos 12 grados para los metales más duros, hasta 30 grados para metales suaves. El ángulo de ataque o de aproximación corresponde a la sección cóni

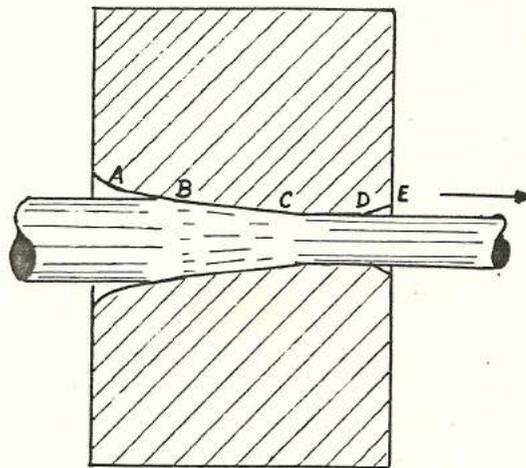


FIGURA Nº 2.- NUCLEO DE CARBURO DE TUNGSTENO  
DE HILERA PARA TREFILAR ALAMBRE

ca BC de la hilera en la que se produce la reducción real del diámetro del alambre. Es aquí donde se verifica la deformación plástica; por lo tanto es la parte del dado que debe ser más cuidadosamente diseñada y preparada. El ángulo de ataque, ángulo de la hilera, es crítico y depende tanto del metal que se va a estirar, como del material que está hecha la hilera. Su superficie debe pulirse para reducirse a un mínimo la fricción, de manera que la reducción requerida puede obtenerse con la fuerza de tracción mínima posible. La superficie de apoyo, sección CD, es generalmente cilíndrica y debe ser de longitud adecuada, de manera que al desgastarse la parte de trabajo del dado, el diámetro del alambre permanezca dentro de las especificaciones; sirve de guía cuando la varilla de alambre sale de la hilera y tiende a proporcionarle una superficie suave. El relevador, la parte DE, sirve para dar refuerzo a la sección de trabajo del dado y evitar que la orilla circular de éste sea rota o desprendida.

El diseño de las hileras para trefilado constituye un arte y aparentemente no existen reglas definidas para escoger un ángulo de entrada óptimo, longitud de la superficie de apoyo, etc.

Una característica muy importante de la hilera es su semiángulo, llamado también más sencillamente,

ángulo de la hilera. Cuando los ángulos de la hilera son grandes, se produce mayor deformación por cizallamiento y es necesario aumentar la fuerza de tracción en el centro del alambre, lo que puede ser causa de que al sobrepasarse la resistencia a la tracción, se produzcan grietas en forma de copa. Para un ángulo de hilera determinado, disminuye la importancia de la deformación por cizallamiento al aumentar el tanto por ciento de reducción. Por esta razón para reducciones grandes son preferibles los tratamientos teóricos que desprecian la deformación por cizallamiento. Debido a la deformación de cizallamiento de las capas superficiales, los valores de resistencia a la tracción y el límite elástico de los alambres estirados con ángulo de hilera grande, son muy elevadas. Este efecto es mayor cuanto más pequeñas son las reducciones.

Como el carburo de tungsteno, debido a la larga vida que ofrece su superficie dura, es el material que actualmente más se está utilizando. Puesto que es costoso y algo frágil sólo la parte de trabajo de la hilera se hace de este material, que se sujeta en un bloque de acero dulce, como se muestra en la figura - Nº 3.

Además de una larga vida entre operaciones de reajus

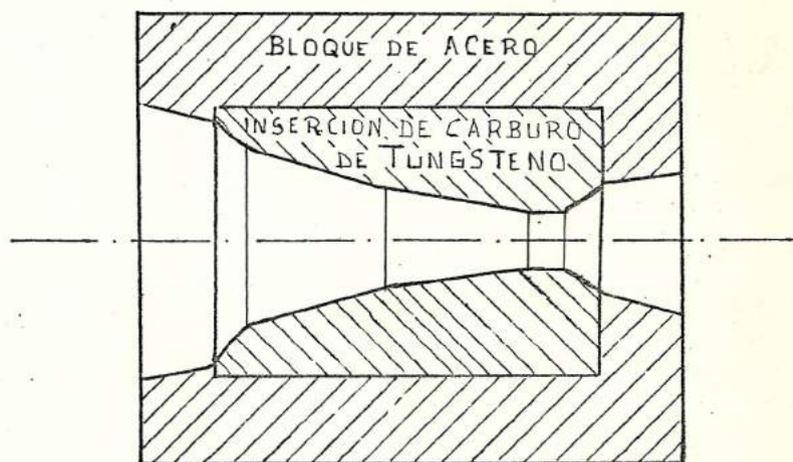


FIGURA N° 3.- HILERA DE CARBURO DE TUNGSTENO PARA  
ESTIRAR ALAMBRE

te, se consume menos potencia cuando se usan hileras de carburo de tungsteno, debido a menor fricción; también se obtiene una mejor superficie en el alambre resultante. El costo inicial de la hilera de carburo de tungsteno, sin embargo es considerablemente más alto que el de una hilera de acero y no pueden martillarse los agujeros a desbastarse. En lugar de esto, se abre al siguiente tamaño de trabajo.

### 1.3. ACABADO SUPERFICIAL

El conjunto de las diferencias entre la superficie real y la superficie técnica constituye la aspereza. Como medida de la aspereza se toma la amplitud  $R_a$  del valor medio de los valores absolutos de las diferencias donde  $R_a$  se expresa en micras ( $\mu$ ). Es importante el valor de la rugosidad de la hilera ya que de ello depende el valor que tenga el coeficiente de fricción ( $f$ ) entre la hilera y el alambre. La fricción entre la hilera y el alambre origina tensiones-cizallantes a lo largo de las superficies en contacto del alambre. La fricción aumenta con la rugosidad, lo cual aumentaría la fuerza del estirado, pero disminuye apreciablemente para altas velocidades. Algunos valores típicos que se toman para la rugosidad de las hileras va entre  $0,8 \div 8 \mu m$ , y un coeficiente de fricción  $f = 0,05 \div 0,15$  para el estirado -

en frío empleando matrices con superficies pulimentadas duras y lubricantes eficaces.

#### 1.4. TIEMPO DE VIDA UTIL

La vida de una hilera en particular se puede definir como el número total de horas de trabajo a una velocidad constante dada requerida para que se desarrollen criterios de falla. Si la lubricación es correcta y se hace trabajar a la temperatura razonable, entonces la fatiga del metal será la única causa posible de falla; la falla por fatiga se manifestará como agrietamiento o picaduras en la superficie de contacto de la hilera. Los diferentes acabados de la superficie, obtenidos por los distintos procedimientos de mecanizado pueden afectar apreciablemente al comportamiento en fatiga. En las superficies cuidadosamente pulidas en donde la rugosidad superficial es muy pequeña tendrá una duración media en fatiga mayor que una superficie pulimentada de mayor rugosidad superficial.

## CAPITULO N° 2

### MECANIZADO POR ELECTROEROSION

Se entiende por electroerosión la eliminación de partículas de materiales por la acción de descargas eléctricas. Para realizar este mecanizado, se provoca entre el electrodo-herramienta y el electrodo-pieza, una sucesión de descargas, con gran intensidad instantánea, que se producen en un líquido dieléctrico, que es frecuentemente una mezcla de hidrocarburos.

Estas descargas se producen en diversos puntos del electrodo-herramienta y se forma progresivamente un hueco en el material que se trabaja; este hueco tiene exactamente la forma del electrodo-herramienta.

El uso de descargas eléctricas para cortar impone muchos requerimientos especiales, mostrados esquemáticamente en la figura N° 4, no asociados normalmente con las máquinas herramientas convencionales. El material que se trabaja es uno de los electrodos entre los cuales ocurren las descargas, chispas eléctricas, y debe ser de material eléctricamente conductivo. El electrodo-herramienta, también debe ser hecho de material eléctricamente conductivo; es localizado muy próximo pero no en contacto con la pieza durante el corte.

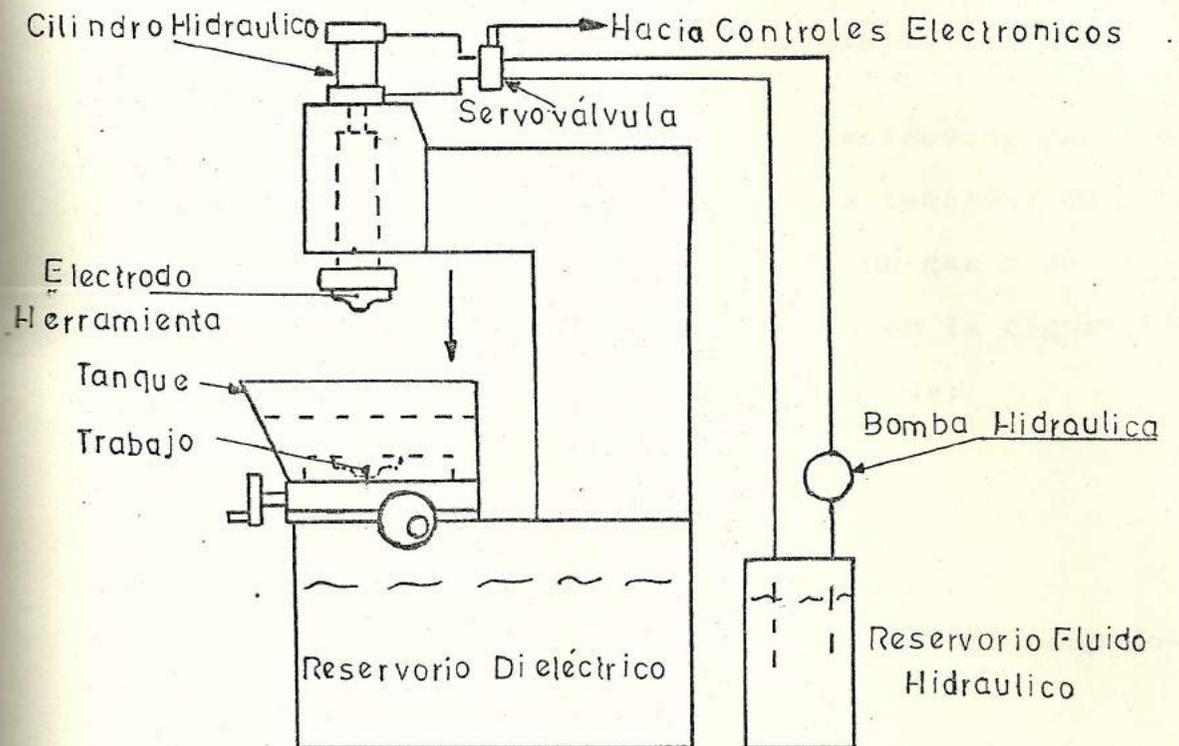


FIGURA Nº 4.- COMPONENTES BASICOS DE UNA MAQUINA  
DE ELECTROEROSION

## 2.1. PRINCIPIO DEL PROCESO DE MECANIZADO

Como se ha dicho la mecanización por electro erosión se realiza siempre con dos electrodos inmersos en un fluido de trabajo, que es a la vez dieléctrico; esto es un líquido de alta resistividad.

La distancia necesaria tras los electrodos, para el paso de la chispa a una determinada tensión, es diferente según la descarga venga de un gas o de un líquido dieléctrico, como se muestra en la figura N°

5. Esta tensión de descarga depende de:

La distancia entre los dos electrodos.

El poder aislante del dieléctrico.

El estado de preparación del GAP.

GAP: interespacio entre los dos electrodos ocupado por el líquido dieléctrico usado.

El principio físico puede ser así sintetizado:

Bajo la acción de un fuerte campo eléctrico (figura N° 6), se liberan los iones positivos y los electrones se aceleran adquiriendo velocidad y por lo tanto rápidamente constituyen un canal ionizado, un conductor ideal (figura N° 7).

A esta parte, la corriente eléctrica puede circular y la descarga se estabilizará entre los dos electrodos, provocando una infinidad de colisiones entre las partículas; se viene a crear así un plasma de

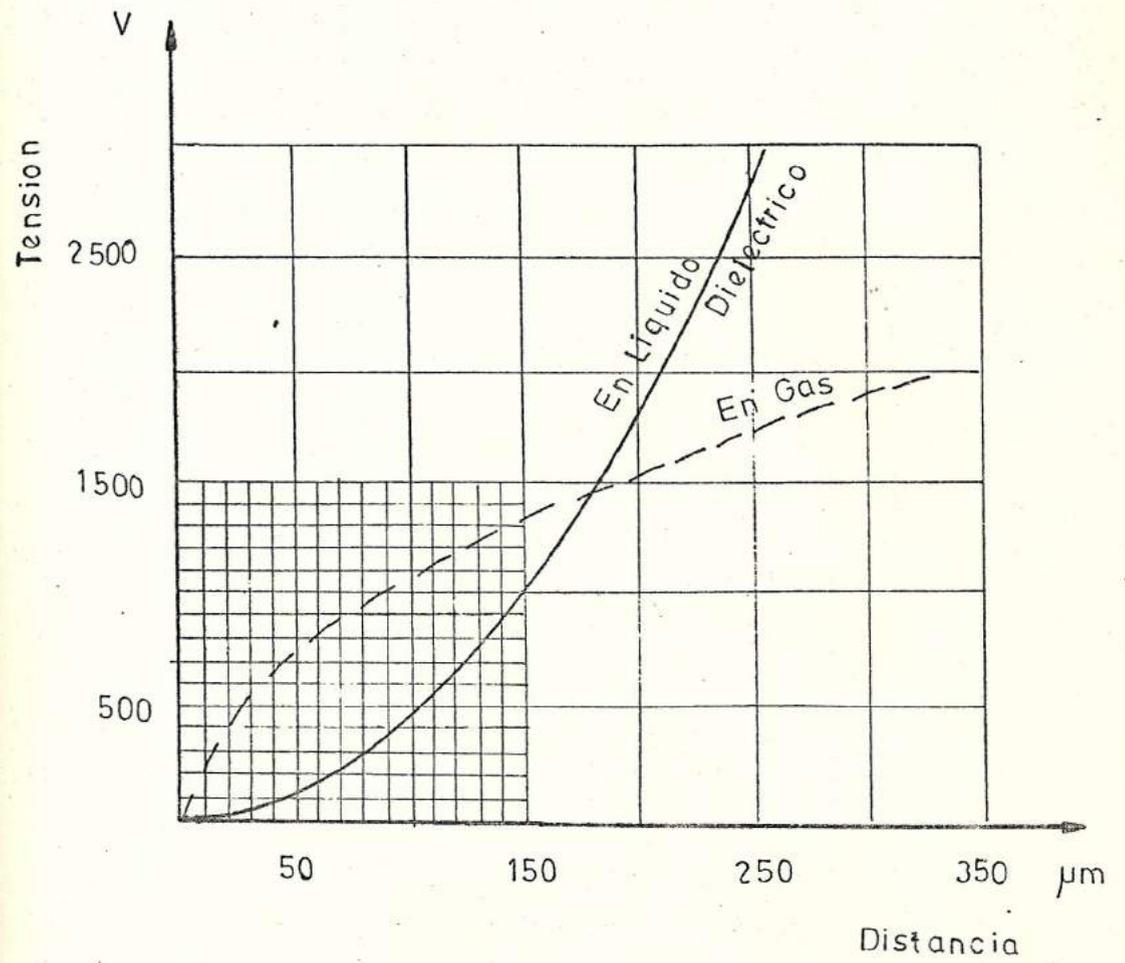


FIGURA N° 5.- TENSION APLICADA EN FUNCION DE LA DISTAN  
CIA DE DESCARGA

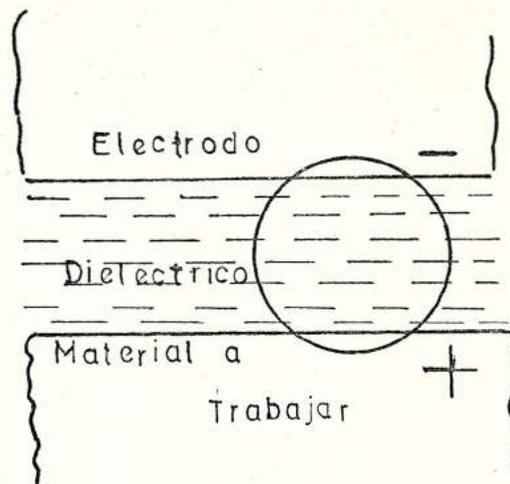
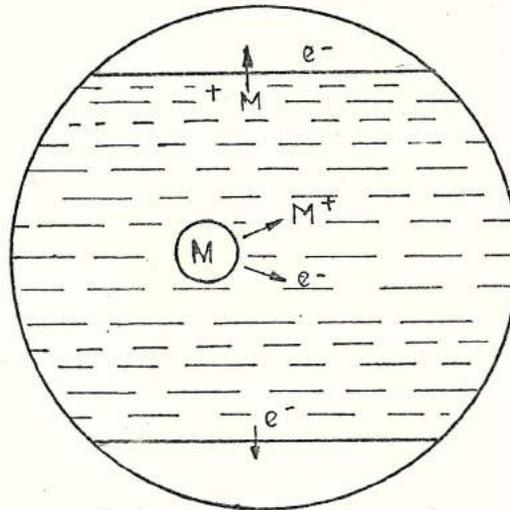


FIGURA Nº 6



FIGURAS Nº 6 y Nº 7.- PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL EROSIONADO

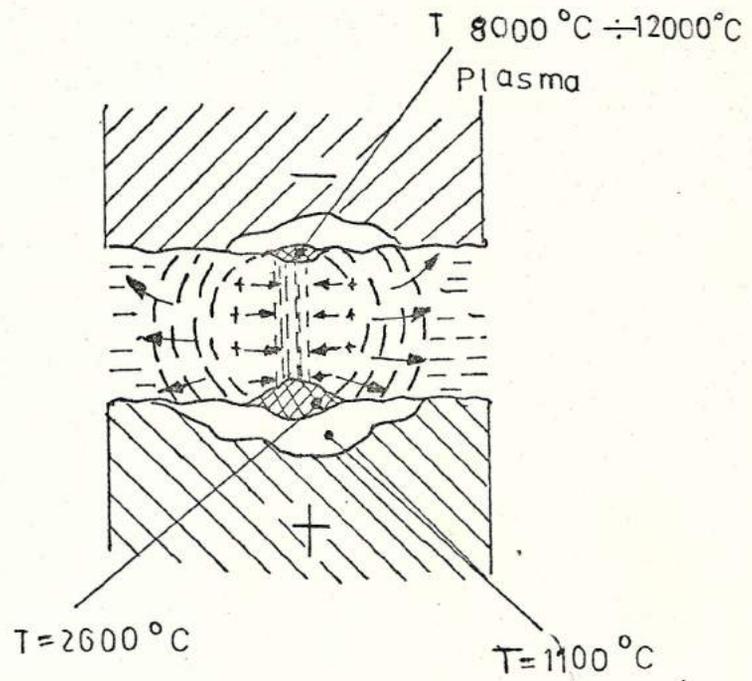
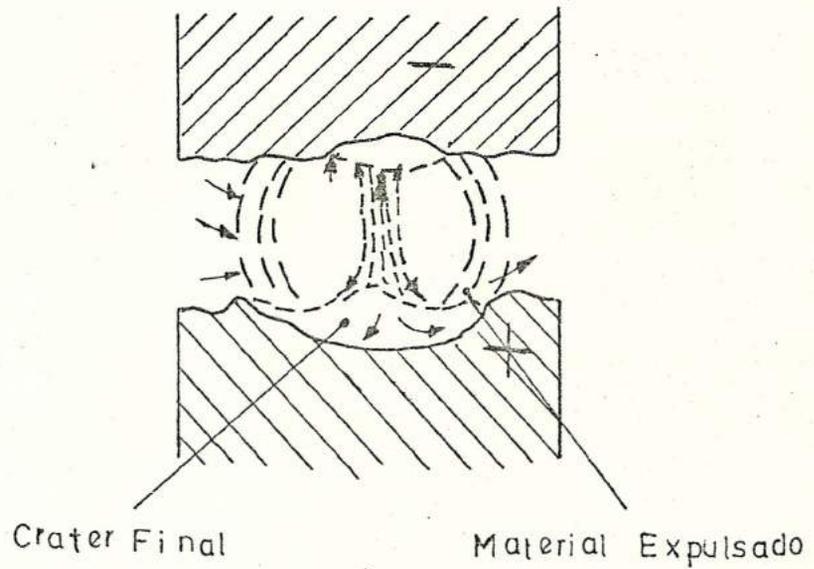


FIGURA N° 8



FIGURAS N° 8 Y N° 9.- PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL EROSIONADO

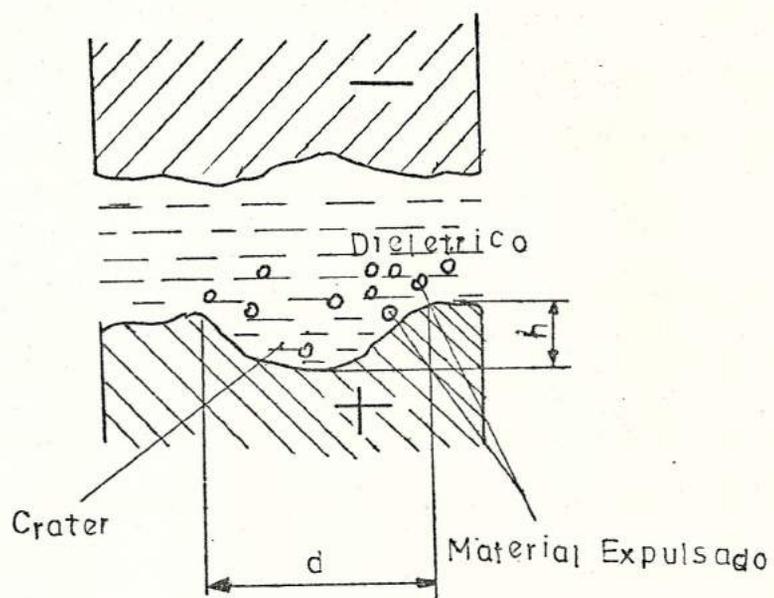


FIGURA Nº 10.- PRINCIPIO FISICO DE COMO SE PRODUCE EL EROSIONADO

descarga con intensidad valorable en  $10^7 \div 10^8$  Amperes/Segundos.

Se crean temperaturas del orden de los  $8000 \div 12000$  grados centígrados que determinan la fusión local de una cierta cantidad de material metálico; al mismo tiempo una bola de gas debido a la vaporización, sea de los electrodos como del dieléctrico, se desarrolla velozmente (figura N° 8).

Al momento de la interrupción de la corriente eléctrica, la brusca disminución de la temperatura provoca la explosión de la bola con el efecto proyectivo de material fundido al exterior del cráter (figura N° 9).

El material erosionado se resolidifica en el líquido dieléctrico bajo la forma de pequeñas esferas que serán sucesivamente evacuadas por medio del dieléctrico (figura N° 10).

## 2.2. OPERACION DEL AVANCE SERVOCONTROLADO DE LA HERRAMIENTA

El principio de funcionamiento de un servo-mecanismo electro-hidráulico aplicado a una máquina para electroerosión se muestra en la figura N° 11, el cual es el siguiente: el movimiento de electrodo es asegurado para un piston diferencial, que se des -

plaza dentro de un cilindro. La superficie pequeña es sujeta a una presión  $P$ , engendrada para una bomba, mientras sobre la superficie mayor obra la presión  $P'$ , su valor es fijado para la proporción de las superficies del pistón. Esta presión  $P'$  resulta de la caída de  $p = P - P'$  a que es sujeto el aceite durante su tránsito por el diafragma y está determinado por un cierto caudal. El movimiento del pistón es provocado por una variación del caudal del flujo del aceite en el servo-mecanismo. Este es constituido por una bobina electromagnética que obra sobre una válvula de escape.

Sobre la bobina es aplicada la tensión de trabajo, es decir la tensión entre el electrodo y la pieza, que con una resistencia intermedia permite a una corriente circular en la bobina. Esta corriente crea un campo magnético que obra sobre un electromagneto que acciona la válvula de escape.

Si la tensión de trabajo varía, por ejemplo una subida debido a un engrandecimiento de la distancia entre el electrodo y la pieza causado para la expulsión del material, también la corriente que circula en la bobina varía, y en el mismo sentido, porque la resistencia es fija. El equilibrio será roto y el activador obrará sobre la válvula de es-

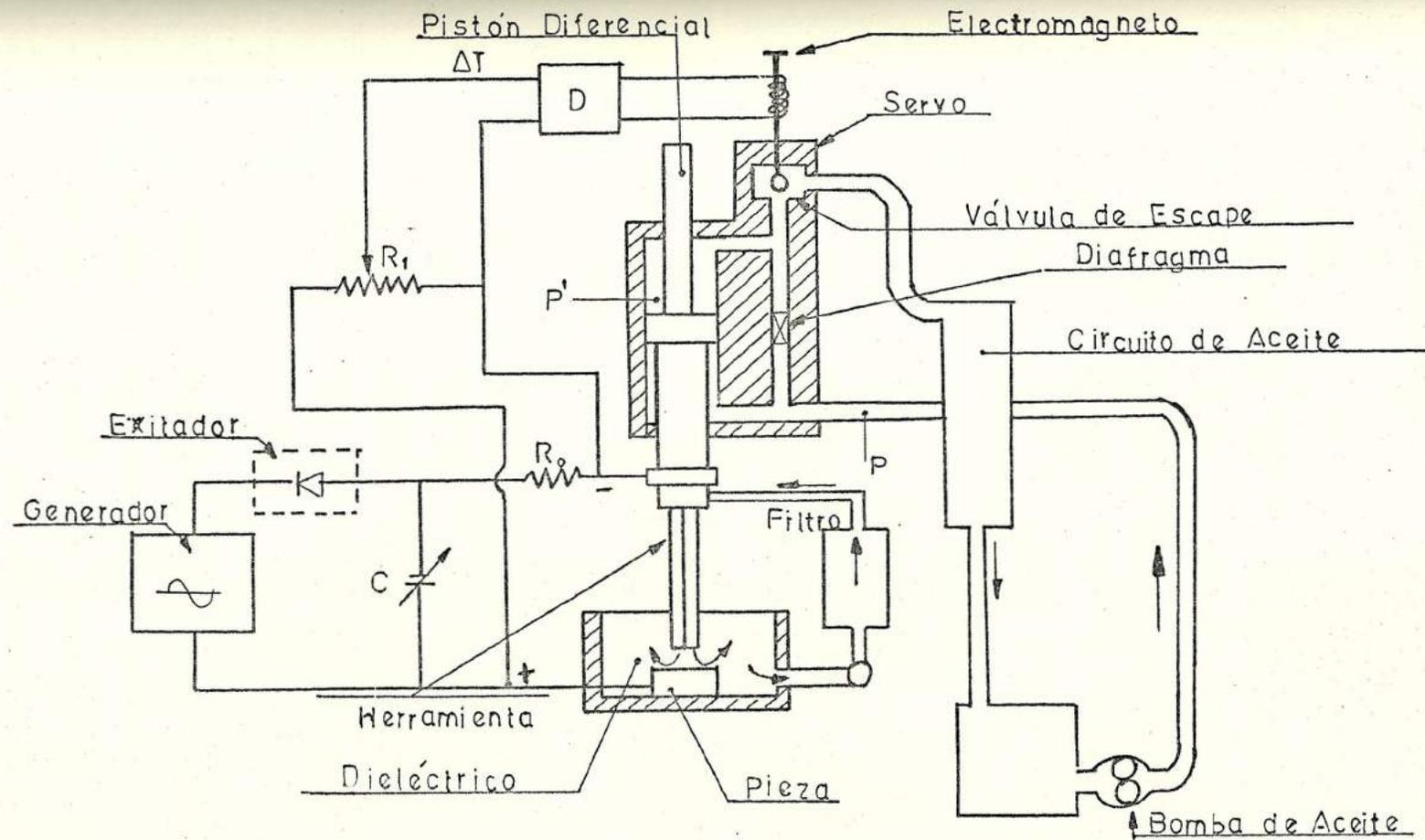


FIGURA N° 11.- ESQUEMA DE TRABAJO DE MAQUINA ELECTROEROSIONADORA

cape del pistón.

Si en el ejemplo precedente, ocurre un alejamiento del electrodo en comparación con la pieza, la tensión de trabajo sube provocando al mismo tiempo una subida de la corriente que circula en la bobina. Esta variación se transforma en una subida del campo magnético que permita a la válvula de escape cerrarse.

La cantidad de aceite que no puede fluir más por la válvula de escape va ahora a la cámara superior del cilindro y empuja al pistón diferencial hacia abajo, es decir hace aproximar al electrodo-herramienta hacia la pieza y por esto hace disminuir la tensión de trabajo.

El movimiento se acaba cuando el equilibrio es recreado, o sea tensión y corriente de equilibrio - restablecidas, y el servo-mecanismo deja fluir la cantidad de aceite correspondientes a la cantidad-faltante a la condición de equilibrio.

El movimiento vertical, desde abajo hacia arriba - del pistón es provocado en el modo contrario. La válvula de escape se abre sobre la posición de equilibrio dejando fluir la cantidad de aceite, que - comprende el caudal de equilibrio que viene desde - el diafragma y la parte que queda y fluye desde la

cámara superior del cilindro lo que provoca la subida del pistón.

Un mandril cilíndrico de sección es montado en un - soporte hidroestático compuesto de cuatro cámaras, - el cual da una contestación rápida para mantener el Gap. Estas son alimentadas de aceite bajo presión a través de conductos en los que fue puesto un dia<sup>fragma</sup> E. La evacuación del aceite ocurre a través de la abertura de las 4 cámaras.

Suponemos ahora que el mandril supuesto a una fuerza radial (D) que obra de la izquierda a la derecha, es desplazada en el soporte como indica la figura N<sup>o</sup> 12. La salida del aceite de equilibrio en la cámara 3, bajará provocando una disminución de - la pérdida de descarga en el dia<sup>fragma</sup> E 3. Así la presión en la cámara 3 subirá y el mandril será empujado a la izquierda.

En la cámara 4 hay el fenómeno invertido. El desplazamiento del mandril provoca una subida del aceite, con pérdida pequeña en el dia<sup>fragma</sup>. El mandril habrá subido provocando una mayor pérdida de carga. Esto provocará una reducción de presión en la cámara 4 lo que facilitará el regreso del mandril al - centro. Los soportes hidroestáticos tienen de - esta manera la posibilidad de garantizar una perfecta "puesta al centro" y están caracterizados de una

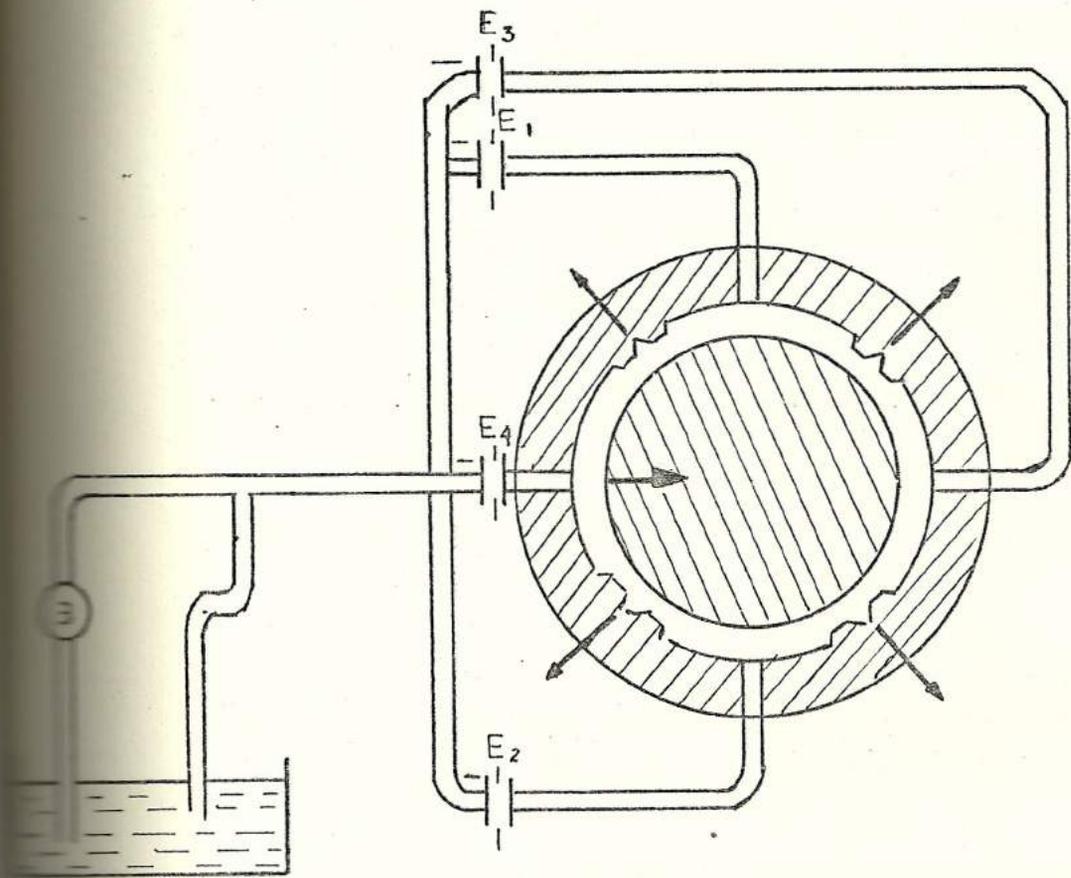


FIGURA Nº 12.- SOPORTE HIDROSTATICO

grande rigidez de guía, además la fricción del pistón en los soportes es prácticamente nulo.

### 2.3. VOLUMEN DEL CRATER DE EROSION EN FUNCION DE LA ENERGIA DE DESCARGA.

El volumen del cráter puede ser calculado aproximadamente, según figura N° 10, con la relación

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 \cdot h = \frac{\pi d^2 h}{8} \quad (2.1)$$

Según las condiciones de descarga, la razón de  $h/d$  está contenida entre los valores  $0,1 \div 0,0025$ .

En función de las razones energéticas de descarga el volumen de los crateres que se vienen a formar sobre el cátodo ( $V_c$ ) y sobre el ánodo ( $V_a$ ) son:

$$V_c = K_c w_i \quad V_a = k_a w_i \quad (2.2)$$

Donde  $k_a$  y  $K_c$  son coeficientes específicos y  $w_i$  es la cantidad de energía de descarga.

Los singulares crateres son producidos de acuerdo a las dimensiones de las energías nominales del orden de  $4 \times 10^{-1} \div 3 \times 10^{-4}$  joules.

En la figura N° 13 están indicadas las relaciones entre la energía de descarga ( $w_i$ ) y el volumen del metal extraído ( $V_o$ ); en la figura N° 14 está representada la correlación entre el diámetro ( $d$ ) y la

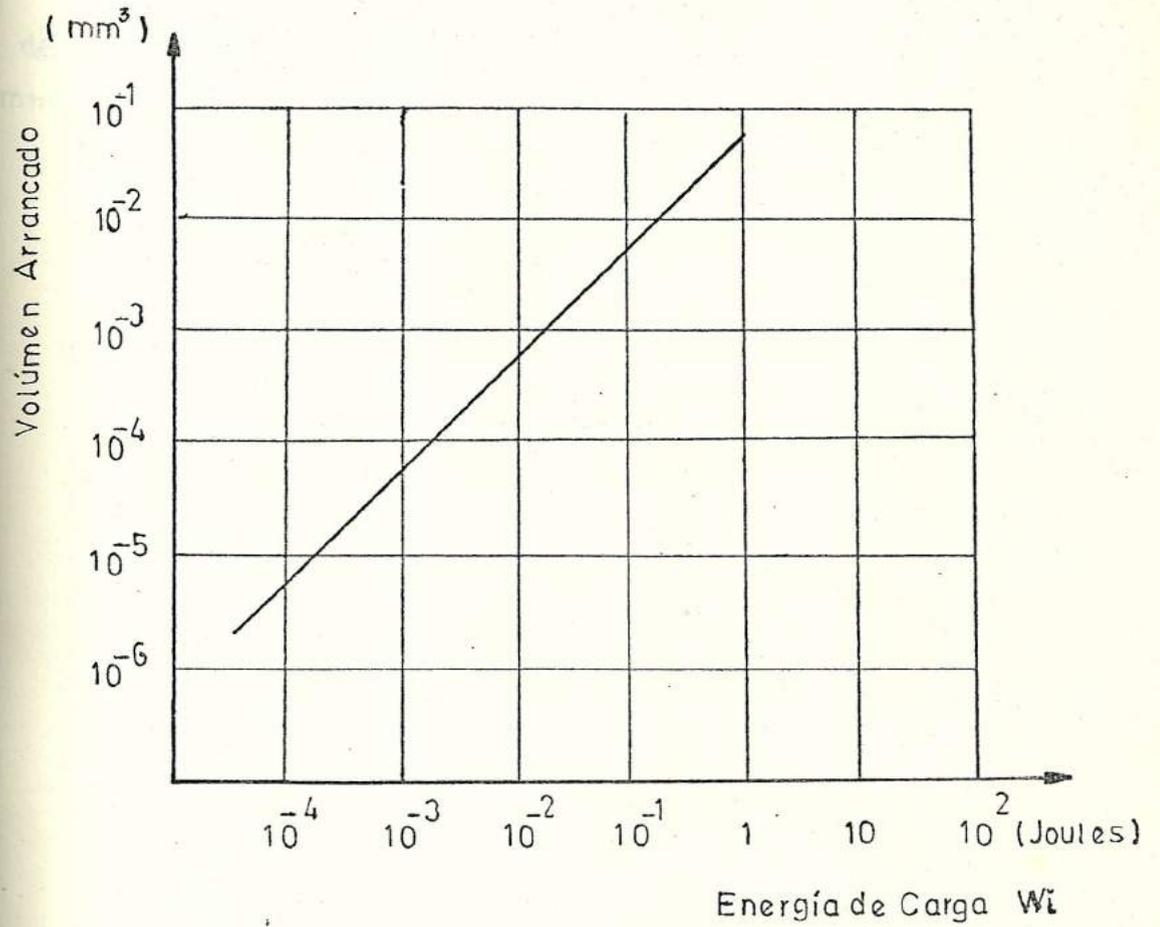


FIGURA N° 13.- RELACION ENTRE LA ENERGIA DE CARGA Y  
EL VOLUMEN DEL METAL EXTRAIDO

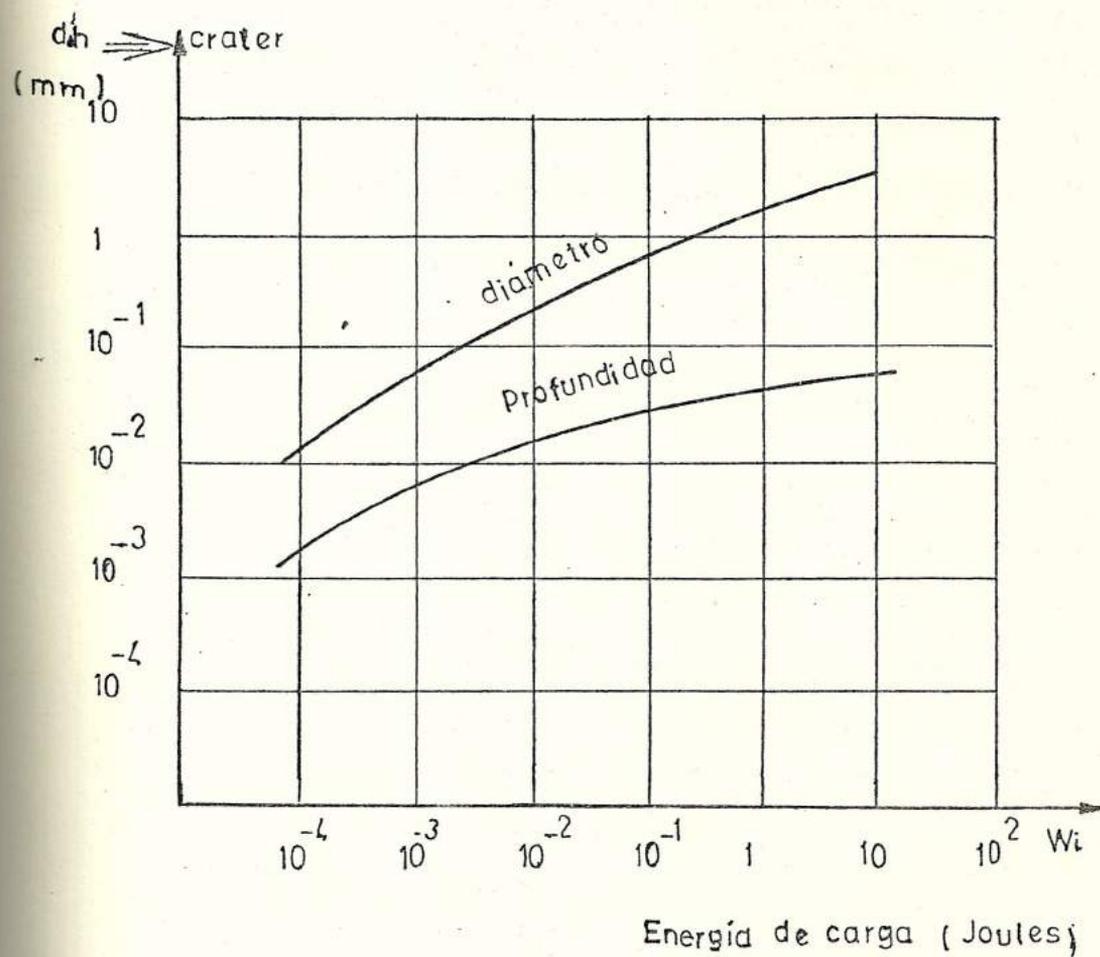


FIGURA Nº 14.- RELACION ENTRE EL DIAMETRO Y PROFUNDIDAD DEL CRATER EN FUNCION DE LA ENERGIA DE CARGA

profundidad del cráter ( $h$ ) y la energía de descarga ( $W_i$ ) empleada.

Para poder expresar analíticamente la energía de impulso ( $w_i$ ) se determinan los valores medios de la corriente  $I_m$  y de la tensión  $U_m$ , considerando  $T$  como duración del impulso,  $i$  e  $u$ , el valor instantáneo de la corriente y de la tensión de impulso respectivamente:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (2.3)$$

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2.4)$$

La potencia media del impulso será:

$$w_{imp} = \frac{w_i}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (2.5)$$

La potencia media del circuito será:

$$p_m = \frac{w_{imp}}{T} = w_{imp} \times f \quad (2.6)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la corriente eléctrica.

#### 2.4. ESTADO DE LA SUPERFICIE MECANIZADA

En la figura N° 15 es representada la curva característica que indica la relación entre el volumen del material arrancado en la unidad de tiempo ( $M$ ,  $\text{mm}^3/\text{min}$ ) y el estado de la superficie expresada como  $R_a$ .

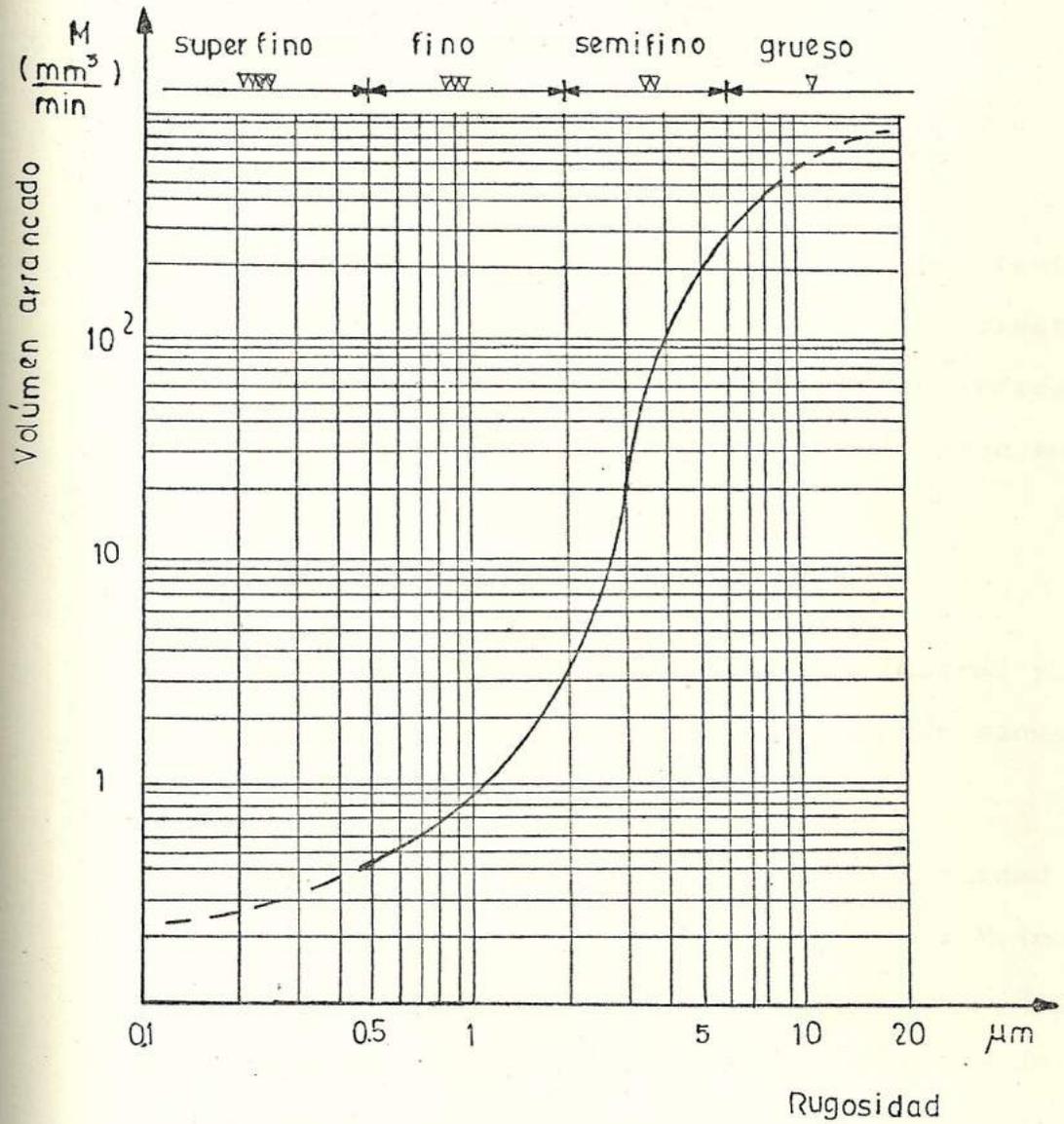


FIGURA Nº 15.- RELACION ENTRE EL VOLUMEN DEL MATERIAL ARRANCADO Y EL ESTADO DE LA SUPERFICIE

Una precisión del orden 0,01 mm puede alcanzarse - fácilmente; una precisión superior necesita un material especial y múltiples electrodos, obteniéndose estados de superficies del orden  $5 \div 12$  milésima de milímetro.

A los finales de la práctica representativa tecnológica algunos constructores de máquinas por electroerosión expresan los valores del estado superficial-rugosidad con números CH, así correlacionados en las comparaciones del parámetro Ra.

$$\text{Número CH} = 20 \log (10 \text{ Ra}) (\mu\text{m}).$$

Se recuerda que el estado superficial lateral y frontal obtenido por electroerosión resultarán siempre diferentes.

La velocidad de trabajo expresada como cantidad de material arrancado en la unidad de tiempo.  $M$ , ( $\text{mm}^3 / \text{min}$ ) en función de la superficie de ataque  $S$ , para diferentes regímenes de trabajo  $w_i$ , o sea la energía de descarga, viene representada en la figura N° 16.

Claramente tales condiciones operativas  $M, S, w_i$  deben ser asociadas a la optimización de la corriente de trabajo al final de el desgaste del electrodo-herramienta. En efecto cuando la densidad de la corriente viene bastante elevada, como se aprecia en

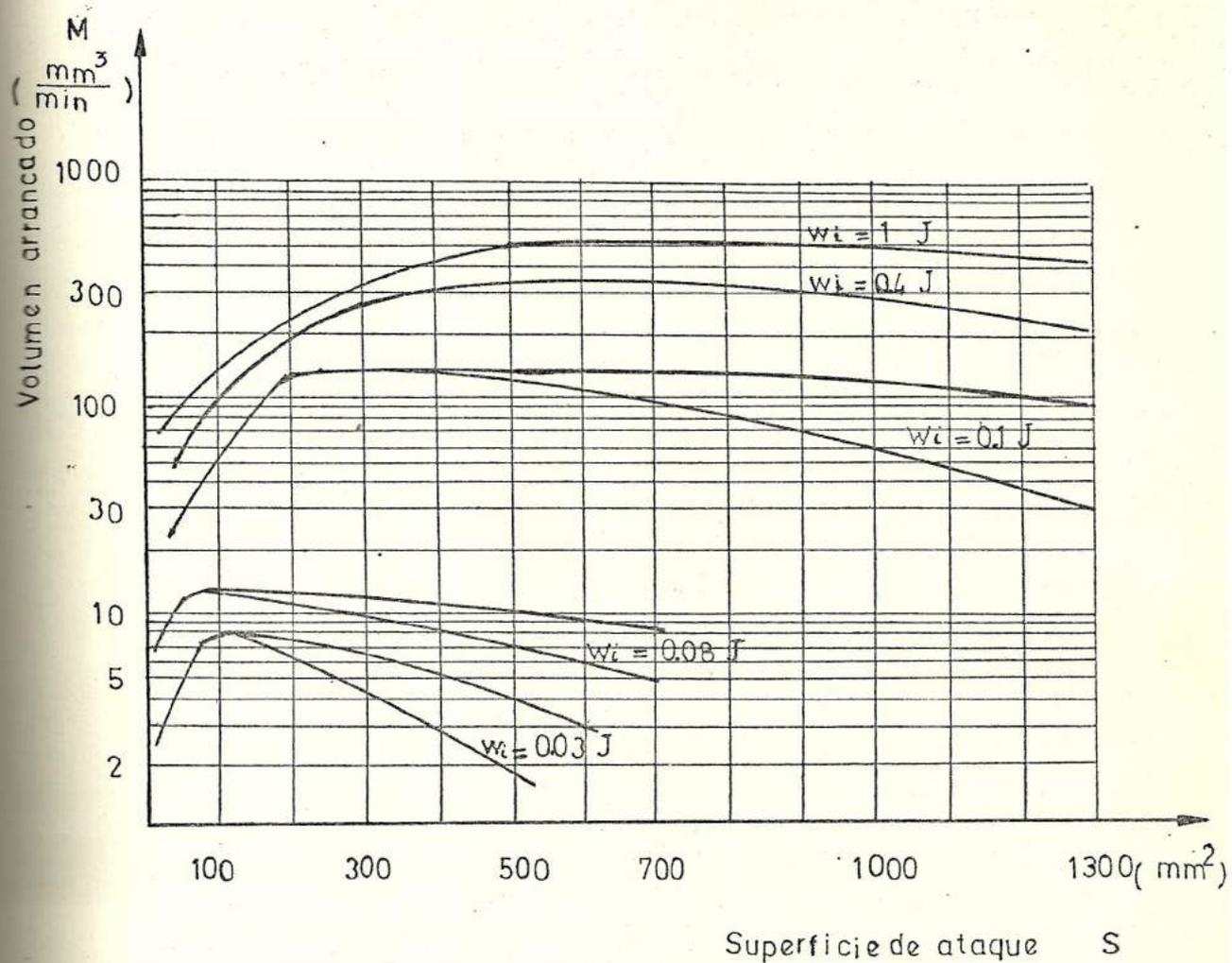


FIGURA N° 16.- VOLUMEN DEL MATERIAL ARRANCADO EN FUNCION DE LA SUPERFICIE DE ATAQUE

la figura N° 8, se tiene la tendencia a las cargas a normales o a cortos circuitos localizados que contribuyen a hacer la mecanización inestable y lenta; consecuentemente se advierte un anormal consumo del electrodo-herramienta.

En la figura N° 17 se grafican las dos curvas del - desgaste, electrodo-herramienta (O) y pieza (P) en función de la corriente (I); la zona rayada muestra el campo justo de trabajo que necesita respetarse - al fin de la triple optimización, volumen de mate - rial arrancado M, % de desgaste del electrodo-herra - mienta, e intensidad de corriente.

Claramente las curvas indicadas en la figura N° 17- una vez cuantificadas las coordenadas X(I) y M,% de desgaste nos presentan una de las principales caracte - rísticas de la máquina.

## 2.5. LIQUIDO DIELECTRICO

Los aceites minerales como el petróleo, y sus deri - vados son los más utilizados como líquidos dieléctri - cos. La viscosidad del aceite es importante . Un - aceite de alta viscosidad no debe ser usado para - dar el acabado al trabajo, porque a este régimen de trabajo, el Gap es pequeñísimo y un líquido viscoso circula difícilmente entre el electrodo y la pieza. Al contrario, en caso de desbaste el rendimiento de

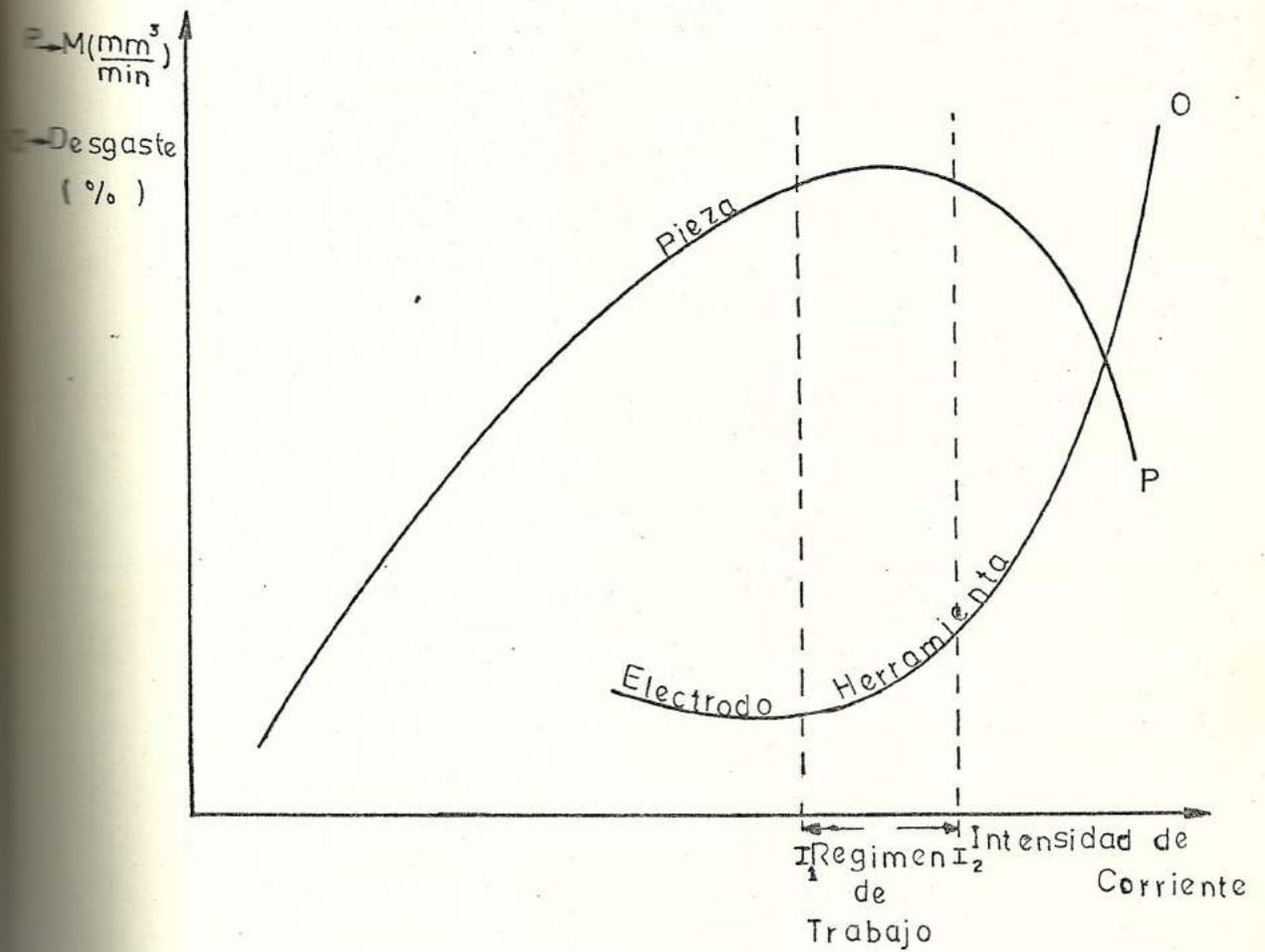


FIGURA N° 17.- PORCENTAJE DEL DESGASTE DEL ELECTRODO-HERRAMIENTA Y PIEZA EN FUNCION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE.

mecanizado es mejor con un aceite denso.

El punto de inflamación del líquido dieléctrico es importante. Un dieléctrico con bajo punto de inflamación tiende a vaporizarse fácilmente y desarrolla gran cantidad de gas en el transcurso del trabajo.

Los aceites deben tener un alto punto de inflamación y baja viscosidad. Aditivos son algunas veces usados para inhibir la formación de burbujas y minimizar olores. La más importante misión del fluido dieléctrico es la remoción de desechos o astillas producidas. Esto es ejecutado forzando el dieléctrico a través de la abertura del arco, con las astillas subsecuentemente removidas desde el dieléctrico en tanques de sedimentación o por filtración.

El proceso no afecta al fluido dieléctrico, el cual es continuamente filtrado y vuelto a usar. Una función secundaria al fluido dieléctrico es enfriar la herramienta y la pieza. En un sentido físico, el dieléctrico también sirve para confinar y contener la columna del arco y el plasma del arco asociado con el proceso. Este importante comportamiento del dieléctrico es aún poco entendido, a pesar del extensivo trabajo experimental realizado al respecto.

En la tabla N° 3 se indican las recomendaciones principales para la selección del líquido dieléctrico y

TABLA N° 3

## CARACTERISTICAS DE DIELECTRICOS

MECANIZADO	DIELECTRICO		
MECANIZADO DEL CARBURO DE TUNGSTENO	KEROSENE		
MECANIZADO DE PIEZAS CON SUPERFICIES PULIDAS	KEROSENE		
MECANIZADO DE PIEZAS SEMI PULIDAS (Ra 1, 12 ÷ 5, 6 um)	ACEITE DE VISCOSIDAD 6 ÷ 12 cst		
MECANIZADO DE DESBASTE	ACEITE DE VISCOSIDAD 12 ÷ 20 cst		
TIPOS DE DIELECTRICOS	VISCOSIDAD A 20°C		TEMPERATURA DE INFLAMACION °C
	cst	E	
BP Dieléctrico 250	6	1,48	120
Castrol 409	6,4	1,52	135
Chevron EDM Líquido 71	5,7	1,46	116
Esso Mentor 28/Somentor 43	7,4	1,6	124
Esso Lcctor 40	6,8	1,55	132
Esso Univolt 64	2,0	2,90	156
Aceite de sal mineral	5,8	1,48	132
Mobil Oil 4 (aceite mobil)	9,0	1,75	118
Mobil Oil 6	19,1	2,80	158
Petróleo	2		78
Kerosene	16		39

Temperatura de inflamación con respecto al punto de inflamación a la que arde el petróleo cuando se expone a una llama.

la relativa característica.

Las figuras N° 18, N° 19 y N° 20, muestran algunas formas que garantizan la circulación del líquido dieléctrico entre el electrodo-herramienta y la pieza durante la fase del electrodo-erosionado, estas al final del resultado es una garantía para la funcional homogeneidad del Gap.

La figura N° 18 se refiere a circulación e inyección del líquido dieléctrico.

La figura N° 19 se refiere a circulación con una de presión de  $0,8 \div 0,9$  BAR.

La figura N° 20 se refiere a circulación a contra corriente del líquido dieléctrico.

## 2.6 ELECTRODOS

El electrodo de herramienta para electro-erosión es el medio por el cual la corriente eléctrica es transportada a la pieza de trabajo. La forma del electrodo establece un patrón por donde las chispas ocurrirán entre la herramienta y la pieza, y la configuración deseada quedará maquinada. Un requerimiento para cualquier material usado para el electrodo es que sea excelente conductor de electricidad.

La productividad, los resultados y el costo del mecanizado depende grandemente del material usado pa

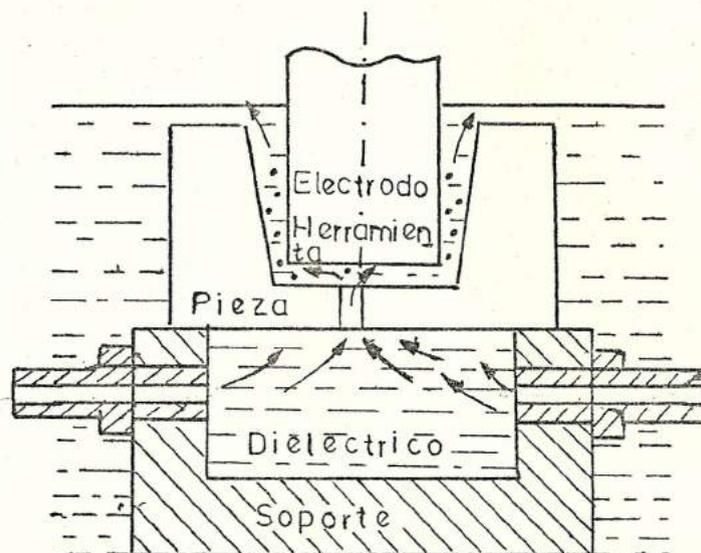


FIGURA Nº 18.- CIRCULACION E INYECCION DEL LIQUIDO DIELECTRICO

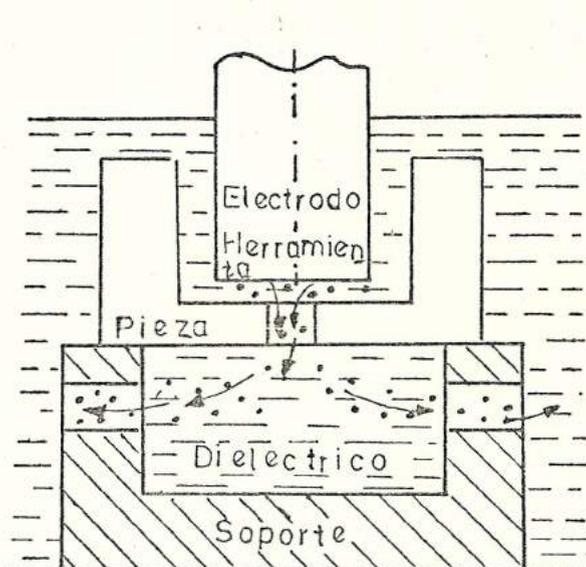


FIGURA Nº 19.- CIRCULACION POR ASPERSION

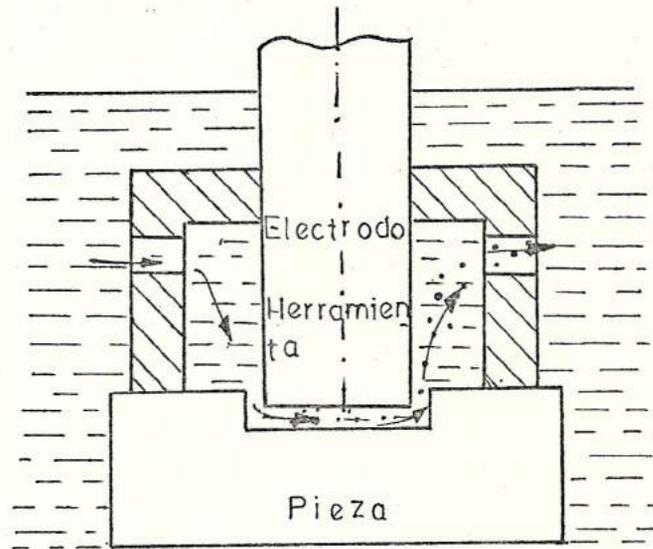


FIGURA Nº 20.- CIRCULACION A CONTRA CORRIENTE

ra el electrodo-herramienta. Los materiales usados son: grafito, cobre, bronce, cobre-tungsteno, plata tungsteno, carburo y aleaciones de zinc. Cada material es utilizable en diferentes grados o aleaciones que pueden ser usados para necesidades específicas.

Se ha determinado que el material a utilizar debe ser un metal a base de cobre. Para el funcionamiento con el reglaje más potente de la máquina, el metal ideal es el cobre electrolítico.

**ELECTRODOS DE GRAFITO.**- El grafito se ha hecho el material predominante para electrodos de electro-erosión. El costo de electrodos de grafito varía desde relativamente no costoso para los de granos gruesos, a caros para los de granos finos de alta densidad. Grafitos de granos gruesos son normalmente usados para trabajos de desbaste, donde existe poca precisión.

Debe tenerse cuidado cuando se usa electrodo de grafito para maquinar carburo de tungsteno, ya que es recomendable que el maquinado sea acompañado bajo buenas condiciones de remoción de virutas. La pérdida de una buena remoción de virutas hace posible que la superficie de corte pueda ser carbonizada y un incontrolable arco podría resultar. Este arco llamado "arco de corriente continua", es causado por

el carbón depositado sobre la superficie de trabajo siendo calentada a tal punto que no ocurre desionización del fluido eléctrico. Sin desionización, la corriente fluye a través del mismo punto entre el electrodo y la pieza causando un excesivo recalentamiento.

Cuando se maquina carburo de tungsteno con grafito, es recomendable usar los de granos fino y de alta densidad.

ELECTRODOS DE COBRE-GRAFITO.- Finas partículas de grafito en aleaciones de cobre usualmente permiten trabajar bien al maquinar los carburos de tungsteno en ambas operaciones de desbaste y acabado. El cobre grafito debe ser clasificado en el rango caro y son normalmente producidos en pequeñas escalas

ELECTRODOS DE COBRE.- El cobre trabaja bien como un material de electrodo. El material es normalmente cobre puro o un cobre electrolítico. Mientras el cobre se maquina muy fácil, hay problemas en consideración a carga sobre un torno si operaciones de rectificado son requeridas.

El cobre es mucho más usado para trabajos de precisión, debido a que tiene la capacidad de ser pulido a un fino acabado de superficie.

Para alta producción se puede usar electrodos de co  
bre compactados debido a que formas complicadas puede  
den ser producidas a bajo costo por este método, el  
cual ofrece un buen control de medidas y la oportun  
nidad de incluir localización de puntos, superficies  
o formas en el diseño.

ELECTRODOS DE TELURIO-COBRE.- Este tipo de elect  
trodo es usado cuando el maquinado es de mayor cons  
sideración en la producción de electrodos, debido a  
que el telurio aumenta la maquinabilidad de la aleac  
ción en un una tabla del 90% comparada con 100% par  
ra bronce de fácil maquinado.

ELECTRODOS DE BRONCE.- No es muy recomendable por  
su conductividad eléctrica aunque tenga fácil mecan  
nización, debido a su alto desgaste no es usado par  
ra maquinar carburos de tungsteno, como electrodo.

ELECTRODOS DE COBRE-TUNGSTENO.- Para mecanizado de  
precisión este tipo de electrodo es recomendable ya  
que pueden obtenerse finos detalles. Tiene buen esf  
fuerzo y está menos sujeto a roturas o fracturas -  
cuando se mecanizan interiormente secciones delgad  
das, lo cual no ocurre con el grafito. La composici  
ción de metal usado generalmente tiene un alto porce  
centaje de tungsteno, del alrededor de 50% a 70%. Est  
te material tiene alta densidad y buena conductivi-

dad térmica y electrónica, La alta densidad hace de este material bien ajustado para mecanizado de alta precisión y acabado fino de superficies con un mínimo de desgaste.

El cobre tungsteno es usado frecuentemente para aplicaciones de carburo de tungsteno. Este material es producido solamente en pequeñas medidas, pero es aprovechable en stock de hojas, barras rectangulares, alambres, varillas, tubos.

ELECTRODOS DE PLATA-TUNGSTENO.- Este tipo de electrodo es caro y difícil de mecanizar. Normalmente es usado cuando se desea obtener finos detalles con acabados de superficies lisos y se requiere un mínimo de desgaste del electrodo. Este material es producido en pequeña escala.

ELECTRODOS DE CARBURO TUNGSTENO.- Estos electrodos trabajan bien cuando van a maquinar acero cortante y carburos de tungsteno, tiene buen desgaste en los bordes y es suministrado en barras rectangulares, barras redondas y tubería. La tubería de carburo es aprovechable en un rango de 0,38 a 6,35 mm de diámetro, tales tuberías tienen una ventaja sobre otro material de electrodos cuando pequeños agujeros tienen que ser maquinados a profundidades de diez veces su diámetro o más. Tienen la habilidad

dad para permanecer recto dentro del corte debido a su rigidez.

ELECTRODOS DE ALEACIONES DE ZINC.- El zinc ofrece una manera para hacer electrodos de compuestos para moldear, tiene bajo punto de fusión y como resultado, la erosión del electrodo es alta comparada con el gráfito.

En todos los casos, el maquinado de un electrodo es de una gran importancia. Esto es similar a manufacrar la pieza, en muchos casos el material del electrodo es más fácil de maquinar que el material de la pieza.

Cuando se requiere maquinar los electrodos se utilizan máquinas como: el torno, fresadoras, rectificadoras, duplicadoras normales y automáticas. En electroerosión el trabajo preparatorio es lo que requiere más tiempo, siendo el papel del utilaje lo más importante

La tabla N° 4 enumera las ventajas y desventajas de varios materiales para electrodos.

La tabla N° 5 enumera áreas de aplicabilidad de materiales para electrodos.

#### 2.6.1. CALCULOS DE LAS DIMENSIONES DEL ELECTRODO

TABLA N° 4

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE VARIOS MATERIALES PARA ELECTRODOS

MATERIAL DEL ELECTRODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
GRAFITO	Fácil maquinado, buena remoción del metal; muy buena proporción de desgaste, puede ser nuevamente maquinado	Necesita un buen flujo de fluido dieléctrico, puede ocurrir arcos peligrosos al maquinar carburos
COBRE TUNGSTENO	Puede adherirse con bronce, buena resistencia a la ruptura por envejecimiento	mayor costo que el grafito; puede maquinarse a acero sólo con polaridad invertida
ACERO	Bueno para matrices pequeñas; pequeños punzones pueden ser maquinados fácilmente	Proporciones satisfactorias de usos para ciertas aleaciones de acero; el tiempo de maquinado es 5 veces más que el electrodo de grafito
BRONCE	Bajo costo; fácil maquinabilidad, produce un acabado muy liso sobre el trabajo	Poco uso con relación al grafito, grados de maquinación libre no se obtiene fácilmente en todo tamaño
PLATA-TUNGSTENO	Buen desgaste, buena resistencia a la ruptura por envejecimiento	Alto costo inicial, dificultad para maquinar

TABLA N° 5

APLICABILIDAD DE VARIOS MATERIALES PARA ELECTRODO-HERRAMIENTA

Material del electrodo	Forma del electrodo	Costo Relativo	Maquinabilidad	Metal a trabajar	Aplicaciones	Usos no Recomendados
Grafito	Barras, tubos, bloques, varillas	Bajo	Excelente	Aceros	Herramientas	Carburos
Cobre-Tungsteno	Barras cortas alambres, varillas	Medio	Regular	Todos	Muecas de carburos	Grandes areas
Bronce	Ejes, alambres, tubos, varillas	Bajo	Bueno	Todos	Agujeros	Alta precisión
Cobre	Ejes, alambres, tubos, varillas	Bajo	Bueno	Todos	Agujeros	Baja precisión
Plata-Tungsteno	Sinterizados	Alto	Regular	Todos	Ranuras pequeñas o agujeros	Grandes areas
Tungsteno	Alambres, varillas	Medio	Mala	Metales Refractarios	Agujeros	Agujeros irregulares
Carburo de Tungsteno	Varillas, sinterizadas	Alto	Mala	Metales Refractarios no ferrosos	Agujeros	Agujeros irregulares

APLICABILIDAD DE VARIOS MATERIALES PARA ELECTRODO-HERRAMIENTA

Material del electrodo	Forma del electrodo	Costo relativo	Maquinabilidad	Metal a trabajar	Aplicaciones	Usos no recomendados
Aceros	Toda forma	Bajo	Excelente	Aceros	Agujeros, matriz es tampada	Carburos
Aleaciones de zinc	Matrices	Bajo	Bueno	Aceros	Agujeros en matrices	Agujeros en aleaciones - zinc-ten
Aluminio	Formas forjadas	Bajo	Bueno	Aceros	Agujeros en matrices	
Molibdeno	Varillas, tubos, ejos, alambres	Alto	Mala	Refractarios	Agujeros	
Níquel	Placas	Alto	Regular	Todos	Formas de agujeros complicados	

Según se ha expuesto, la erosión normalmente se efectúa con dos electrodos, electrodo-herramienta y electrodo pieza, siendo los materiales más usados el grafico o el cobre y sus aleaciones, utilizados tanto en la fase de desbaste como en la fase de acabado respectivamente y su dimensionamiento vienen dados según las tablas de valores, ver apéndice, para material de electrodo.

ELECTRODOS DE DESBASTE.- En este caso debemos tener en cuenta siempre la superficie de contacto entre el electrodo y la pieza a erosionar, que nos dará la escala de intensidades para así poder completar el programa correspondiente. En los electrodos de desbaste, las dimensiones pueden ser la medida nominal antes del acabado, restando la diferencia entre la medida nominal y la del electrodo,  $(2 \text{ GAP} + 2 \text{ Rt})$ , según indica la fórmula (2.7).

$$\text{Medida del electrodo} = \text{Medida Nominal} - (2\text{Gap} + 2\text{rt})$$

(2,7)

Siempre teniendo en cuenta, mínimo desgaste y máxima capacidad de arranque de viruta  
 $M \text{ (mm}^3/\text{min)}$

ELECTRODOS DE ACABADO.- Para las dimensiones hay que tener en cuenta la rugosidad (Ra) que se desea obtener, así también si la pieza va a ser pulida o no posteriormente, según indica la fórmula (2.8)

Con pulido posterior:

$$\text{Medida del electrodo} = \text{Medida Nominal} - (2\text{Gap} + 2rt) \quad (2.8)$$

Sin pulido posterior:

$$\text{Medida del electrodo} = \text{Medida Nominal} - 2\text{Gap} \quad (2.9)$$

## 2.7 TIEMPO DE TRABAJO

El cálculo de tiempo de trabajo resulta de la siguiente expresión:

$$T \text{ (min)} = \frac{V \text{ (mm}^3\text{)}}{M \text{ (mm}^3\text{/min)}} \quad (2.10)$$

donde:

V = representa el volumen del material evacuado.

M = representa la evacuación práctica del material por unidad de tiempo.

Al efectuarse un trabajo en la máquina se establece la siguiente notación:

$$T_d = \frac{V_d}{M_d}$$

Para desbaste:

$T_d$  = Tiempo de desbaste.

$V_d$  = Volumen de material evacuado en el desbaste.

$M_d$  = Evacuación práctica en desbaste del material.

$$T_p = \frac{V_p}{M_p}$$

Para acabado:

$T_p$  = Tiempo de acabado.

$V_p$  = Volumen del material evacuado en el acabado.

$M_p$  = Evacuación práctica en el acabado.

El tiempo total de mecanizado en la máquina viene representado por:

$$T_t = T_d + T_p$$

## CAPITULO N° 3

### MECANIZADO POR ABRASION

La formación de la viruta en el rectificado, la acción de arranque y de abrasión, tiene lugar en condiciones muy distintas, tanto con respecto al torneado y cepillado en los que la sección de viruta por lo menos teóricamente es constante, como con respecto al fresado que aún presentando virutas de sección variable, como en el rectificado, utiliza sin embargo herramientas multicorte de geometría bien definida.

En el rectificado la herramienta dispone de una cantidad indefinida de granos abrasivos distribuidas al azar, pero por lo demás de forma tal que dan lugar a ángulos de desprendimientos negativos como aparece en la figura N° 21 y figura N° 22.

No se puede establecer la hipótesis de régimen estacionario, sino que se deben prever variaciones periódicas de las fuerzas aplicadas debidas tanto a las variaciones de las secciones de las virutas como al distinto número de granos de abrasivos en contacto con la pieza en cada momento. En tales condiciones de formación, cada viruta puede dar lugar a un ángulo de cizallamiento  $\phi$  variable desde el comienzo hasta el final del corte y a  $\cos$

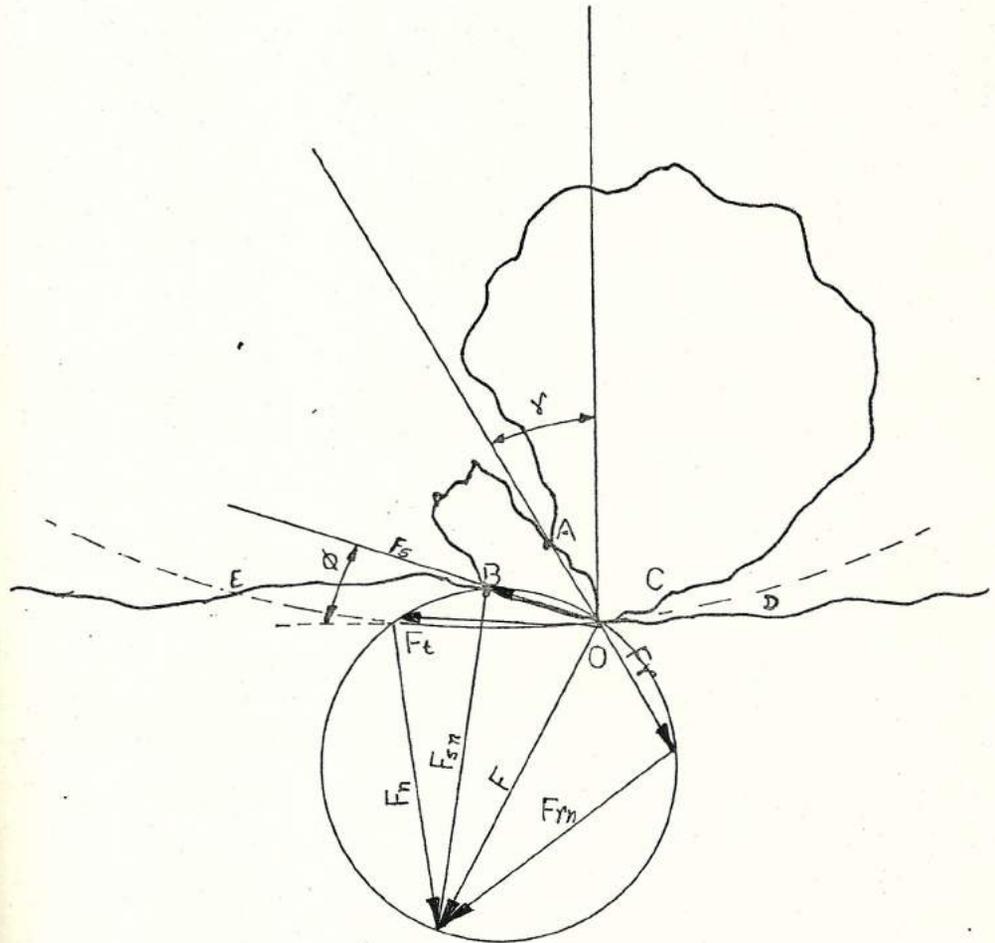


FIGURA N° 21.- DIAGRAMA DE FUERZAS EN EL RECTIFICADO

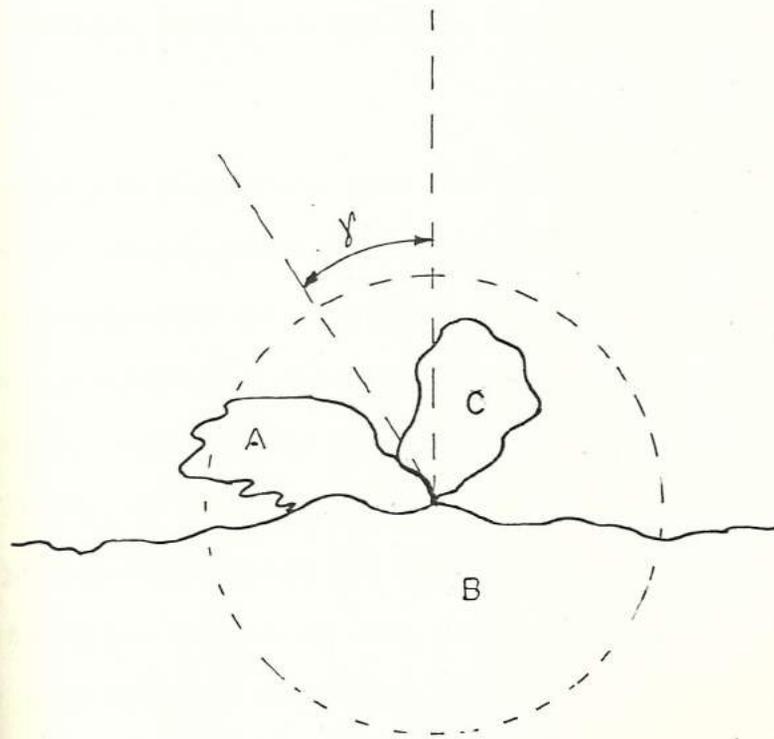


FIGURA Nº 22.- FORMACION DE VIRUTA ARRANCADA POR UN GRANO ABRASIVO; DONDE A ES LA VIRUTA ARRANCADA, B ES LA SUPERFICIE DE LA PIEZA, C ES EL GRANO ABRASIVO,  $\gamma$  ES ANGULO DE DESPRENDIMIENTO.

ficientes de fricción igualmente variables.

El ángulo de cizallamiento  $\phi$  resulta pequeño: La fuerza  $F$  resultante da lugar; a la fuerza  $F_t$ , fuerza de corte, y a la  $F_n$ , fuerza de repulsión, a  $F_s$  y  $F_n$ , fuerzas de cizallamiento tangencial y normal a  $F_y$  y  $F_{yn}$ , fuerzas de rozamiento sobre la cara de corte y su normal correspondiente.

La energía requerida por los procesos de abrasión es por lo menos de un orden de magnitud superior a la necesaria en operaciones de arranque de virutas en torno, fresadora, y alcanza a veces valores 20 veces superiores. La energía introducida en el sistema, para operaciones de rectificado, se transforma en calor hasta cerca del 80%; de este porcentaje cerca del 85% es cedida a la pieza que se rectifica a través de las pequeñas secciones de las virutas arrancadas; cerca del 5% es arrastrado por la viruta y el restante 10% es disipado por los granos de abrasivos, por el aglomerado de la muela y por las pequeñas bolsas de aire que se forman en la superficie de la muela.

La cantidad de calor cedida a la pieza es la que provoca los mayores problemas, no solamente porque es la mayor parte del calor producido, sino porque puede determinar, en el material que se mecaniza, quemaduras, grietas superficiales, tensiones residuales, modificaciones de estructuras superficiales, y errores dimensionales.

### 3.1. HERRAMIENTAS PARA RECTIFICADO: CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES

Las herramientas utilizadas en el rectificado se - llaman muelas y disponen de un número indefinido de aristas cortantes, constituidos por los granos abrasivos. Cada uno de los cuales arranca una pequeñísima cantidad de sobremetal en centésimas de milímetro. Los granos de abrasivo están aglomerados - por un ligante que tiene la misión de dar resistencia a la muela.

Una característica interesante para el abrasivo es su granulometría, es decir, las dimensiones del grano, por la relación entre este y el grado de acabado de las superficies mecanizadas. Un grano grueso sirve solamente para trabajos de desbaste o desbarbado como en la fundición. Un grano medio, para rectificado de exteriores o intensivos y afilado medio. El grano fino y semifino, sirven para afilados y acabados; los granos superfinos hasta polvos impalpables, sirven para bruñidas y lapeados. - La medida del tamaño de grano abrasivo viene indicada por un número que indica cuantos hilos por pulgada lineal se encuentran en la tela metálica del tamiz que ha servido para separarlas; por ejemplo Un abrasivo de grano 120 pasa a través del tamiz nú

mero 120 que tiene 120 x 120 agujeros por pulgada cuadrada.

La tabla Nº 6 da la superficie de granos normales, teniendo presente que los polvos más finos se obtienen por decantación.

En resumen, las granulaciones más gruesas sirve para desbarbados y desbastes, ya que arrancan una mayor cantidad de material y para materiales más blandos; las granulaciones finas para los acabados y materiales duros.

La estructura de la muela corresponde a la disposición o densidad de los granos de abrasivos en la masa del aglomerante: éstos pueden estar muy juntos y dar lugar a una estructura cerrada; o bien estar relativamente separados y formar una estructura abierta. Esta característica de la muela, ligada a la porosidad, debe ser bien considerada en la elección.

### 3.2. CARACTERISTICAS TECNICAS QUE DEBE CUMPLIR EL ABRASIVO

VO

El abrasivo para cumplir su misión de corte debe satisfacer los siguientes requisitos:

Más que cualquier otro útil, el abrasivo debe po-

TABLA Nº 6

## TAMAÑO DE GRANO DE LOS ABRASIVOS

Grano muy grueso	Nº	8	10	12		
Grano grueso	Nº	14	16	18	20	24
Grano medio	Nº	30	36	46	60	
Grano fino	Nº	70	80	90	100	128
Grano muy fino	Nº	150	180	220		
Polvo Decantado	Nº	240	300	400	500	600

seer elevada dureza, ya que sirve para trabajar los materiales más duros.

Los granos de abrasivo deben resistir la acción de desgaste, ejercida sobre ellos por el rozamiento sobre la pieza; en efecto, el grano que resultará redondeado en lugar de presentar aristas vivas, no podrá seguir cortando. La resistencia al desgaste depende del sistema de cristalización que debe permitir la fractura del grano o su desprendimiento, de forma que se mantengan las aristas vivas.

Poseer tenacidad, esta característica es necesaria para impedir roturas de grano bajo la acción de los choques.

Uniformidad de los granos es indispensable tanto por lo que hace referencia a su estructura como a sus dimensiones.

### 3.2.1. TIPOS DE ABRASIVOS MAS COMUNES

Entre los abrasivos más comunes tenemos:

El sesquióxido de aluminio, Alundum, que se obtiene de la bauxita por un tratamiento en horno eléctrico al arco, a la temperatura cerca de  $4000^{\circ}\text{C}$ . Esta se funde y después al enfriarse cristaliza en bloques, que a su vez son moli-

dos y reducidos a polvos o granos. El Alundum tiene un grado de dureza en la escala de Mohs-comprendido entre el corindón y el diamante. Generalmente se emplea para mecanizar metales con carga de rotura superior a los  $350 \text{ N/mm}^2$

El carburo de silicio que se obtiene, por tratamientos en hornos eléctricos, a temperatura de unos  $3000^\circ\text{C}$  de arena mezclada con coque, como consecuencia de este tratamiento se forma una masa cristalina que después se muele dando lugar a los granos. La dureza del carburo de silicio es superior a la del Alundum, próxima a la del diamante, por ello el empleo de este abrasivo se extiende también a los materiales de mucha dureza y menor tenacidad, desde fundiciones hasta carburos de tungsteno. Se usa normalmente para materiales frágiles con carga de rotura inferior a los  $350 \text{ N/mm}^2$ , como bronce, platón y aluminio.

El diamante natural o sinterizado: el polvo de diamante es utilizado con un ligante metálico, se emplea en el rectificado fino, para afilar y repasar las caras de las muelas abrasivas, para cortar sustancias altamente resistentes, tales como el vidrio, piedra, cerámica

y carburos cementados.

### 3.3. FORMACION DE VIRUTA EN EL PROCESO

Se ha descrito ya al comienzo del capítulo 3 como ocurre el arranque de viruta en los procesos de abrasión; el filo cortante activo queda reducido a las dimensiones del tamaño de grano del abrasivo y el número de granos abrasivos en acción es muy grande.

Cada grano abrasivo puede ser considerado como una herramienta monocortante elemental que actúa, pero con una geometría irregular: prevalecen ángulos de desprendimientos negativos, hasta de  $40^{\circ} \div 50^{\circ}$ , y a veces es negativo también el ángulo de incidencia.

Cada grano abrasivo recorre una trayectoria; dejando sobre la pieza una pequeñísima huella, raya, a lo largo de la cual ocurre el arranque de la virutilla y una deformación plástica del material.

La relación entre la cantidad de material arrancado y la cantidad deformada plásticamente varía en función de las condiciones de trabajo adoptadas. Por lo tanto la rápida acción de los granos de abrasivo sobre la pieza produce un notable calentamiento con peligro de quemado de las capas superficiales de las mismas o de agrietamiento por las fuertes dilataciones térmicas superficiales; además pueden pre

sentarse notables concentraciones de tensiones que pueden comprometer la calidad de las superficies mecanizadas.

El calor desarrollado en el rectificado según figura N° 21 se forma en:

En el plano de cizallamiento (OB)

Sobre la cara de desprendimiento (OA) del grano abrasivo sobre la cual desliza la virutilla.

Sobre la superficie de incidencia (OC) del grano abrasivo que resbala contra la pieza. Esta última causa es particularmente importante porque proporciona la mayor parte de calor a la pieza.

El desgaste del grano abrasivo modifica la longitud del segmento (OC) que aumenta. Para elevadas velocidades de la muela, pequeñas distancias entre los granos abrasivos y baja velocidad de la pieza se puede considerar la zona correspondiente al área de contacto (ED) como fuente de calor continuo.

#### 3.4. DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE CORTE

Para la determinación de las condiciones de corte en el rectificado hay que considerar el rendimiento del mecanizado que se puede expresar por: Grado de acabado superficial de la pieza mecanizada y tolerancias dimensionales, desgaste de granos abrasivos, volumen de material arrancado de la pieza.

El grado de acabado superficial es un parámetro importante que valora la calidad de una operación de rectificado, es por lo tanto útil tener en cuenta - con la máxima consideración los parámetros que influyen sobre la microgeometría de la superficie de la pieza mecanizada.

El desgaste de los granos abrasivos es un fenómeno- que se desarrolla de tres maneras: redondeado o aplanado de los granos de abrasivos por rozamientos, por reacción química y por fractura de los granos.

El aplanado por rozamiento es un fenómeno puramente mecánico. Frotando contra la pieza a mecanizar, el grano abrasivo se desgasta. Esto desde un punto de vista de la geometría del filo de corte determina - un ángulo de incidencia nulo, por lo tanto un aumento del área de corte pieza-herramienta.

El aplanado por reacción química ejerce sobre el - grano abrasivo un efecto totalmente análogo al descrito anteriormente pero que es debido a las altas temperaturas y presiones que se originan en la zona de corte.

La fractura del grano abrasivo se verifica cuando - las fuerzas aplicadas a cada grano, por efecto del desgaste crece hasta alcanzar un cierto valor lími-

te. La fractura del grano abrasivo provoca la crea  
ción de nuevos filos cortantes.

El volumen del material arrancado de la pieza es un parámetro que nos dá un índice de productividad en el rectificado y puede ser relacionado con el des - gaste de los granos abrasivos a través de la rela - ción:

$$G = \frac{V_c}{V_m}$$

Siendo:

$V_c$  = Volúmen del metal arrancado de la pieza.

$V_m$  = Volúmen del material, granos abrasivos, perdi - dos por desgaste.

$G$  = Es el rendimiento volumétrico.

#### 3.4.1. PARAMETROS DE CORTE PARA TRABAJOS EN RECTIFICADO

Los parámetros que deben ser determinados pa - ra disponer de un conjunto de condiciones de corte idóneo para trabajos de rectificado son: velocidad de corte, velocidad de avance peri - férico, velocidad de avance axial, profundi - dad de pasada y creces de sobremetal.

La velocidad de corte debe alcanzar los valores máximos posibles compatibles con su resistencia, ya que está sometida durante su rotación a una ac -

ción de fuerza centrífuga que tiende a disgregarla o desintegrarla.

El aumento de la velocidad de corte a igual -  
dad de las demás condiciones, lleva a una disminución de la temperatura de corte, disminución de la rugosidad superficial incluso con  
fuertes arranques de viruta, menores fuerzas-  
tangenciales y normales entre muela y pieza.

Se pone igualmente de manifiesto que al aumentarse la velocidad de corte, el espesor de viruta arrancado por un grano abrasivo tiende a  
disminuir, y la muela se comporta como si fuese más "dura", por ello se embota más rapidamente en el caso de mecanizados sobre materiales  
blandos. Para estos materiales, por lo -  
tanto debe reducirse la velocidad de corte.

La velocidad de avance periférico de la pieza  
debe ser elegida con gran cuidado, porque es  
de mucha importancia para los resultados del  
trabajo. Esta depende de la profundidad de -  
pasada, espesor de viruta arrancado por un grano,  
del diámetro de la pieza y de la calidad-  
del material que se mecaniza.

Los primeros dos parámetros están ligados al

espesor de viruta arrancada por un grano abrasivo, del citado espesor dependen la fuerza de corte y la potencia absorbida, también de la calidad del material que se mecaniza.

Un aumento de la velocidad de avance periférico, provoca al aumentar la fuerza de corte un mayor esfuerzo de trabajo de la muela y - por lo tanto un mayor desgaste. El límite inferior de la velocidad de avance periférico hay que relacionarlo con el tiempo de mecanizado, que debe ser mantenido en valores económicos, y con el peligro de alisado o embotado de la muela, lo que se verifica con un espesor demasiado pequeño de la viruta.

El movimiento de axial efectuado generalmente por la pieza sirve para llevarle a la posición de contacto con la muela a lo largo de toda su longitud. El valor de este avance depende de la altura de la muela además del material a mecanizar, de las dimensiones de la pieza y de las condiciones de acabado que se desea obtener.

La profundidad de material arrancado en cada pasada, debe ser fijada teniendo en cuenta la influencia que ejerce sobre los varios facto

res de corte. De todo ello resulta conveniente adoptar fuertes profundidades de pasada en los trabajos de desbaste compatibles con la potencia disponible y con la duración de la muela.

El sobremetal que se deja en una pieza, ya mechanizada en otra máquina, para ser eliminado por rectificado depende tanto de las dimensiones de la pieza como de la potencia de la máquina.

## CAPITULO Nº 4

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

Una hilera nueva importada, una vez que ha aumentado su diámetro original de salida por efecto de trabajo deja de ser utilizada para las condiciones iniciales, debido a que fue imposible conseguir la materia prima y los elementos necesarios para efectuar un proceso completo de construcción de hileras, partimos de hileras que ya han sido utilizadas pero que aún teniendo vida útil y un núcleo que puede ser maquinado, se las recupera maquinándolas a un diámetro mayor de trabajo. Para maquinar el núcleo de la hilera, que es de carburo de tungsteno, utilizamos dos procesos al cual comparamos las propiedades técnicas del material, del núcleo de la hilera, y el costo de mecanización. Para tal efecto utilizamos el proceso de electroerosión y un proceso de abrasión que indican los fabricantes.

#### 4.1. PREPARACION DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS

Para efectuar el proceso de mecanizado por electroerosión, se selecciona una máquina de electro impulsos EROS MATRIZ "ONA" B - A - IRU, cuyas dimensiones y características técnicas son:

Recorrido del porta electrodos.....	200 mm.
Dimensiones del tanque.....	
(largo x ancho x alto).....	1,8 m <sup>3</sup>
Mesa de trabajo.....	2600 cm <sup>2</sup>
Curso transversal.....	250 mm
Curso longitudinal.....	500 mm.
Divisiones de los nonios en husillos...	0,02 mm
Grupo moto bomba dieléctrico.....	0.845 kw
Grupo moto bomba hidráulico.....	0.183 kw
Capacidad tanque hidráulico.....	25 l
Distancia max. entre cabezal y mesa...	620 mm
Peso del electrodo.....	250 kg
Desgaste volumétrico con electrodo de cobre	0,2
Desgaste volumétrico con electrodo de grafito	0,1
Rugosidad en micras.....	0,8
Tensión de los impulsos.....	60 y 150
Máximo arranque de material.....	500 mm <sup>3</sup> /min
Potencia máxima requerida.....	6,40 KW

Para efectuar el mecanizado por abrasión, se trabaja con máquinas de rectificar hilera de metal duro, carburo de tungsteno, modelo KOCH, que gentilmente fue prestada por la INDUSTRIA GAVI cuyas características técnicas son:

Velocidad de avance de la aguja	77 $\frac{\text{mm}}{\text{Seg}}$
Velocidad de rotación del porta hilera	875 RPM

Recorrido del porta agujas.....	50 mm
Voltaje requerido para su funcionamiento..	220 Vol
Potencia requierida.....	0,4 Kw
Dimensiones de la mesa.....	576 cm <sup>2</sup>
Peso neto.....	92 Kg

Donde:

m = metros

cm = centímetros

mm = milímetros

Kg = kilogramos

l = litros

min = minutos

seg = segundos

Kw = kilowattios

Vol = Voltios

PRM = Revoluciones por minutos

#### 4.2. MICROESTRUCTURAS DE LAS HILERAS A MECANIZARSE

Todas las hileras a mecanizarse son de marca VERO - LIT cuyos núcleos son de carburos de tungsteno. Como se muestra en la figura N° 25.

#### 4.3. MECANIZACION DE HILERAS DE TREFILACION POR ELECTROEROSION

Como se ha dicho anteriormente el núcleo de la hile

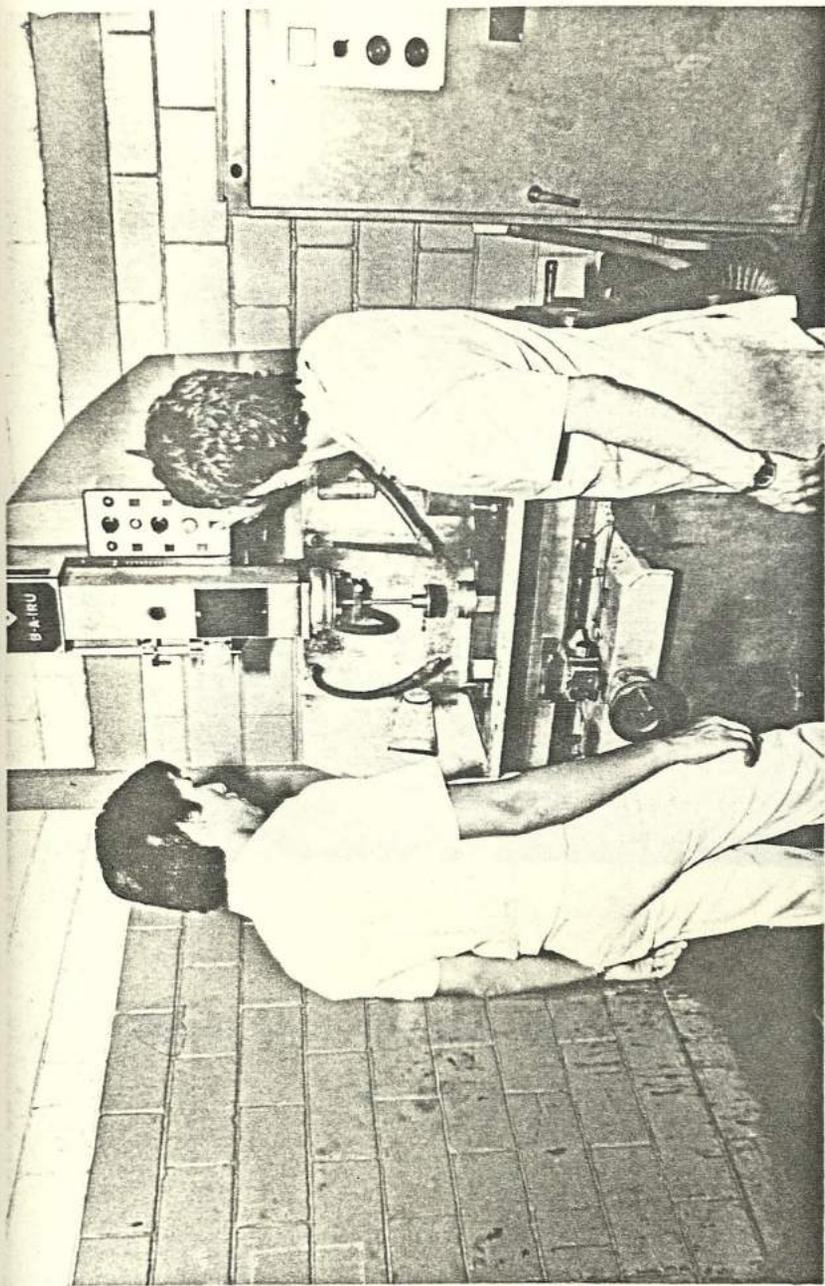


FIGURA N° 23.- MAQUINA DE ELECTROEROSION

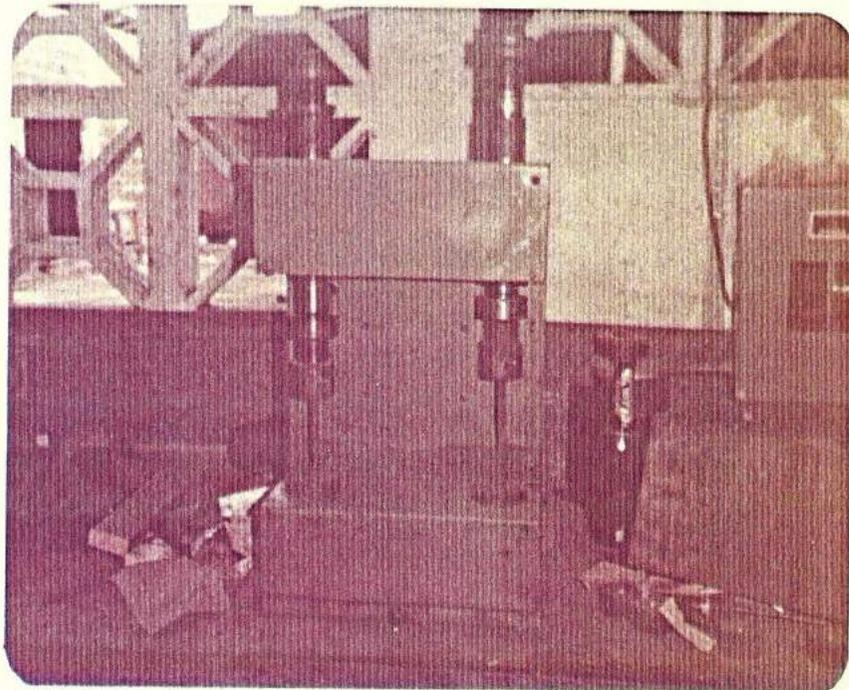


FIGURA Nº 24.- MAQUINA DE RECTIFICAR HILERAS DE CARBURO DE TUNGSTENO

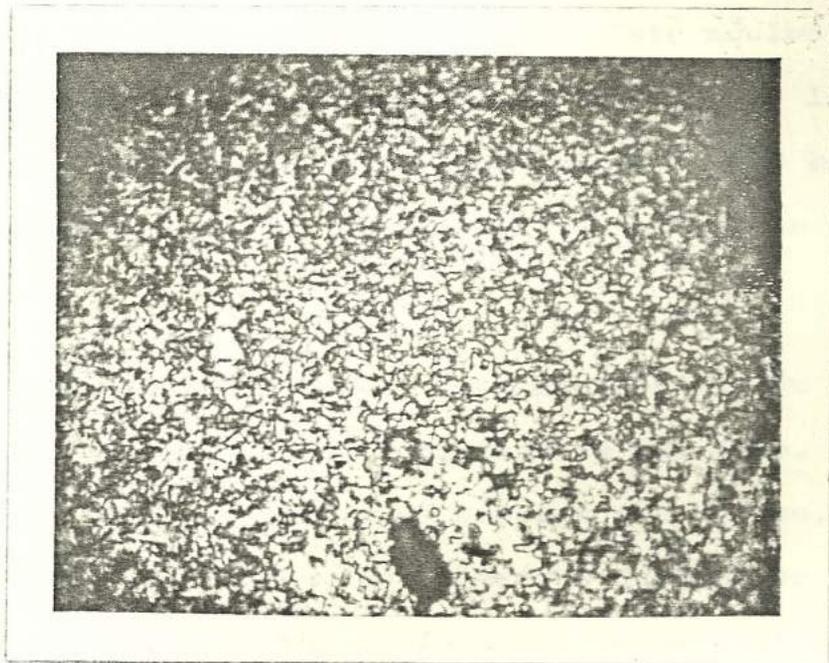


FIGURA Nº 25 MICROESTRUCTURA DEL CARBURO DE TUNGSTENO

Aumento: 1.000 X  
Ataque: KOH (10% solución acuosa) 2 partes  
 $K_3 Fe (CN)_6$  10% solución acuosa 1 parte  
Tiempo de ataque: 3 minutos.  
Tamaño de grano: Media ca WC - Co.

ra es construido por medio de sinterización del carburo de tungsteno con aglomerado de cobalto a elevadas presiones, para luego, una vez que tienen la resistencia suficiente son conformados por los procesos de máquinas-herramientas. Este núcleo se sujeta a un bloque de acero dulce al cual se lo introduce a presión previamente enfriado a  $70^{\circ}\text{C}$  bajo cero y entra con dos centésimas de milímetros de ajuste.

El costo inicial del proceso de fabricación de la hilera de carburo de tungsteno es muy alto, dependiendo de la cantidad de espesor del núcleo, por lo que al desgastarse sus diámetros originales se abre al siguiente tamaño de trabajo. Para efecto de mecanización se toman seis hileras desgastadas en su medida original de diámetro de salida, pero todavía con vida útil ya que no se encuentran picaduras ni rayas en su superficie de contacto.

Los pasos a seguirse en la mecanización por electroerosión son:

- a. Se toman las medidas de los diámetros de entrada y salida, la longitud tanto en la parte del ángulo de entrada como en la parte del ángulo de ataque.

- b. Con las medidas a las que se quieren llegar y las tomadas, calculamos el ángulo de entrada, el ángulo de ataque y la superficie mínima que debe o cupar el campo de erosión.
- c. Calculada la superficie mínima determinamos el - programade desbaste, en base a la rugosidad que se desea obtener en la superficie se selecciona el progrma de pulido, como se verá más adelante.
- d. En base a los programas de desbastes y de pulido se determinan las dimensiones de los electrodos.
- e. Se mecanizan los electrodos en torno universal - con las medidas previamente determinadas.
- f. Se mecaniza la hilera en la máquina de electroe-rosión, primeramente con el programa de desbaste y una vez terminada esta operación se mecaniza la hilera con el programa de pulido.

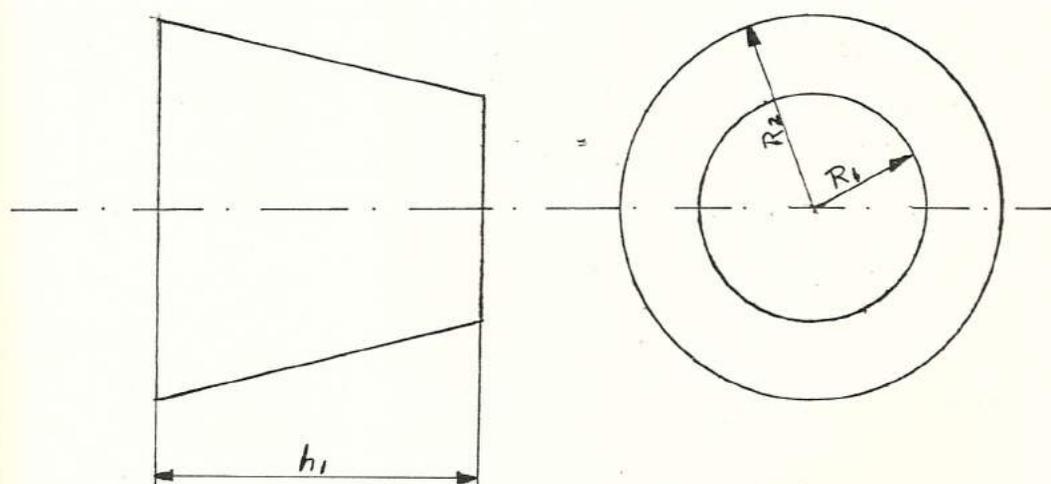
Para determinar la superficie que va a ocupar el canpo de erosión, en la figura N° 2 podemos ver que el núcleo de la hilera en donde se produce la reducción del alambre es de sección cónica y la superficie de apoyo es de sección cilíndrica.

Para la parte cónica truncada utilizamos las siguientes fórmulas:

$$S = \pi \left[ R_1^2 + R_2^2 + (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + h_1^2} \right] \quad (4.1)$$

$$V = \frac{1}{3} h_1 (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2) \quad (4.2)$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left( \frac{R_1 - R_2}{h_1} \right) \quad (4.3)$$



Donde:

$S$  = superficie total del cono

$R_1$  = radio mayor

$R_2$  = radio menor

$h_1$  = altura del cono truncado

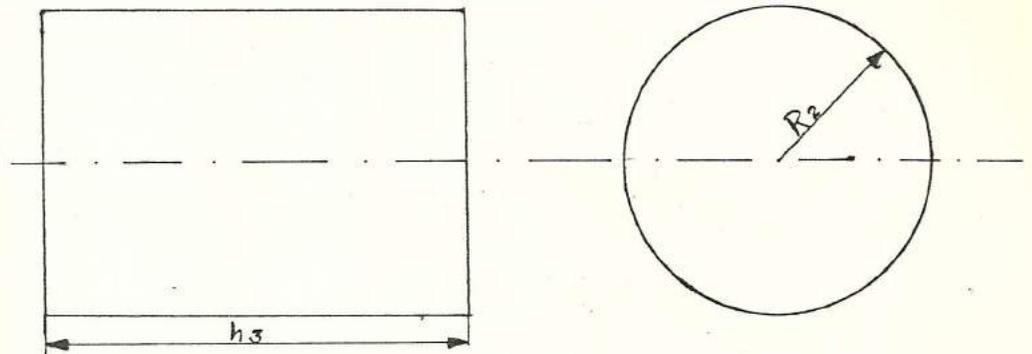
$V$  = volumen del cono

$\alpha$  = semiángulo del cono

Para la sección cilíndrica

$$T = 2 R_2 (R_2 + h_3)$$

$$W = R_2^2 h_3$$



Donde:

$T$  = superficie total del cilindro

$W$  = volumen del cilindro

$h_3$  = longitud e altura del cilindro

$R_2$  = radio del cilindro

Con estas fórmulas, determinadas en el MANUAL DEL TALLER, procedemos a efectuar los cálculos de las diferentes áreas.

Dividiendo en tres secciones, figura N° 26, la hilera que se encuentra en 2,8 mm de diámetro y va a llevarse a un nuevo paso de trabajo de 3,6 mm de diámetro de salida, todos los datos obtenidos para esta hilera están determinados en la tabla N° 7.

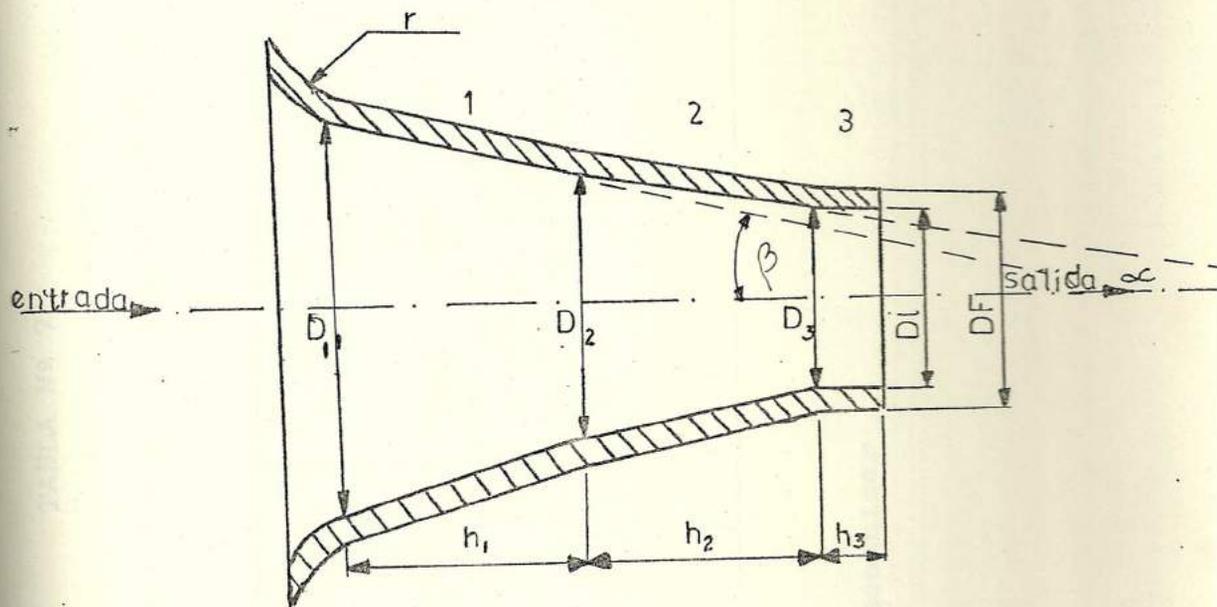


FIGURA N° 26.- SUPERFICIE A OCUPAR EL CAMPO DE EROSION

TABLA N° 7

DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 3,6 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	Sección 1				Sección 2			Sección 3		
	r (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>3</sub> (mm)
Entrada	8,0	9,0	9,7	5,0	4,0	4,7	5,7	2,8	3,6	2,0
Salida		4,0	4,7	5,0	2,8	3,5	5,7	2,8	3,6	2,0

Di = diámetro inicial antes de mecanizar

Df = diámetro final a mecanizar

Cálculos:

Sección 1 Parte del ángulo de entrada

Superficie inicial, utilizando fórmula (4.1)

$$S_i = \pi \left[ \left( \frac{9,0}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,0}{2} \right)^2 + \left( \frac{9,0 + 4,0}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{9,0}{2} - \frac{4,0}{2} \right)^2 + (5,0)^2} \right]$$

$$S_i = 60,8 \pi \text{ mm}^2$$

Superficie final

$$S_f = \pi \left[ \left( \frac{9,7}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,7}{2} \right)^2 + \left( \frac{9,7 + 4,7}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{9,7 - 4,7}{2} \right)^2 + (5,0)^2} \right]$$

$$S_f = 69,28 \pi \text{ mm}^2$$

Superficie neta a erosionar de sección 1

$$S_1 = S_f - S_i$$

$$S_1 = (69,28 - 60,8) \pi$$

$$S_1 = 8,45 \pi \text{ mm}^2$$

Volumen inicial, utilizando fórmula (4.2)

$$V_i = \frac{1}{3} \pi (5,0) \left[ \left( \frac{9,0}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,0}{2} \right)^2 + \left( \frac{9,0}{2} \right) \left( \frac{4,0}{2} \right) \right]$$

$$V_i = 55,4 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen final

$$V_f = \frac{1}{3} \pi (5,0) \left[ \left( \frac{9,7}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,7}{2} \right)^2 + \left( \frac{9,7}{2} \right) \left( \frac{4,7}{2} \right) \right]$$

$$V_f = 67,37 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen neto a erosionar de sección 1

$$V1 = V_f - V_i$$

$$V1 = (67,37 - 55,4)\pi \text{mm}^3$$

$$V1 = 11,97\pi \text{mm}^3$$

El semiángulo de entrada lo determinamos utilizando fórmula (4.3)

$$\beta = t_g^{-1} \left( \frac{9,7 - 4,7}{2 \cdot 5} \right)$$

$$\beta = 26^\circ$$

Sección 2 Parte del ángulo de la hilera

Superficie inicial

$$S_i = \pi \left[ \left( \frac{4,0}{2} \right)^2 + \left( \frac{2,8}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,0+2,8}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{4,0-2,8}{2} \right)^2 + (5,7)^2} \right]$$

$$S_i = 24,44 \pi \text{mm}^2$$

Superficie final

$$S_f = \pi \left[ \left( \frac{4,7}{2} \right)^2 + \left( \frac{3,6}{2} \right)^2 + \left( \frac{4,7+3,6}{2} \right) \sqrt{\left( \frac{4,7-3,6}{2} \right)^2 + (5,7)^2} \right]$$

$$S_f = 32,07 \pi \text{mm}^2$$

Superficie neta a erosionar de sección 2

$$S_2 = S_f - S_i$$

$$S_2 = (32,07 - 24,44) \pi \text{mm}^2$$

$$S_2 = 7,63 \pi \text{mm}^2$$

Volumen inicial

$$V_i = \frac{1}{3}\pi(5,7) \cdot \left[ \left(\frac{4,0}{2}\right)^2 + \left(\frac{2,8}{2}\right)^2 + \left(\frac{4,0}{2} \cdot \frac{2,8}{2}\right) \right]$$

$$V_i = 16,64 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen final

$$V_f = \frac{1}{3}\pi(5,7) \cdot \left[ \left(\frac{4,7}{2}\right)^2 + \left(\frac{3,6}{2}\right)^2 + \left(\frac{4,7}{2} \cdot \frac{3,6}{2}\right) \right]$$

$$V_f = 24,09 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen neto a erosionar de sección 2

$$V_2 = V_f - V_i$$

$$V_2 = (24,09 - 16,64) \pi \text{ mm}^3$$

$$V_2 = 8,045 \pi \text{ mm}^3$$

Para la determinación del semiángulo de la hilera, llamado también semiángulo de ataque, utilizamos - fórmula (4.3)

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left( \frac{4,7 - 3,5}{2 \cdot 5,7} \right)$$

$$\alpha = 6^\circ$$

Sección 3 parte cilíndrica de la superficie de apoyo.

Superficie inicial, utilizando fórmula (4.4)

$$T_i = 2\pi \left(\frac{2,8}{2}\right) \cdot \left(\frac{2,8}{2}\right)$$

$$T_i = 9,52 \pi \text{ mm}^2$$

Superficie final

$$T_f = 2\pi\left(\frac{3,6}{2}\right)\left(\frac{3,6}{2} + 2,0\right)$$

$$T_f = 13,12 \pi \text{ mm}^2$$

Superficie neta a erosionar de sección 3

$$T = T_f - T_i$$

$$T = (13,12 - 4,52) \pi \text{ mm}^2$$

$$T = 3,6 \pi \text{ mm}^2$$

Volumen inicial, utilizando fórmula (4.5)

$$W_i = \pi\left(\frac{2,8}{2}\right)^2 * (2,0)$$

$$W_i = 3,92 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen final

$$W_f = \pi\left(\frac{3,5}{2}\right)^2 * (2,0)$$

$$W_f = 6,125 \pi \text{ mm}^3$$

Volumen neto a erosionar de sección 3

$$W = W_f - W_i$$

$$W = (6,125 - 3,92) \pi \text{ mm}^3$$

$$W = 2,2 \pi \text{ mm}^3$$

De aquí que la superficie mínima a ocupar el campo de erosión en la hilera será:

$$S = S_1 + S_2 + T$$

$$S = [8,45 \text{ mm}^2 + 7,63 \text{ mm}^2 + 3,6 \text{ mm}^2] \pi$$

$$S = 60,1 \text{ mm}^2$$

El volumen total a erosionar de la hilera será:

$$V = V_1 + V_2 + W$$

$$V = 11,97 \pi \text{ mm}^3 + 8,045 \pi \text{ mm}^3 + 2,2 \pi \text{ mm}^3$$

$$V = 69,79 \text{ mm}^3$$

Siguiendo el mismo procedimiento determinamos la superficie mínima que debe ocupar el campo de erosión en las otras hileras, con los datos de las tablas N° 9 y N° 10, donde se mantiene constante el ángulo de la hilera y la superficie de apoyo.

Hileras de 3,5 mm de diámetro de salida se la rectifica a 4,16 mm de diámetro de salida. Obteniéndose los siguientes resultados.

Superficie mínima que debe ocupar el campo de erosión  $S = 60,0 \text{ mm}^2$

Angulo de entrada =  $28^\circ$

Angulo de la hilera =  $6^\circ$

Hileras de 3,6 mm de diámetro de salida se la rectifica a 4,16 mm de diámetro de salida. Obteniéndose los siguientes resultados.

Superficie mínima que debe ocupar el campo de erog

TABLA N° 8

DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 4,16 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	Sección 1				Sección 2			Sección 3		
	r (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>3</sub> (mm)
Entrada	8,0	9,0	9,7	3,7	5,0	5,67	7,0	3,5	4,16	2,0
Salida		5,0	5,67	3,7	3,5	4,2	7,0	3,5	4,16	2,0

TABLA N° 9

DATOS PARA HILERA QUE SE VA A LLEVAR A 4.16 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	Sección 1				Sección 2			Sección 3		
	r (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	Di (mm)	Df (mm)	h <sub>3</sub> (mm)
Entrada	8,0	9,0	9,7	4,3	5,0	5,6	6,0	3,6	4,16	2,0
Salidad		5,0	5,6	4,3	3,6	4,2	6,0	3,6	4,16	2,0

si3n  $S = 61,1 \text{ mm}^2$

Angulo de entrada  $= 26^\circ$

Angulo de la hilera  $= 6^\circ$

#### 4.3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ELECTRODO

Habiendo determinado la superficie que va a ocupar el campo de erosi3n de las diferentes hileras, los 3ngulos de entrada y de ataque y, la superficie de apoyo, con estos valores construimos los electrodos.

En primer lugar el material a utilizar como electrodo herramienta, segun tabla N<sup>o</sup> 5, seleccionamos el cobre tungsteno. Pero debido a que no se pudo conseguir en el mercado seleccionamos como material el cobre segun la misma tabla.

Para mecanizar los electrodos, con el dato de superficie m3nima que debe ocupar el campo de erosi3n encontrado, cuyo promedio es de  $60 \text{ mm}^2$ , vamos a la tabla N<sup>o</sup> 16, de posiciones y valores resultados, segun ap3ndice, para electrodo de cobre. Puesto que en el periodo de desbaste no interesa la rugosidad sino la capacidad de erosi3n por minuto, velocidad de erosi3n, y un desgaste m3nimo del

electrodo, con estos parámetros determinamos como programa del generador de la máquina de electro-erosión el siguiente:

Corriente de impulso	V
Tiempo de impulsos	10
Tiempo de pausa	4

Las dimensiones del electrodo de pulido van en función de la selección del programa para el pulido, y esta elección depende de la rugosidad que se desea obtener. Para el caso de hileras de trefilación esta rugosidad debe ser entre 0,8 y 8,0  $\mu\text{m}$ , que visto en tabla N° 15, para electrodo de cobre, y para una rugosidad de 6  $\mu\text{m}$  nos determina el siguiente programa en el generador de la máquina.

Corriente de impulsos	II
Tiempo de impulsos	2
Tiempo de pausa	2

Para las diferentes hileras las dimensiones de los electrodos será, según figura N° 27 y seleccionando sin pulido posterior utilizamos la fórmula (2.9)

En figura N° 27:

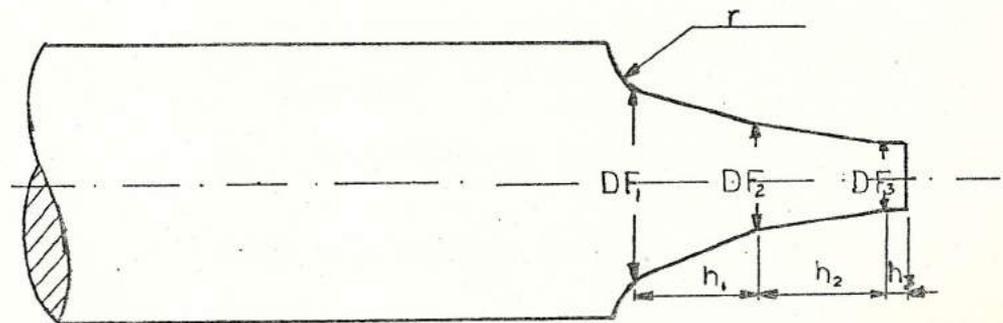


FIGURA N° 27.- DIMENSIONES DEL ELECTRODO

$r$  = radio de curvatura a la entrada de la hilera

$DF_1$  = diámetro de entrada de la hilera

$DF_2$  = diámetro a la entrada de la reducción propiamente dicha

$DF_3$  = diámetro de la parte cilíndrica

$h_1$  = longitud de la parte a la entrada de la reducción

$h_2$  = longitud donde se efectúa la reducción misma

$h_3$  = longitud de la superficie de apoyo

Para una hilera de diámetro final en la parte cilíndrica de 3,6 mm según fórmula (2.9) las dimensiones para el electrodo de pulido

son:

$$DF_3 = 3,6 \text{ mm} - 0,034 \text{ mm} = 3,566 \text{ mm}$$

$$DF_2 = 4,7 \text{ mm} - 0,034 \text{ mm} = 4,666 \text{ mm}$$

$$DF_1 = 9,7 \text{ mm} - 0,034 \text{ mm} = 9,666 \text{ mm}$$

$$r = 8,0 \text{ mm} - 0,024 \text{ mm} = 7,976 \text{ mm}$$

$$h_1 = 5,0 \text{ mm}$$

$$h_2 = 5,7 \text{ mm}$$

$$h_3 = 2,0 \text{ mm}$$

Las dimensiones para el electrodo de desbaste son:

$$DF_3 = 3,566 \text{ mm} - 0,160 \text{ mm} = 3,40$$

$$DF_2 = 4,666 \text{ mm} - 0,160 \text{ mm} = 4,50$$

$$DF_1 = 9,666 \text{ mm} - 0,160 \text{ mm} = 9,50$$

$$r = 7,966 \text{ mm} - 0,160 \text{ mm} = 7,80$$

$$h_1 = 5,0 \text{ mm}$$

$$h_2 = 5,7 \text{ mm}$$

$$h_3 = 2,0 \text{ mm}$$

Una vez determinados los valores y las dimensiones de los electrodos a trabajar con los respectivos ángulos, de las diferentes hileras, siguiendo el mismo procedimiento y mismos programas, tenemos las tablas N° 10, N° 11 y N° 12.

Todos los electrodos son fabricados en torno universal por su fácil mecanización. Hay que tener aquí muy en cuenta la habilidad del operario en el torno, que tiene que ser calificado, ya que en este período de mecanización se le da al electrodo las dimensiones que en el proceso final de mecanizado debe tener la hilera.

#### 4.3.2 SELECCION DE PARAMETROS

Para la selección del programa de desbaste, aparte de la superficie mínima de erosión, utilizamos el criterio que la capacidad de e

TABLA N° 10

DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA DE 3,6 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	r	DF <sub>1</sub>	DF <sub>2</sub>	DF <sub>3</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	β	α
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	°	'
Electrodo de desbaste	7,81	9,50	4,50	3,40	5,0	5,7	2,0	26	6
Electrodo de piludo	7,97	9,66	4,66	3,56	5,0	5,7	2,0	26	6

TABLA N° 11

v DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA DE 4,16 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	r	DF <sub>1</sub>	DF <sub>2</sub>	DF <sub>3</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	β	α
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	4°	4°
Electrodo de desbaste	9,81	9,50	5,50	4,06	3,7	7,0	2,0	28	6
Electrodo de pulido	7,97	9,66	5,66	4,13	3,7	7,0	2,0	28	6

TABLA N° 12

DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS PARA HILERA DE 4,16 mm DE DIAMETRO DE SALIDA

	r (mm)	DF <sub>1</sub> (mm)	DF <sub>2</sub> (mm)	DF <sub>3</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>3</sub> (mm)	β 4°	α 4°
Electrodo de desbaste	7,81	9,50	5,4	4,06	4,3	6,0	2,0	25	6
Electrodo de pulido	7,97	9,66	5,66	4,13	4,3	6,0	2,0	25	6

rosión por minuto debe ser máxima con un desgaste pequeño del electrodo. Habrá ocasiones que tengamos que sacrificar el desgastel del electrodo para aumentar la velocidad de erosión y viceversa.

#### 4.3.3. PROGRAMA DE DESBASTE

La programación del generador para el desbaste una vez determinada la superficie mínima,  $60 \text{ mm}^2$ , que debe ocupar el campo de erosión obtenemos

Corriente de impulsos	V
Tiempo de impulso	10
Tiempo de pausa	4

#### 4.3.4. PROGRAMA DE PULIDO

La programación del generador para el pulido, para una rugosidad de  $6 \text{ um}$  nos da:

Corriente de impulsos	II
Tiempo de impulso	2
Tiempo de pausa	2

##### 4.3.4.1. IMPLEMENTO DE CONTROL DE MEDIDAS

Como implemento de control de medidas la máquina tiene un nonio y un

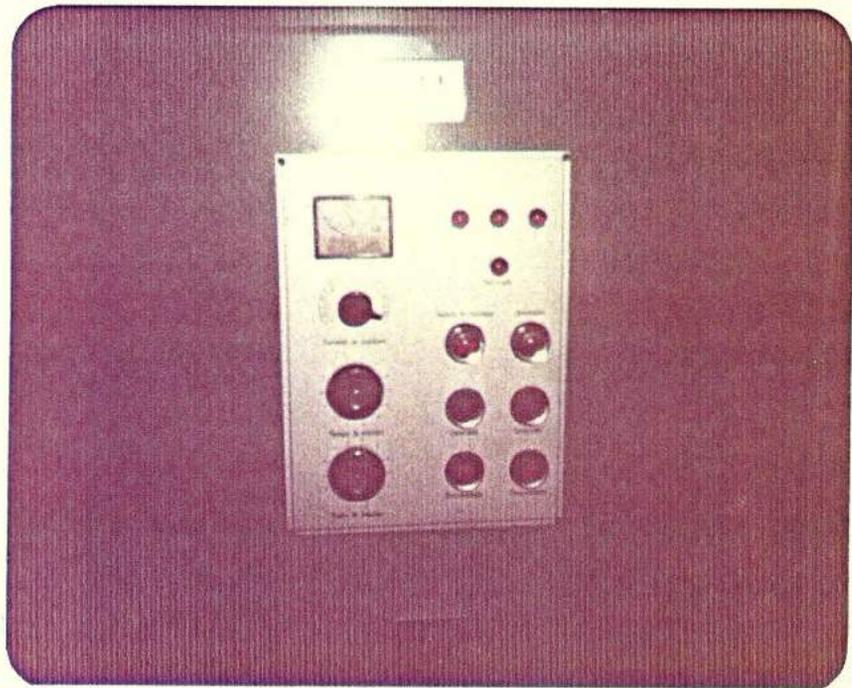


FIGURA Nº 28.- ELEMENTOS DE MANDO DEL GENERADOR

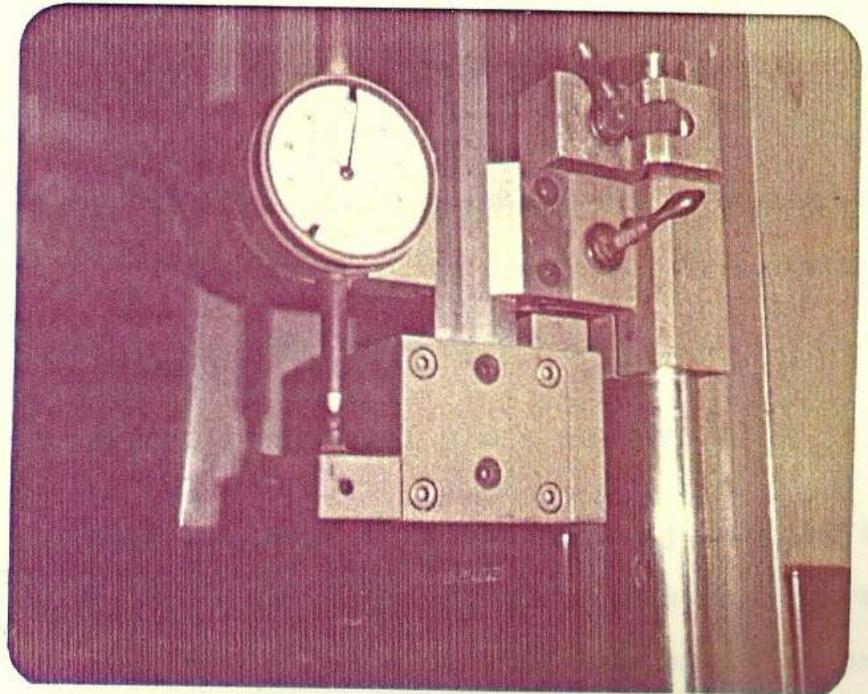


FIGURA N° 29.- IMPLEMENTO DE CONTROL DE MEDIDAS

indicador de carátula que mide la -  
profundidad de erosión.

Las medidas finales a las que se -  
quieren llegar están en los electrodo  
dos, que cuidadosamente fueron medid  
dos con un micrómetro. Al poner en  
contacto eléctrico el electrodo y la  
pieza se fija la profundidad que se  
desea erosionar. Al efectuarse la  
profundidad deseada, la erosión fin  
nalizará.

#### 4.3.5. EFECTO DE LA ACCION DEL TEMPORIZADOR

Este dispositivo sirve para ajustar el tiem-  
po de erosionado con el objeto de retirar -  
brevemente el electrodo del sitio de traba-  
jo para poder extraer con más facilidad la vi  
ruta producida al erosionar uno de los tempo-  
rizadores, de 30 a 60 segundos, se ajusta pa-  
ra que el electrodo trabaje dentro de este-  
tiempo. El otro temporizador, de 0,3 a 6 se-  
gundos se ajusta para que el electrodo se re-  
tire del lugar del trabajo.

El ajuste de ambos elementos depende del tra-  
bajo a realizar. El de trabajo debe ser lo

más largo posible y el de pausa por el contrario lo más corto posible. Normalmente el temporizador se emplea en los trabajos de a finado, cuando el Gap es muy estrecho y es difícil la renovación del dieléctrico en el lugar del trabajo.

Para el trabajo efectuado con el programa de desbaste, V-10-4, se tiene un Gap de 80  $\mu\text{m}$ , no utilizó el temporizador, sin embargo después de cierto tiempo de trabajo se observa que la pluma del amperímetro vibra debido a que la intensidad media de corriente que pasa por el electrodo y la pieza de trabajo no es constante, esto es debido a que se ha acumulado residuos de carbón, por lo que se procede a limpiar a éste. Al no verificar esto ocurriría que el electrodo se desgasta más y aumenta el tiempo de trabajo.

Para el trabajo efectuado con el programa de pulido, II-2-2, se tiene un Gap de 17  $\mu\text{m}$ , se utiliza el temporizador con un tiempo de trabajo de 30 segundos y un tiempo de pausa de 3 segundos, puesto que es un material de elevada dureza, con lo que produce gran acumulación de material erosionado al ser más gran

de el tiempo de trabajo. Al tener un Gap estrecho el tiempo de pausa no puede ser menor ya que no habrá tiempo de quitar las virutas.

#### 4.4. MECANIZACION DE HILERAS DE TREFILACION POR ABRASION

El proceso de mecanización por abrasión de las hileras de trefilación fue realizado en las industrias-GAVI que gentilmente nos facilitó sus instalaciones y equipos de rectificado que consta de los siguientes componentes.

Máquina rectificadora de hileras

Máquina rectificadora de agujas

Máquina para pulido

Se toma como matrices a rectificar seis hileras que han perdido sus diámetros originales de salida y son llevadas a un nuevo diámetro de trabajo.

El proceso que se sigue para la mecanización de las hileras por abrasión es el siguiente.

- a. Se trabaja en la máquina rectificadora de hileras con aguja cónica que tiene un ángulo de  $12^{\circ}$  y con abrasivo carburo de boro de grano 400, porque así lo indica el fabricante de hileras para el desbaste, la parte del ángulo de la hilera es rectificadora hasta hacerla cono.

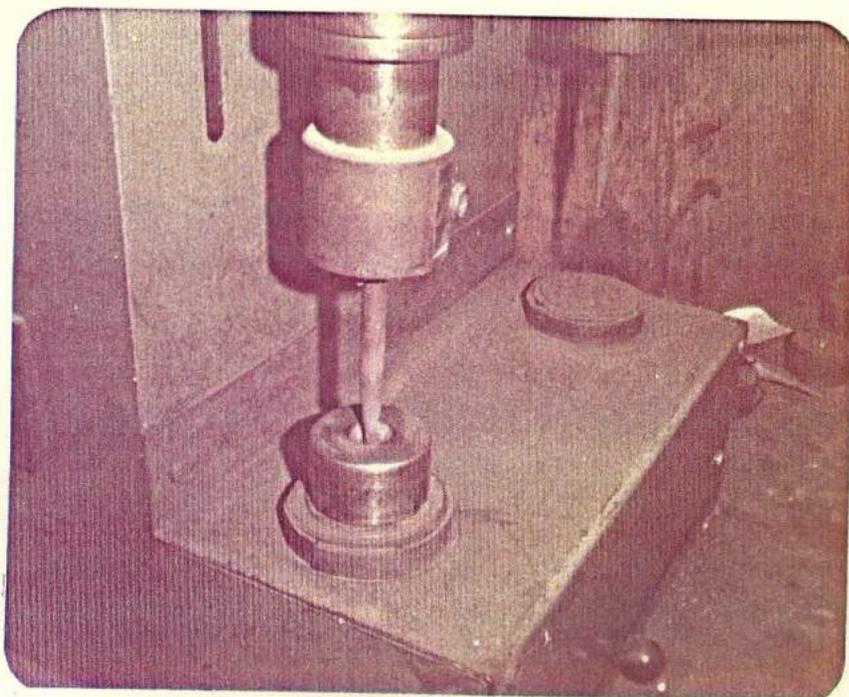


FIGURA N° 30.- MAQUINA RECTIFICADORA DE HILERAS

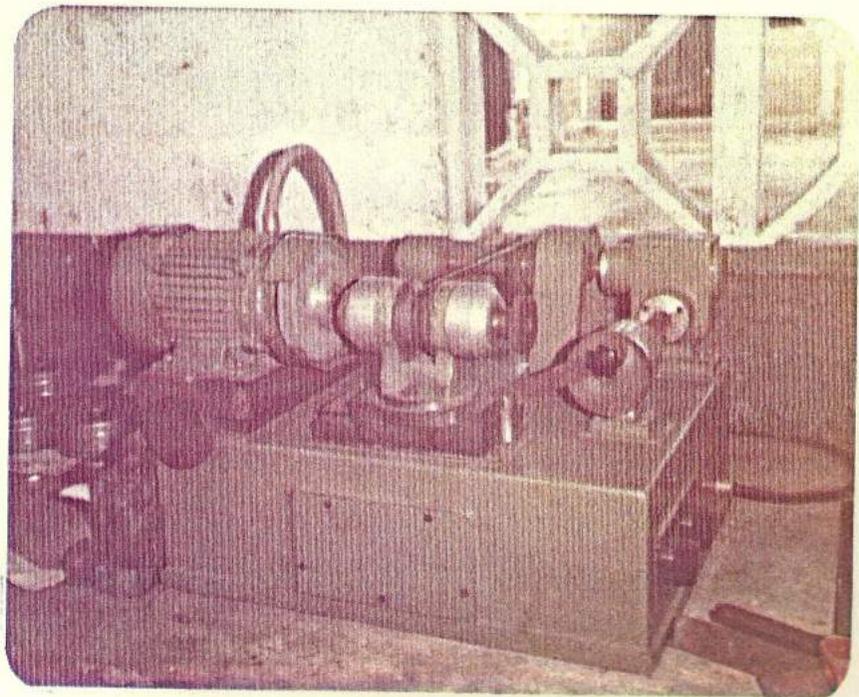


FIGURA Nº 31.- MAQUINA RECTIFICADORA DE AGUJAS

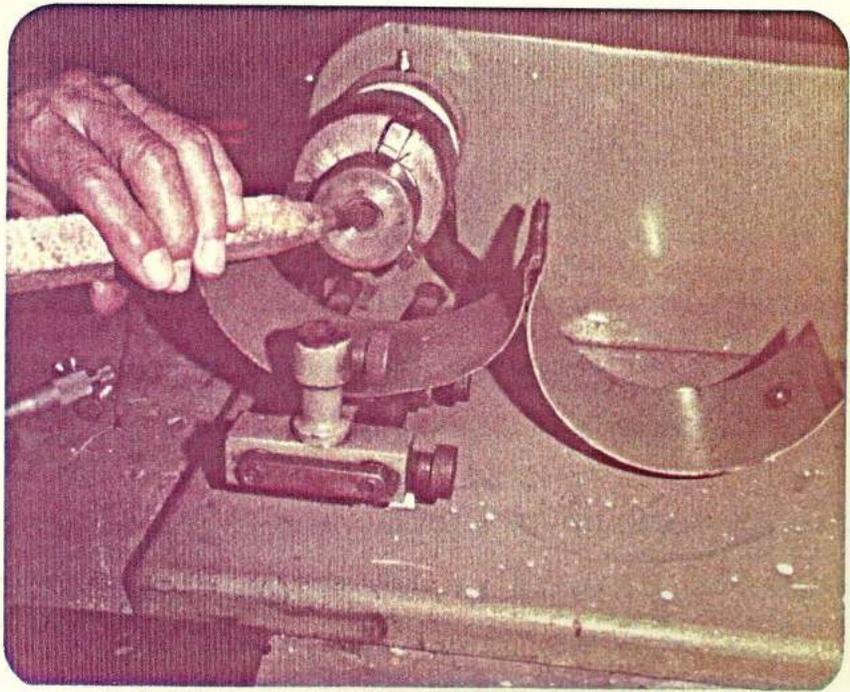


FIGURA Nº 32.- MAQUINA PARA PULIDO MANUAL

- b. La hilera se coloca en máquina para pulido, y en forma manual con aguja cónica de  $40^{\circ}$  y carburo de boro de grano 400, se rectifica el ángulo de entrada y el ángulo de salida, como se muestra en las figuras N° 33 y N° 34.
- c. Se limpian las hileras con gasolina ya que no debe quedar nada del abrasivo de carburo que pueda producir rayaduras en el pulido posterior.
- d. En la máquina de pulido se realiza un prepulido manual, en la parte del ángulo de reducción de la hilera, con pasta de diamante de rugosidad de  $8 \mu\text{m}$  el cual está mezclado con aceite.
- e. En la máquina de pulido se termina de pulir el ángulo de reducción de la hilera y la superficie de guía cilíndrica con pasta de diamante de  $4 \mu\text{m}$  de rugosidad.

#### 4.4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE HERRAMIENTAS PARA RECTIFICADO POR ABRASION

Tomando en consideración que el ángulo de la hilera de trefilación es de  $12^{\circ}$ , se elabora en la máquina rectificadora de aguja, una aguja de  $12^{\circ}$  de material acero-plata. Se toma esta aleación por cuanto presenta una superficie de mayor resistencia al desgaste.

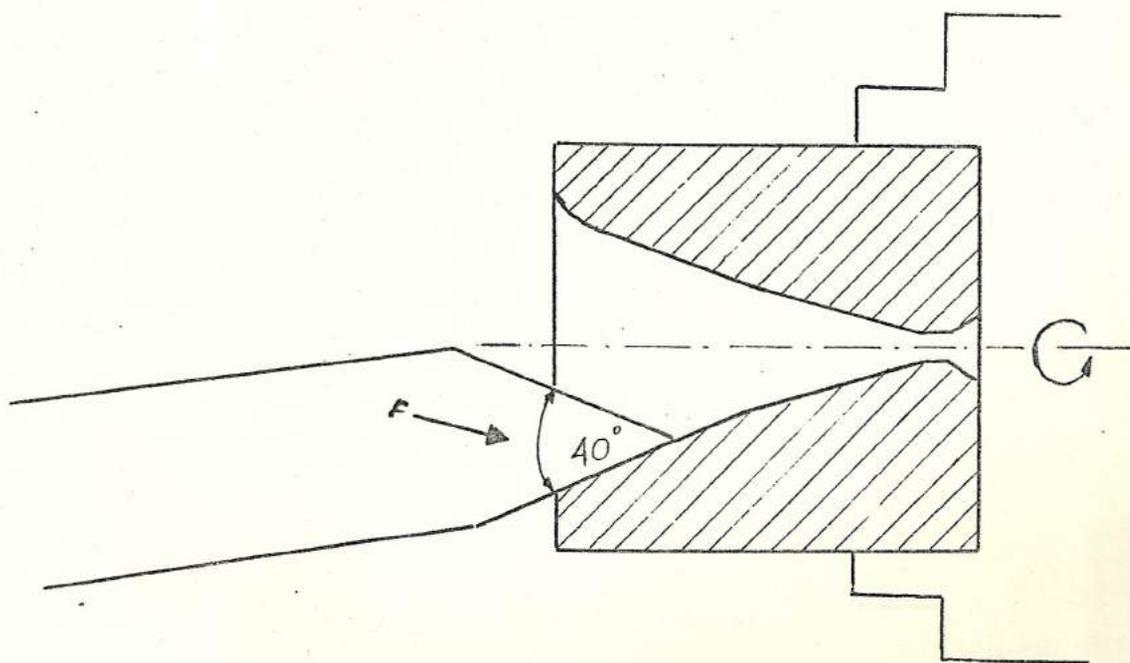


FIGURA N° 33.- PRE-PULIDO DEL ANGULO DE ENTRADA DE LA HILERA

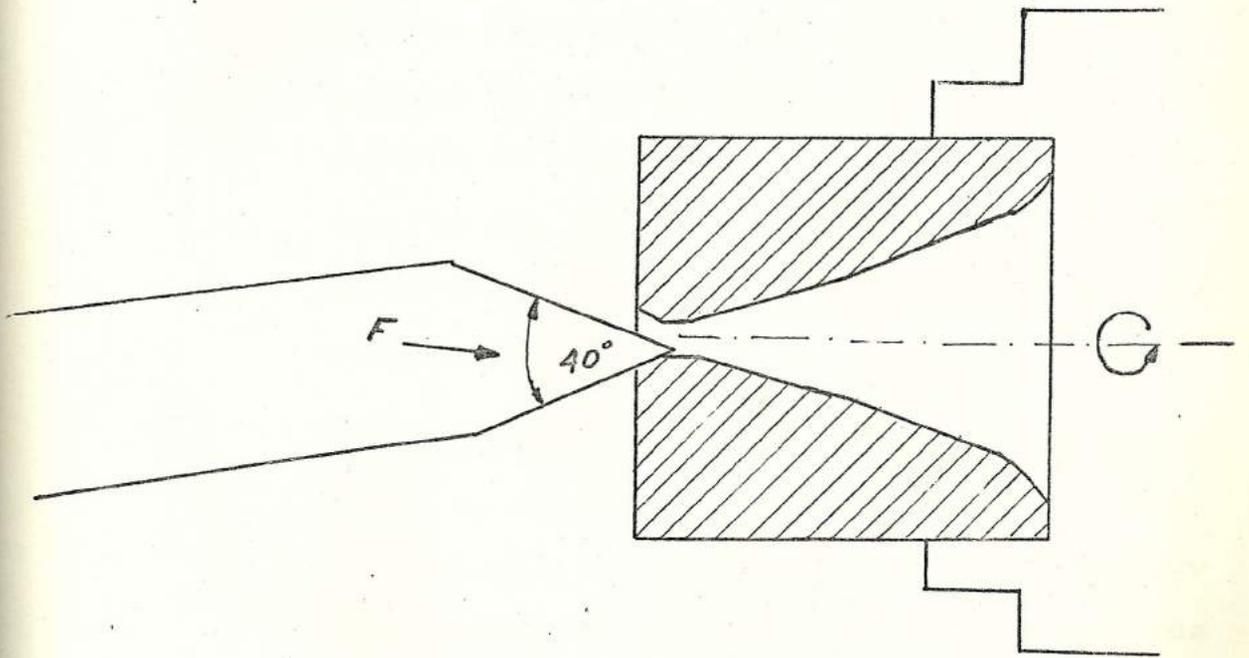


FIGURA N° 34.- PRE-PULIDO DEL ANGULO DE SALIDA DE LA HI  
LERA

Se construye también otra aguja del mismo material pero con un ángulo de  $40^{\circ}$  que va servir para rectificar el ángulo de entrada y el ángulo de salida de la hilera.

#### 4.4.2. SELECCION DE PARAMETROS

Para la obtención de un buen resultado en el proceso de rectificado por abrasión hay que considerar la selección de los granos abrasivos, ya que se desea un buen acabado superficial, que es medido por la rugosidad que se obtiene en la pieza.

El material a rectificar es carburo de tungsteno, de alta resistencia al desgaste y elevada dureza, lo que por recomendación de los fabricantes se usa como abrasivo carburo de boro grano N° 400 para el desbaste, para el prepulido pasta de diamante de  $8 \mu\text{m}$  de rugosidad y para el pulido pasta de diamante de  $4 \mu\text{m}$  de rugosidad, que es la deseada.

Se considera constante además del acabado requerido, el material a rectificar y el área de contacto la naturaleza de la operación, lo que hace, que la velocidad de rotación del porta-hileras igual a 875 RPM y la velocidad de

la aguja igual a 7,7 cm/seg. en la máquina-rectificadora de hileras sean constantes.

Son factores variables a considerar en esta-operación la concentración del abrasivo y la habilidad del operario.

#### 4.5. RESULTADOS EN EL PROCESO DE ELECTROEROSION EN FUNCION DEL PROGRAMA DE PULIDO

Las dimensiones finales de las hileras mecanizadas por electroerosión están determinadas por las dimensiones que se les da a los electrodos, que depende de la habilidad del operario, el cual es muy controlable, lo que no ocurre en el otro proceso.

En la figura N° 35 se muestra la mecanización del electrodo en el torno.

En la figura N° 36 se muestra la toma de dimensiones que debe tener el electrodo.

Para efectos de medir dureza y rugosidad se partieron por el centro de su eje tres hileras, las restantes son trabajadas en la reducción del alambrón.

##### 4.5.1. CONTROL DIMENSIONAL

El control dimensional está determinado por el indicador de carátula que mide la profundidad de erosión. La superficie de apoyo y

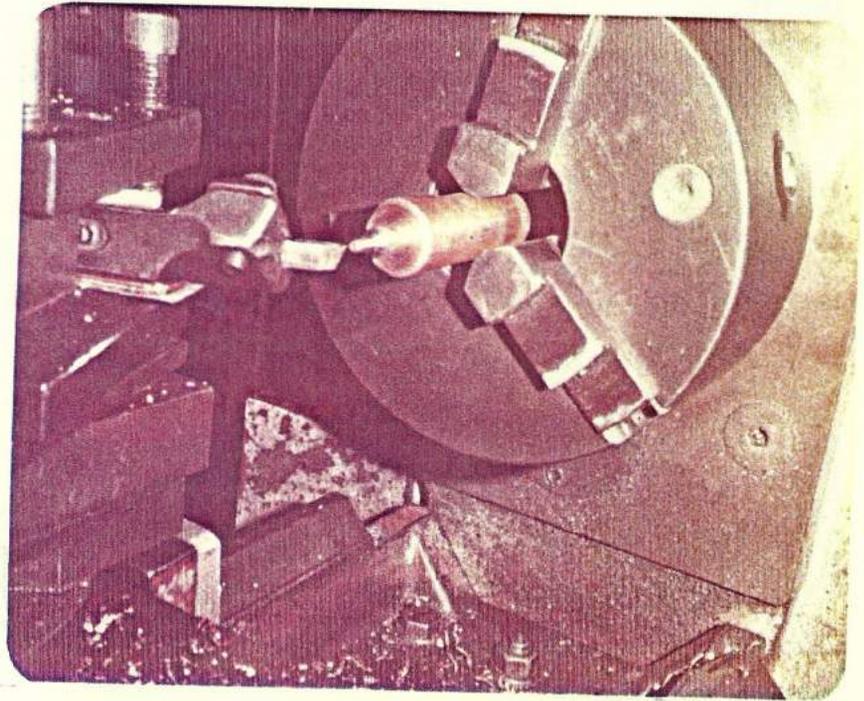


FIGURA Nº 35.- MECANIZACION DEL ELECTRODO EN EL TORNO

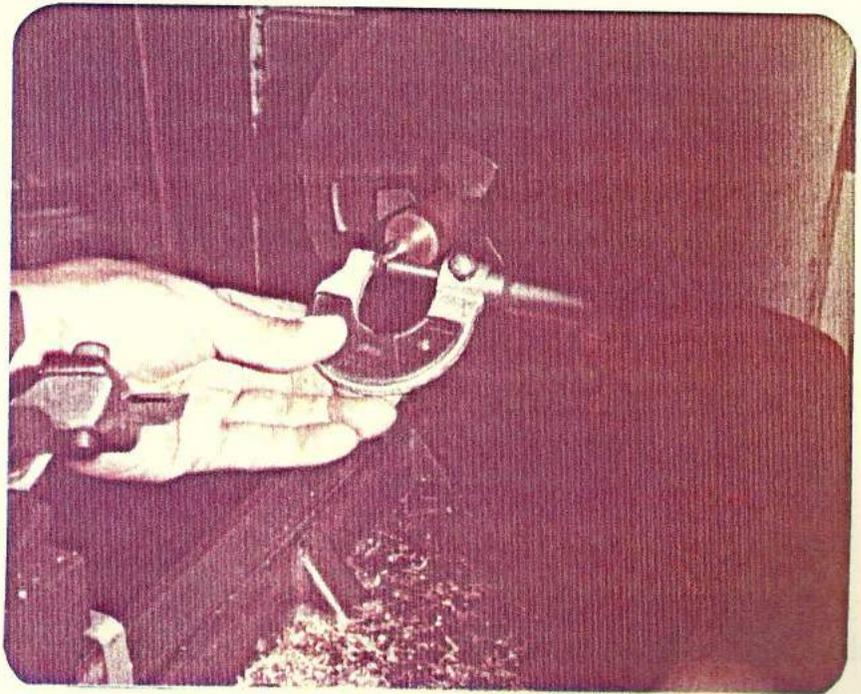


FIGURA Nº 36.- TOMA DE DIMENSIONES QUE DEBE TENER EL ELEC  
TRODO

el ángulo de reducción de la hilera son cons  
tantes, obteniéndose los siguientes resultata  
dos medidos en el diámetro de salida y en a  
lambrón.

Diámetro <u>o</u> riginal (mm)	Diámetro que se trabaja (mm)	Diámetro que se obtiene (mm)
2,7	2,8	3,54
2,7	2,85	3,56
3,3	3,5	4,1
3,3	3,5	4,1
3,45	3,6	4,15
3,45	3,6	4,1

#### 4.5.2. DUREZA Y RUGOSIDAD

La dureza de las hileras de trefilación, del núcleo de carburo de tungsteno, está determin  
nado por el tamaño de las partículas de carbu  
buro, su distribución y porosidad, y la calida  
dad de enlace entre los cristales de cobalto  
y carburos. La medida de dureza fue tomada-  
en máquina WILSON, figura N° 37, se la toma-  
en escala Rocwell A por cuanto el espesor es  
pequeño y el material es duro.

La dureza y rugosidad obtenida en hilera maq  
uinada por electroerosión son:

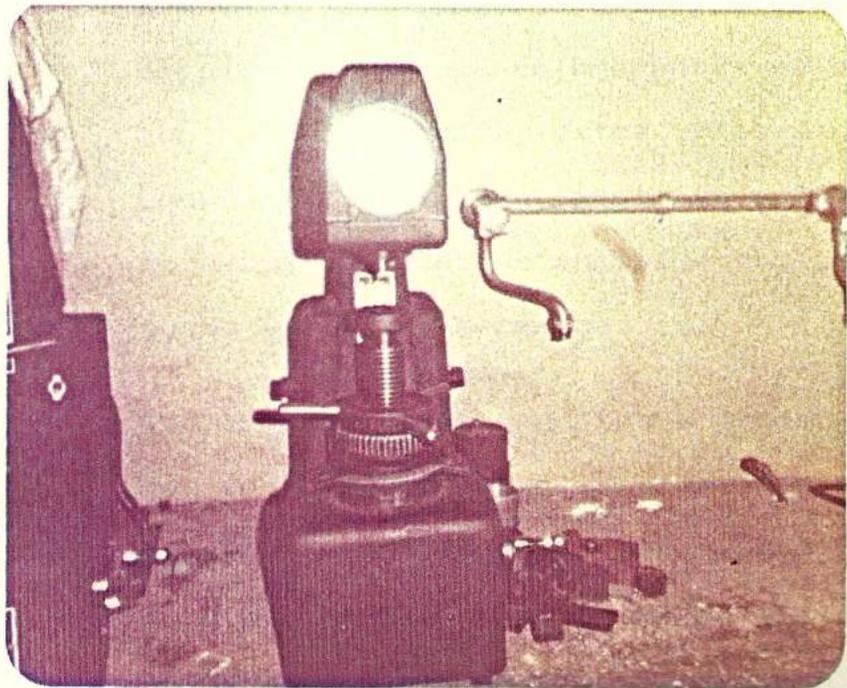


FIGURA N° 37.- INSTRUMENTO DE MEDICION DE DUREZA

Diámetro que se obtiene (mm)	Dureza $R_A$	Rugosidad $\mu m$
3,54	89	6
4,1	89	7
4,15	89	6

Los valores de rugosidad fueron tomados en palpador SIGMA que se encuentra en el laboratorio de metrología, estos valores no pueden considerarse del todo exacto ya que lo indicado sería utilizar un rugosímetro, que no lo posee el taller mecánico.

Sin embargo estos resultados pueden ser tomados con bastante aproximación, tomándose en consideración que se va a obtener una rugosidad de  $6 \mu m$ , en base a programa de pulido II-2-2, en la superficie del núcleo de la hilera.

#### 4.5.3. TIEMPO DE MECANIZADO

El tiempo total de mecanización de las hileras de trefilación está determinado por:

$$T_{me} = T_t + T_d + T_p \quad (4.6)$$

Donde:

$T_{me}$  = tiempo total de mecanizado por electroerosión (mm)

$T_t$  = tiempo de mecanizar electrodos en torno  
(min)

$T_d$  = tiempo de mecanizar hileras en proceso-  
so de desbaste (min)

$T_p$  = tiempo de mecanizar hileras en proceso  
de pulido (min)

Estos valores obtenidos en la práctica se re-  
presentan por:

Diámetro de salida que se obtiene (mm)	$T_t$ (min)	$T_d$ (min)	$T_p$ (min)	$T_{me}$ (min)
3,54	70	12	80	162
3,50	75	10	85	170
4,10	72	13	120	205
4,10	75	15	118	208
4,15	70	15	115	200
4,15	70	15	110	195

Los valores de tiempo de mecanizado, en forma teórica, son determinados por la fórmula - (2.10).

Para hilera que se obtiene 3,54 mm. de diámetro en la salida el tiempo teórico de desbaste  $T_d$  es:

$$T_d = \frac{V_d}{M_d}$$

$V_d = 50,25 \text{ mm}^3$ ; valor obtenido con las medidas de electrodo de desbaste y fórmula (4.2).

$M_d = 30 \text{ mm}^3/\text{min}$ ; valor elegido de capacidad de erosión para programa de desbaste.

$$T_d = \frac{50,25 \text{ mm}^3}{30 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$T_d = 1,2 \text{ min}$$

El tiempo teórico de pulido será:

$$T_p = \frac{V_p}{M_p}$$

$V_p = 19,54 \text{ mm}^3$ ; valor obtenido con las medidas de electrodo de pulido y fórmula (4.2).

$M_d = 1 \text{ mm}^3/\text{min}$ ; valor real de capacidad de erosión para una rugosidad de 6 um en el programa de pulido.

$$T_p = \frac{19,54 \text{ mm}^3}{1 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$T_p = 19,54 \text{ min}$$

Se puede ver claramente que los valores de tiempo teórico de mecanizado en máquina de electroerosión difieren del valor real obtenido. Adelantando criterios de análisis de resultados, se debe indicar que los valores

tanto para desbaste como para pulido de la capacidad de erosión por minuto, evacuación práctica del material, son tomadas en tabla Nº 15 cuyos valores son conseguidos utilizando electrodo de cobre electrolítico erosionando en acero templado. El material que se está erosionando en la práctica es carburo de tungsteno, que posee una dureza de 89  $R_A$ , y el electrodo no es 100% cobre electrolítico.

Sin embargo, se toma estos valores teóricos como una estimación del tiempo que va a durar la operación para efectuar un programa de trabajo.

COSTO DE MECANIZADO.- Para determinar el costo promedio de mecanización utilizamos las siguientes fórmulas:

$$C = M T_e + M T_m + M \frac{N_t}{N_b} T_c + \frac{N_t}{N_b} C_t \quad (4.7)$$

Donde:

C = Costo promedio de mecanización (sucres)

M = Costo de la máquina y el operario (sucres/hora)

$T_m$  = tiempo de mecanizado de una pieza (min)

$T_e$  = tiempo de montar y de desmontar la pieza y, regresar la herramienta al inicio de la operación (min).

$T_c$  = tiempo de cambios de herramientas desgastadas (min).

$N_t$  = número de herramientas usadas.

$N_b$  = número de piezas producidas.

$C_t$  = costo de cada herramienta

Trabajar las hileras en el mínimo costo es lo que se busca, esta condición debe ir relacionada con el requerimiento de acabado superficial a obtener.

Para determinar la depreciación de cualquier equipo o máquina se sigue la secuencia siguiente:

- a. Se considera la máquina o equipo en base a sus años de uso y el incremento de su valor, en porcentaje, por razones inflacionarias.
- b. Se divide el valor actual por el número de años de vida útil estimada del equipo o máquina.
- c. El valor de la depreciación anual que se obtiene lo dividimos para el número el número de horas que corresponde al período

efectivo de trabajo anual.

Para la determinación del costo total de mecanizado se considera además \$/30,00 por hora, que es el valor de otros gastos como pueden ser energía eléctrica, el uso del agua, combustibles y lubricantes que comparten con otros equipos.

Para nuestro caso:

$$N_b = 1$$

$$N_t = 1$$

$$T_c = 0$$

Por lo que la fórmula 4.7 queda:

$$C = M (T_m + T_e) + C_t \quad (4.8)$$

Si

$$T_m + T_e = T$$

donde

T = tiempo tomado en montar, desmontar y maquinar la pieza

la fórmula 4.8 queda

$$C = MT + C_t \quad (4.9)$$

Para efectuar costo de mecanizado de hilas de 3,54 mm de diámetro de salida por electroerosión, se efectúan dos pasos:

1. En torno paralelo se maquinan los electrodos herramientas, por lo que:

$$M = M_o + M_t + M_c$$

donde

$M_o = 150$  (sucres/horas); costo horario de mano de obras.

$M_t = 20,84$  (sucres/horas); costo horario de máquina herramienta. Torno

$M_c = 30$  (sucres/horas); otros costos

$$M = (150 + 20,84 + 30) \text{ sucres/horas}$$

$$M = 200,84 \text{ sucres/horas}$$

Por lo que utilizándose fórmula 4.9 siendo T igual a 70 minutos y  $C_t$  igual a cero, el costo de mecanizado en torno será entonces:

$$C_t = (200,84) \text{ sucres/horas} \left(\frac{70}{60}\right) \text{ horas}$$

$$C_t = 234,31 \text{ sucres}$$

2. En la máquina de electroerosión se maquinan las chileras por lo que:

$$M = M_o + M_e + M_c$$

donde

$M_e = 84,21$  (sucres/horas); costo horario de

máquina de electroerosión.

$$M = (150 + 84,21 + 30) \text{ sucres/horas}$$

$$M = 264,2 \text{ sucres/horas}$$

Utilizando fórmula 4.9 y el tiempo  $T = 92$  minutos y, el costo de la herramienta  $C_t$  de 185 sucres, el costo de mecanizado - por electro-erosión es:

$$C_e = (264,2) \text{ sucres/horas} \frac{92}{60} \text{ horas} + 185 \text{ sucres.}$$

$$C_e = 590,1 \text{ sucres}$$

El costo total de rectificación será

$$C = (590 + 264,2) \text{ sucres}$$

$$C = 824 \text{ sucres}$$

Costo determinado en el cual no se encuentra el costo de supervisión del ingeniero, 400 sucres/horas

Siguiendo igual procedimiento determinamos el costo total de mecanizado por electroerosión de las demás hileras. Colocando en tabla N° 13 los resultados obtenidos en maquinado de hileras por electroerosión.

#### 4.6. RESULTADOS EN EL PROCESO DE RECTIFICADO DE HILERAS POR ABRASION.

TABLA N° 13

RESULTADOS OBTENIDOS EN RECTIFICACION DE HILERAS POR ELECTROEROSION

Diámetro que se trabaja (mm)	Diámetro que se obtiene (mm)	Dureza $R_A$	Rugosidad $\mu m$	Tiempo de mecanizado (min)	Costo de Mecanizado (sucres)
2,8	3,54	89	6	162	824
2,85	3,56	-	-	170	853
3,5	4,1	89	7	205	1011
3,5	4,1	-	-	208	1020
3,6	4,15	89	6	200	986
3,6	4,1	-	-	195	969

Para llegar a un nuevo diámetro de trabajo de la hilera desgastada, las variables a considerar son la concentración del abrasivo y la habilidad del operario, ya que muy fácilmente puede excederse de las dimensiones que se desean de no tener cuidado, por ser poco el espesor desbastado. Se rectifican seis hileras, que trabajan en la reducción del diámetro del alambre en SOLECSA, con equipo Kocch.

#### 4.6.1. CONTROL DIMENSIONAL

En el procedimiento de rectificación de hilera por abrasión es el operario quien lleva un control de las medidas a determinar. Para tal efecto se construye una aguja de un grado como lo muestra la figura N° 38 y continuamente hará las mediciones hasta llegar a las deseadas. Obteniéndose los siguientes resultados.

Diámetro original (mm)	Diámetro que se trabaja (mm)	Diámetro que se obtiene (mm)
2,7	2,8	3,6
2,7	2,8	3,55
3,6	3,8	4,55
3,6	3,8	4,6
4,5	4,62	5,35
4,5	4,65	5,3

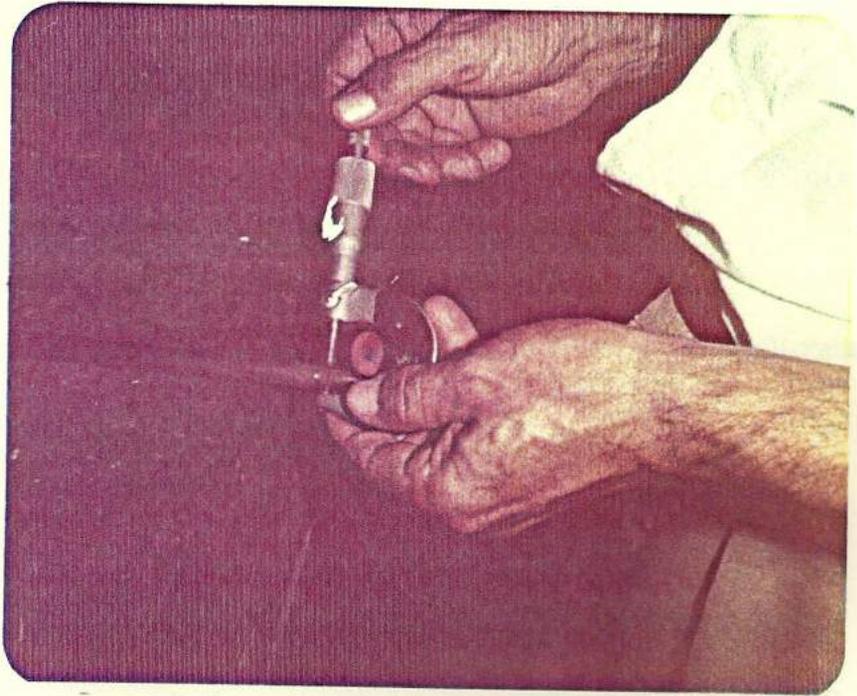


FIGURA N° 38.- CONTROL DE MEDIDAS DE HILERAS RECTIFI  
CADAS POR ABRASION

## 4.6.2. DUREZA Y RUGOSIDAD

Para efectos de medir dureza y rugosidad que se consigue en este proceso, rompemos tres-hileras longitudinalmente, la dureza medida en máquina WILSON con escala ROCWELL A, por ser material duro y pequeño espesor el núcleo de la hilera.

La dureza y rugosidad conseguidas en las hileras mecanizadas con abrasivo son:

Diámetro que se obtiene (mm)	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	Dureza ( $R_A$ )
5,35	6,0	89
4,6	4,0	89
3,6	4,0	89

La rugosidad final obtenida depende del abrasivo utilizado en máquina de pulir, para esta parte de trabajo se utiliza pasta de diamante de  $4 \mu\text{m}$ , no se puede considerar exactos la rugosidad obtenida por cuanto fue medida en palpador SIGMA, figura N° 39, que no es instrumento más adecuado para efectuar este tipo de mediciones.

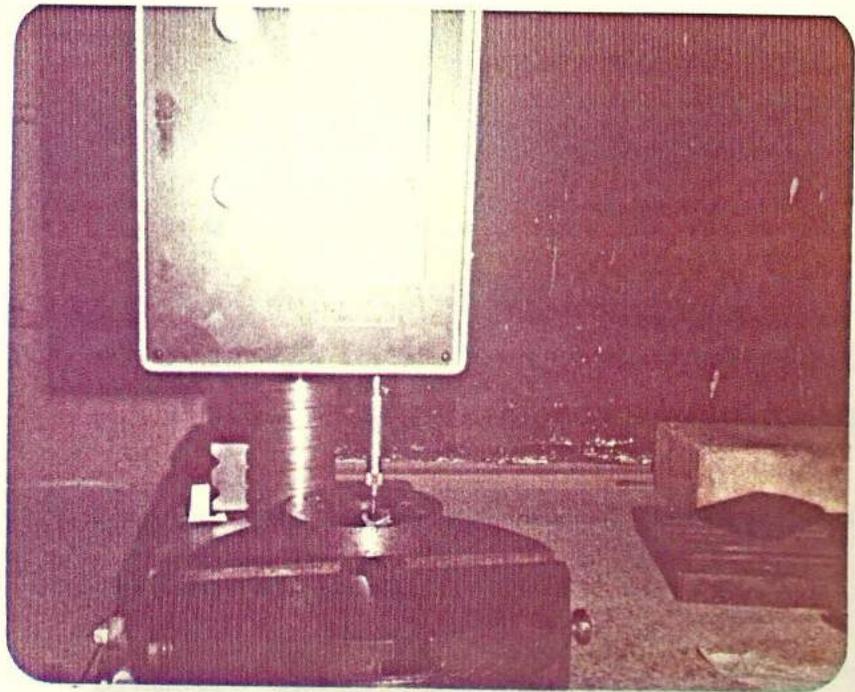


FIGURA N° 39.- INSTRUMENTO DE MEDICION DEL ESTADO  
DE LA SUPERFICIE

## 4.6.3. TIEMPO DE MECANIZACION

El tiempo de mecanización de hileras por abrasión está determinado por la cantidad y calidad del abrasivo que se utiliza, y está dado por:

$$T_{ma} = T_u + T_d + T_p$$

Donde:

$T_{ma}$  = tiempo de mecanizado por abrasión (min)

$T_u$  = tiempo de utilaje (min)

$T_d$  = tiempo de mecanizar en desbaste (min)

$T_p$  = tiempo de mecanizar en pulido (min).

Los valores obtenidos en el proceso están representados por:

Diámetro que se obtiene (min)	$T_u$ (min)	$T_d$ (min)	$T_p$ (min)	$T_{ma}$ (min)
5,3	10	53	14	67
5,35	10	60	10	70
4,6	10	47	12	59
4,55	10	50	11	61
3,55	10	50	12	62
3,6	10	55	10	65

COSTO DE MECANIZADO.- Para determinar el costo de mecanizado de la hilera que se rectificamos con abrasivo utilizamos fórmula N° (4,9)

$$C = MT + Ct$$

Para hilera que se obtiene 5,3 mm de diámetro de salida:

$$M = M_o + M_a + M_c$$

Donde:

$M_o = (70)$  sucres/horas; costo horario de mano de hora.

$M_a = (45,10)$  sucres/horas; costo horario de equipo kocch

$M_c = (30)$  sucres/horas; otros costos

$M = (70 + 45,1 + 30)$  sucres/horas

$M = 145,1$  sucres/horas

$T = 67$  minutos

$Ct = 600$  sucres; costo promedial de duración del abrasivo en mecanizar una hilera.

Por lo que:

$$C = (145) \text{ sucre/horas} \frac{67}{60} \text{ horas} + 600 \text{ sucres}$$

$$C = 760 \text{ sucres.}$$

Continuando igual procedimiento se encuen -

tran los costos de las demás hileras. Todos los resultados obtenidos al rectificar hileras por proceso de abrasión se encuentran tabulados en tabla N° 14.

TABLA No 14

RESULTADOS OBTENIDOS EN RECTIFICACION DE HILERAS POR ABRASION

Diámetro que se trabaja (mm)	Diámetro que se obtiene (mm)	Dureza $R_A$	Rugosidad um	Tiempo de mecanizar (min)	Costo de mecanizar (sucres)
2,8	3,6	89	4,0	65	757
2,8	3,55	-	-	62	750
3,8	4,55	-	-	61	747
3,8	4,6	89	4,0	59	742
4,62	5,35	89	6,0	70	769
4,65	5,3	-	-	67	760

## CAPITULO Nº 5

### ANALISIS DE RESULTADOS

La duración de una hilera depende de la cantidad de carburo de tungsteno que posee el núcleo y la cantidad de agregado que utiliza cada marca de fabricación. Su costo de importación oscila entre 30 y 50 dólares y depende del espesor del núcleo y/o del número de pasos a que se puede maquinar.

La producción normal media anual del alambrón en SOLECSA es de 5000 toneladas en reducciones que se efectúan en cuatro pasos, lo que hace que se requieran un promedio anual de 150 hileras de trefilación, manteniendo una buena lubricación y las condiciones óptimas de trabajo.

En el proceso de mecanizado por abrasión se trabaja más en la parte donde se efectúa en realidad la reducción del alambrón, manteniendo constante el semiángulo de la hilera, ángulo de reducción,  $\alpha = 6^\circ$ , ya que se utiliza una aguja de  $12^\circ$  acero-plata como herramienta y carburo de boro como abrasivo para el desbaste, y para darle el acabado se utiliza pasta de diamante que con madera blanda se trabaja tanto en el ángulo de entrada de la hilera como

en el ángulo de reducción.

En mecanizado por electroerosión se maquina, tanto en desbaste como en acabado, de un solo paso todas las partes del núcleo de la hilera manteniéndolo una exacta relación entre ellas.

La dureza del núcleo de la hilera depende del tamaño de las partículas de carburo, su distribución y porosidad. Observando la microestructura del carburo de tungsteno - mecanizado por electro erosión (figura Nº40), la microestructura del carburo de tungsteno mecanizado por abrasión (figura Nº41) y comparándola con la microestructura del carburo de tungsteno (figura Nº 25 ) determinamos - que su microestructura no ha variado ya que mantiene el tamaño de las partículas de carburo, por ser carburos estables, lo cual implica que ambos procesos permiten una mecanización inicial o rectificación de hileras, manteniendo la dureza. Los valores de dureza encontrados son:

Hilera Nueva	Hilera Mec.	Hilera Mec.
Dureza Ra	electroerosión	Abrasión
	Dureza Ra	Dureza Ra
89	89	89

La rugosidad de una hilera nueva varía entre valores de 0.8 a 8.0  $\mu\text{m}$  y posee una superficie bruñida a espejo. En mecanizado por electroerosión la rugosidad que se ob

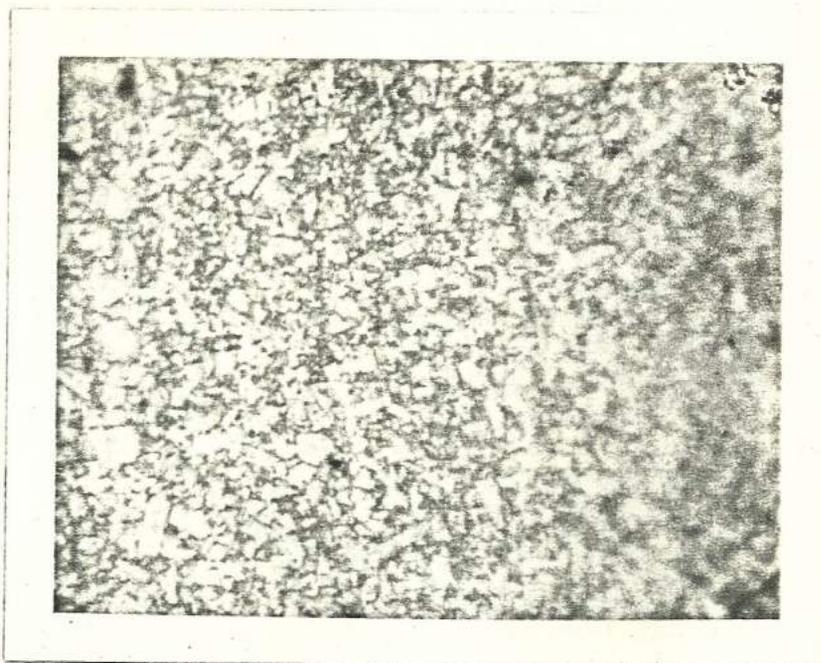


FIGURA N° 40.- MICRO ESTRUCTURA DE CARBURO DE TUNGSTEN  
NO MECANIZADO POR ELECTROEROSION.

Aumento: 1.500 x  
Ataque: KOH (10% solución acuosa) 3 partes  
 $K_3 Fe (CN)$  (10% solución acuosa)  
1 parte.  
Tiempo de ataque: 3 minutos.  
Tamaño de grano: medio Wc - Ca

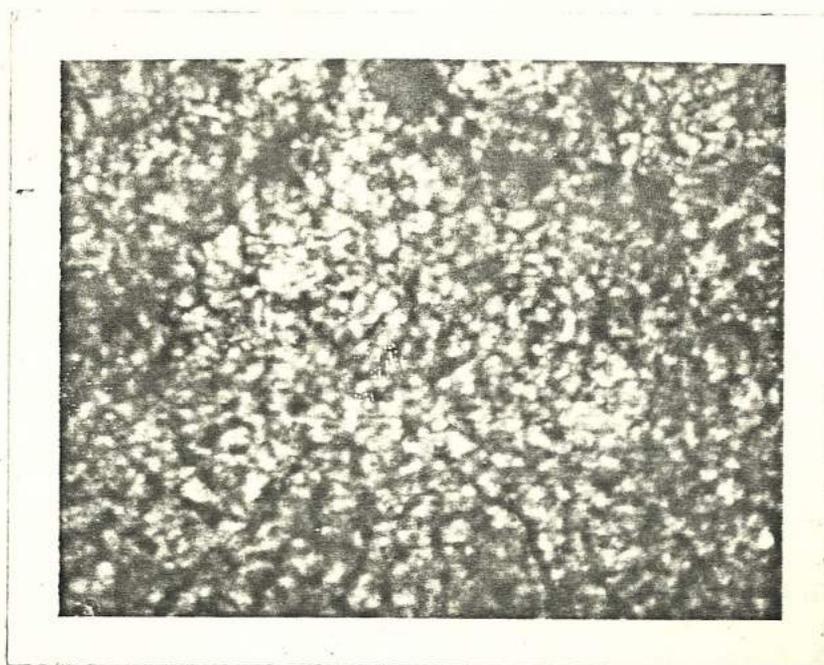


FIGURA N° 41.- MICRO ESTRUCTURA DEL CARBURO DE TUNGSTE  
NO MECANIZADO POR ABRASION

Aumento: 1.000 x

Ataque: KOH (10% solución acuosa) 3 partes.

$K_3 Fe (CN)_6$  (10% solución acuosa) 1 parte

Tiempo de ataque: 3 minutos

Tamaño de grano: medio Wc - ce

tiene es de  $6 \mu\text{m}$  y es homogénea, no se logra una superficie bruñida a espejo, pero se la podría obtener retocándola con un poco de polvo de diamante. Posteriormente, no se logra una superficie bruñida a espejo porque el principio de trabajo de la máquina es por descargas eléctricas utilizando el cobre como material del electrodo-herramienta.

En mecanizado por abrasión la rugosidad que se obtiene es de  $4 \mu\text{m}$  en la parte del ángulo de reducción de la hilera, en el ángulo de entrada de la hilera la rugosidad que se obtiene es de  $8 \mu\text{m}$ , como no existe un efectivo control de medidas fácilmente en el pulido con pasta de diamante de  $8 \mu\text{m}$  se puede llegar a las medidas requeridas en el ángulo de reducción. Cabe indicar que la rugosidad no es bien homogénea en todo el núcleo de la hilera, por este proceso de mecanizado, ya que en la parte del ángulo de entrada fue poco el tiempo de mecanizado con pasta de diamante de  $4 \mu\text{m}$ , mucho más tiempo se mecaniza en la parte de la reducción misma, por efecto del costo de la pasta de diamante. Los valores de rugosidad encontrados son:

Hilera Nueva	Hilera Mec.	Hilera Mec.
Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	electroerosión	Abrasión
	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
4	6	Min 4
		Max 8

De la fórmula que nos determina el costo de mecanizado

$$C = MT + Ct$$

La variable que nos determina la economía en el trabajo es el tiempo.

El tiempo de mecanizado por electroerosión es mayor, ya que este tiempo depende de la rugosidad a obtener y de la capacidad de arranque de viruta, mientras que el tiempo de mecanizado por abrasión es menor ya que mientras más pasta de diamante se coloca en la parte a trabajar más rápidamente se llega a las medidas indicadas.

El costo de mecanizado de la hilera por electroerosión es mayor; ya que el costo total (M) máquina-hora de trabajo y el costo de hora-hombre son mayores que los costos de máquina-hora de trabajo y el costo de hora-hombre en mecanizado por abrasión; que multiplicado por el tiempo de trabajo (T), el cual también es mayor, más el costo de la herramienta (Ct), nos determina un costo promedio de mecanizado por electroerosión de \$/960,00. Mientras que el costo promedio de mecanizado por abrasión es de \$/755,00.

En ambos casos la variable es el tiempo de trabajo en el mecanizado, es así que, podemos reducir el costo de mecanizado por electroerosión, reduciendo el tiempo de trabajo, esto es aumentando la capacidad de erosión, pero

no se llega a la rugosidad deseada. Mientras que en mecanizado por abrasión podemos reducir el tiempo aumentando la concentración de pasta de diamante y dando más presión a la aguja, aquí lo que hacemos es reducir el costo MT, pero en cambio aumenta el costo Ct ya que en este costo de herramienta va incluido la cantidad porcentual, determinada por promedio estadístico, del costo de la pasta de diamante que eso sí encarece el proceso.

Manteniendo constante la fuerza de estirado, la calidad del material a trefilar y la velocidad de estirado, el promedio de trabajo de la hilera nueva hasta que se empieza a producir fallas es de 90 toneladas, mientras que las hileras mecanizadas por electroerosión el promedio de trabajo es de 80 toneladas que se puede mejorar con un pulido de diamante en su rugosidad. En las hileras mecanizadas por abrasión, el promedio de trabajo es de 65 toneladas. Se puede indicar que esto es debido a las tolerancias dimensionales y a la rugosidad de la hilera.

Se debe dejar indicado que a los costos de mecanización de las hileras aquí analizadas, se le debe agregar el valor en porcentaje, por razones inflacionarias y la utilidad que se quiera recibir por el trabajo realizado

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez efectuados los análisis correspondientes podemos decir entonces que:

- 1.- En el proceso de mecanizado por abrasión se obtiene una superficie lapeada o bruñida a espejo.
- 2.- La rugosidad final obtenida en la superficie de todo el núcleo de la hilera es más homogénea por proceso de electro erosión que por proceso de abrasión y que se puede mejorar con un pulido posterior con diamante.
- 3.- La habilidad del operario es muy necesaria en el mecanizado por abrasión ya que fácilmente se pueden lograr medidas excedentes, por no existir un control técnico de medidas.
- 4.- Las medidas finales del núcleo de la hilera en mecanizado por electro erosión está determinada por las medidas que se da al electrodo herramienta que deben calcularse en base a fórmula y tablas.
- 5.- En ninguno de los procedimientos ha variado la dureza del núcleo de la hilera, puesto que son carburos estables fabricados a elevadas presiones.

- 6.- La capacidad de arranque del material y el tiempo - de trabajo por proceso de abrasión está en relación directa con la concentración del carburo de boro y del diamante durante el pulido.
- 7.- La capacidad de arranque del material y el tiempo - de trabajo por proceso de electro erosión está en relación directa a la superficie a mecanizar y a la rugosidad que se desea obtener.
- 8.- Aunque el costo de mecanizado por electro erosión es mayor que el mecanizado por abrasión, en el proceso final resulta más barato ya que la hilera trabaja - mayor tiempo, el cual es similar al tiempo de trababajo del original.
- 9.- Desde el punto de vista técnico el mecanizado por electro erosión permite además de una mayor preci - sión, la reproducción de detalles geométricos ingualables por otro procedimiento.
- 10.- En la selección del diamante para el pulido hay que tener en cuenta los de granos planos y quebradizos ya que estos no son adecuados para las pastas de diamante por ofrecer rendimientos de arranques insufi - cientes y superficies muy rayadas.
- 11.- Se debe tener en cuenta de no alcanzar las medidas - requeridas con pasta de diamante de  $8 \mu$  en proceso

de abrasión, por que ello producirá mayor fuerza - de estirado en el alambrón, ya que la rugosidad no es la requerida.

- 12.- Aunque el costo de mecanizado por electro erosión- es mayor, no es mucha la diferencia del costo de me- canizado por abrasión, se recomienda este proceso- de mecanizado por cuanto es técnicamente más con- fiable llegar a las medidas requeridas y produce - en la hilera un mayor tiempo de trabajo hasta que se produzcan fallas en el alambrón.

A P P E N D I C E S

No.	Name	Page	Page
1	...	...	...
2	...	...	...
3	...	...	...
4	...	...	...
5	...	...	...
6	...	...	...
7	...	...	...
8	...	...	...
9	...	...	...
10	...	...	...
11	...	...	...
12	...	...	...
13	...	...	...
14	...	...	...
15	...	...	...
16	...	...	...
17	...	...	...
18	...	...	...
19	...	...	...
20	...	...	...
21	...	...	...
22	...	...	...
23	...	...	...
24	...	...	...
25	...	...	...
26	...	...	...
27	...	...	...
28	...	...	...
29	...	...	...
30	...	...	...

POSICIONES Y VALORES RESULTADOS

POSICIONES	TIEMPO DE IMPULSO	TIEMPO DE PAUSA	GAP O ABERTURA ENTRE EL ELECTRODO Y LA PIEZA	CAPACIDAD DE EROSION POR MINUTO	DESGASTE DEL ELECTRODO CON RELACION AL VOLUMEN DE MATERIAL ARRANCADO	SUPERFICIE MINIMA QUE DEBE OCUPAR EL CAMPO DE EROSION	RUGOSIDAD	DIFERENCIA ENTRE LA MEDIDA NOMINAL Y LA DEL ELECTRODO
3	2	35 μ	6 mm <sup>3</sup>	25 %	20 mm <sup>2</sup>	14 μ	0.098 mm	
4	3	40 "	8 "	20 %	"	17 "	0.114 "	
5	3	45 "	10 "	15 %	"	20 "	0.130 "	
6	3	50 "	10 "	10 %	"	20 "	0.150 "	
7	4	55 "	12 "	7 %	"	30 "	0.170 "	
8	4	60 "	12 "	5 %	"	35 "	0.190 "	
9	4	65 "	10 "	3 %	"	40 "	0.210 "	
10	4	70 "	8 "	15 %	"	50 "	0.240 "	
1	1	17 μ	1 mm <sup>3</sup>	40 %	5 mm <sup>2</sup>	7 μ	0.048 mm	
2	2	20 "	2 "	30 %	"	8 "	0.056 "	
3	2	25 "	2 "	20 %	"	10 "	0.070 "	
4	2	30 "	3 "	15 %	"	13 "	0.086 "	
5	3	35 "	5 "	10 %	"	16 "	0.102 "	
6	3	40 "	6 "	7 %	"	20 "	0.120 "	
7	3	45 "	5 "	5 %	"	22 "	0.134 "	
8	3	50 "	5 "	4 %	"	28 "	0.156 "	
9	3	55 "	4 "	3 %	"	30 "	0.170 "	
1	1	15 μ	0.5 mm <sup>3</sup>	40 %	1 mm <sup>2</sup>	5 μ	0.040 mm	
2	2	17 "	1 "	30 %	"	6 "	0.046 "	
3	2	20 "	1 "	20 %	"	8 "	0.056 "	
4	2	22 "	2 "	15 %	"	10 "	0.064 "	
5	3	25 "	3 "	10 %	"	12 "	0.074 "	
6	3	30 "	3 "	7 %	"	15 "	0.090 "	
7	3	35 "	3 "	5 %	"	20 "	0.110 "	
8	3	40 "	2 "	4 %	"	25 "	0.130 "	
1	1	12 μ	0.25 mm <sup>3</sup>	35 %	0.25 mm <sup>2</sup>	4 μ	0.032 mm	
2	2	14 "	0.50 "	25 %	"	5 "	0.038 "	
3	2	16 "	0.50 "	15 %	"	6 "	0.044 "	
4	2	18 "	0.75 "	10 %	"	8 "	0.052 "	
5	3	20 "	1 "	6 %	"	10 "	0.060 "	
6	3	25 "	1 "	4 %	"	12 "	0.074 "	

ESTOS VALORES ESTAN CONSEGUIDOS UTILIZANDO ELECTRODO DE COBRE

POSICIONES Y VALORES RESULTADOS

POSICIONES	TIEMPO DE IMPULSO	TIEMPO DE PAUSA	GAP O ABERTURA ENTRE ELECTRODO Y LA PIEZA	CAPACIDAD DE EROSION POR MINUTO	DESGASTE DEL ELECTRODO CON RELACION AL VOLUMEN DE MATERIAL ARRANCADO	SUPERFICIE MINIMA QUE DEBE OCUPAR EL CAMPO DE EROSION	RUGOSIDAD	DIFERENCIA ENTRE MEDICION NOMINAL Y LA ELECTRO
8	5,6,7,8,9 Y 10	125 μ	500 mm <sup>3</sup>	DE 20 A 25%	3.000 mm <sup>2</sup>	90 μ	0,430	
9	5,6,7,8,9 Y 10	140 "	600 "	15 A 20%	"	110 "	0,500	
10	5,6,7,8,9 Y 10	160 "	700 "	10 A 15%	"	130 "	0,580	
11	5,6,7,8,9 Y 10	180 "	800 "	5 A 10%	"	150 "	0,660	
12	5,6,7,8,9 Y 10	200 "	900 "	3 A 5%	"	170 "	0,740	
13	5,6,7,8,9 Y 10	220 "	950 "	2 A 3%	"	200 "	0,840	
14	5,6,7,8,9 Y 10	240 "	900 "	1%	"	220 "	0,920	
8	5,6,7,8,9 Y 10	110 μ	250 mm <sup>3</sup>	DE 20 A 25%	800 mm <sup>2</sup>	75 μ	0,370	
9	5,6,7,8,9 Y 10	120 "	300 "	15 A 20%	"	85 "	0,410	
10	5,6,7,8,9 Y 10	135 "	350 "	10 A 15%	"	100 "	0,470	
11	5,6,7,8,9 Y 10	150 "	400 "	4 A 8%	"	120 "	0,540	
12	5,6,7,8,9 Y 10	170 "	450 "	3 A 5%	"	140 "	0,620	
13	5,6,7,8,9 Y 10	190 "	400 "	1 A 3%	"	160 "	0,700	
14	5,6,7,8,9 Y 10	210 "	350 "	0,5 %	"	180 "	0,780	
6	5	70 μ	40 mm <sup>3</sup>	20 %	300 mm <sup>2</sup>	40 μ	0,220	
7	5	80 "	50 "	15 %	"	45 "	0,250	
8	5	90 "	60 "	10 %	"	55 "	0,290	
9	5	100 "	80 "	5 %	"	65 "	0,330	
10	5	110 "	110 "	2 %	"	75 "	0,370	
11	5	120 "	100 "	1 %	"	90 "	0,420	
12	5	140 "	80 "	0,5 %	"	105 "	0,490	
13	5	160 "	70 "	0,5 %	"	120 "	0,560	
14	5	180 "	60 "	0,5 %	"	135 "	0,630	
4	3	50 μ	12 mm <sup>3</sup>	20 %	60 mm <sup>2</sup>	20 μ	0,140	
5	3	55 "	15 "	15 %	"	25 "	0,160	
6	3	60 "	15 "	12 %	"	30 "	0,180	
7	3	65 "	20 "	10 %	"	35 "	0,200	
8	3	70 "	25 "	4 %	"	40 "	0,220	
9	4	75 "	30 "	3 %	"	50 "	0,250	
10	4	80 "	30 "	1,5 %	"	60 "	0,280	
11	4	90 "	25 "	0,5 %	"	70 "	0,320	

POSICIONES Y VALORES RESULTADOS

POSICIONES	TIEMPO DE IMPULSO	TIEMPO DE PAUSA	GAP O ABERTURA ENTRE EL ELECTRODO Y LA PIEZA	CAPACIDAD DE EROSION POR MINUTO	DESGASTE DEL ELECTRODO CON RELACION AL VOLUMEN DE MATERIAL ARRANCADO	SUPERFICIE MINIMA QUE DEBE OCUPAR EL CAMPO DE EROSION	RUGOSIDAD	DIFERENCIA ENTRE LA MEDIDA NOMINAL Y LA DEL ELECTRODO	
V	3	3	28 $\mu$	30 $\text{mm}^3$	20 %	5 $\text{mm}^2$	14 $\mu$	0.084 mm	
	4	3-4	35 "	36 "	16 %	"	17 "	0.104 "	
	5	4-5	42 "	45 "	12 %	"	20 "	0.124 "	
	6	5-6	47 "	50 "	9 %	"	25 "	0.134 "	
	7	6-7	54 "	48 "	6 %	"	30 "	0.168 "	
	8	6-7-8	61 "	45 "	4 %	"	35 "	0.190 "	
	9	7-8-9	64 "	40 "	2 %	"	40 "	0.208 "	
	10	8-9-10	69 "	36 "	1 %	"	50 "	0.238 "	
	I	1	1	17 $\mu$	22 $\text{mm}^3$	32 %	5 $\text{mm}^2$	9 $\mu$	0.052 mm
		2	2	20 "	35 "	24 %	"	10 "	0.060 "
3		3	25 "	5 "	16 %	"	12 "	0.074 "	
4		3-4	30 "	8 "	12 %	"	15 "	0.090 "	
5		4-5	35 "	11 "	8 %	"	18 "	0.106 "	
6		5-6	40 "	14 "	7 %	"	21 "	0.122 "	
7		6-7	45 "	15 "	5 %	"	24 "	0.138 "	
8		6-7-8	50 "	14 "	4 %	"	28 "	0.156 "	
9		7-8-9	55 "	13 "	3 %	"	30 "	0.170 "	
I	1	1	15 $\mu$	0.3 $\text{mm}^3$	35 %	1 $\text{mm}^2$	7 $\mu$	0.044 mm	
	2	2	17 "	0.6 "	26 %	"	8 "	0.050 "	
	3	3	20 "	1.0 "	19 %	"	10 "	0.060 "	
	4	3-4	22 "	1.8 "	13 %	"	12 "	0.068 "	
	5	4-5	25 "	2.4 "	8 %	"	14 "	0.078 "	
	6	5-6	30 "	1.9 "	5 %	"	17 "	0.094 "	
	7	6-7	35 "	2.0 "	2 %	"	22 "	0.114 "	
	8	6-7-8	40 "	1.6 "	0.5 %	"	27 "	0.134 "	
	1	1	12 $\mu$	0.6 $\text{mm}^3$	30 %	0.25 $\text{mm}^2$	6 $\mu$	0.036 mm	
	2	2	14 "	0.7 "	20 %	"	7 "	0.042 "	
	3	3	16 "	0.8 "	12 %	"	8 "	0.048 "	
	4	3-4	18 "	0.9 "	8 %	"	10 "	0.056 "	
	5	4-5	20 "	0.9 "	5 %	"	12 "	0.064 "	
	6	5-6	25 "	0.9 "	4 %	"	14 "	0.078 "	
	7	6-7	30 "	0.85 "	2 %	"	16 "	0.092 "	
	8	6-7-8	35 "	0.8 "	1 %	"	18 "	0.106 "	

ESTOS VALORES ESTAN CONSEGUIDOS UTILIZANDO ELECTRODO DE GRAFITO EROSIONANDO EN MATERIAL DE ACERO TEMPLADO

POSICIONES Y VALORES RESULTADOS

TE	TIEMPO DE IMPULSO	TIEMPO DE PAUSA	GAP O ABERTURA ENTRE EL ELECTRODO Y LA PIEZA	CAPACIDAD DE EROSION POR MINUTO	DESGASTE DEL ELECTRODO CON RELACION AL VOLUMEN DE MATERIAL ARRANCADO	SUPERFICIE MINIMA QUE DEBE OCUPAR EL CAMPO DE	RUGOSIDAD	DIFEREN ENTRE MEDID NOMI Y LA ELECTR
	10	8-9-10	160 μ	800 mm <sup>3</sup>	8 %	3000mm <sup>2</sup>	130 μ	0.580
	11	9-10-11	180 "	900 "	5 %	"	150 "	0.660
	12	10-11-12	200 "	950 "	3 %	"	170 "	0.740
	13	11-12-13	220 "	900 "	1 %	"	200 "	0.840
	14	12-13-14	240 "	800 "	0.5 %	"	220 "	0.920
	10	8-9-10	135 μ	500 mm <sup>3</sup>	9 %	600 mm <sup>2</sup>	100 μ	0.470
	11	9-10-11	150 "	500 "	6 %	"	120 "	0.540
	12	10-11-12	170 "	480 "	4 %	"	140 "	0.620
	13	11-12-13	190 "	430 "	1 %	"	160 "	0.700
	14	12-13-14	210 "	400 "	0.5 %	"	180 "	0.780
	6	5-6	70 μ	200 mm <sup>3</sup>	14 %	120 mm <sup>2</sup>	40 μ	0.220
	7	6-7	80 "	220 "	11 %	"	45 "	0.250
	8	6-7-8	90 "	240 "	8 %	"	55 "	0.290
	9	7-8-9	100 "	250 "	4 %	"	65 "	0.330
	10	8-9-10	110 "	250 "	3 %	"	75 "	0.370
	11	9-10-11	120 "	240 "	1 %	"	90 "	0.420
	12	10-11-12	140 "	230 "	0.5 %	"	105 "	0.490
	4	3-4	50 μ	70 mm <sup>3</sup>	15 %	25 mm <sup>2</sup>	20 μ	0.140
	5	4-5	55 "	80 "	12 %	"	25 "	0.160
	6	5-6	60 "	85 "	9 %	"	30 "	0.180
	7	6-7	65 "	90 "	6 %	"	35 "	0.200
	8	6-7-8	70 "	95 "	5 %	"	40 "	0.220
	9	7-8-9	75 "	95 "	2 %	"	50 "	0.250
	10	8-9-10	80 "	90 "	1 %	"	60 "	0.280
	11	9-10-11	90 "	85 "	0.5 %	"	70 "	0.320

ESTOS VALORES ESTAN CONSEGUIDOS UTILIZANDO ELECTRODOS EROSIONANDO EN MATERIAL DE ACERO TEMPLADO

TABLA N° 19

NUMEROS DE PASOS DE REDUCCIONES DE HILERAS DE REFERENCIA QUE UTILIZA SOLECSA

Diámetro Inicial (mm)	1		2		3		4	
	min (mm)	max (mm)	min (mm)	max (mm)	min (mm)	max (mm)	min (mm)	max (mm)
5,5	4,74	4,81	-	-	-	-	-	-
5,5	5,30	5,40	4,55	4,65	3,92	4,00	-	-
5,5	4,72	4,82	4,08	4,18	3,53	3,63	3,14	3,22
5,5	3,32	3,42	2,74	2,84	2,32	2,42	-	-

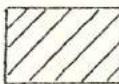
TABLA Nº 20

DIAMETRO FINAL OBTENIDO CON SUS RESPECTIVAS TOLERANCIAS DE HILERAS DE REFERENCIA QUE UTILIZA SOLECSA

Diametro final de salida. (mm)	Tolerancia	
	Min (mm)	Max (mm)
4,76	4,74	4,81
3,968	3,92	4,00
3,175	3,14	3,22
2,381	2,32	2,42

TABLA Nº 21

VALORES INDICATIVOS DE RUGOSIDAD PARA VARIOS MECANIZADOS

MECANIZADOS	Rugosidad $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )									
	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12	25	50	
TORNEADO - FRESADO - LIMADO.										
CEPILLADO										
RECTIFICADO										
BRUÑIDO										
SUPER ACABADO (LAPEADO)										
LAMINACION EN CALIENTE										
FORJA										
LAMINADO-ESTIRADO Y TREFILADO EN FRIO										
EXTRUSION										
 Rugosidad más frecuente  Rugosidad menos frecuente	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12	25	50	

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- AVNER, SIDNEY H. Introducción a la Metalurgia Física, 2da. ed. Mc Graw - Hill, México, 1979.
- 2.- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Hand Book, 8 ed. Metals - park, 1976.
- 3.- BOOTHROYD, G. Fundamentos del corte de metales y de las Máquinas - Herramientas, Mc Graw - Hill Latino Americano, Bogotá 1978.
- 4.- DE GARMO. E. Materiales y Proceso de Fabricación, Reve, Buenos Aires, 1969.
- 5.- DIETER. Metalurgia Mecánica, Folleto ESPOL, Guayaquil, 1980, 569 - 576 P.
- 6.- DALLAS, D. Tool And Manufacturing Engineers Hand Book, Hird, Mc Graw - Hill Book Company 1976.
- 7.- EDICION CREMONESE. Manual del Perito Industrial, Editorial SIAE, 1978.
- 8.- HIGGINS, R. Ingeniería Metalurgica, Tomo II, C.E. C.S.A., México, 1963.
- 9.- LOPEZ NAVARRO. Troquelado y Estampación, Editorial

Gustavo Gili, Barcelona, 1976.

- 10.- MICHELETTI. G.F. Mecanizado por Arranque de Viru  
ta, Editorial Blume, Barcelona 1980, 307 - 329 0.
- 11.- SHIGLEY. Diseño en Ingeniería Mecánica 2da ed. Mc  
Graw - Hill, México, 1979, 377 - 378 P.
- 12.- SEY BOLT A. Técnicas de Metalurgia Experimental,  
C.R.A.T., México 1979.