



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

DISTORSION POR EFECTO DEL PROCESO DE
ELECTROEROSION (CORTE CON ALAMBRE)
EN LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS DEL
TIPO O1 Y D2.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
EDGARDO FABRICIO ORTIZ HERNANDEZ.

ASESOR ING. SERGIO DE MORAES BENITEZ.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX., 1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTUS APPROBATORIUS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Coballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Distorsión por efecto del proceso de electroerosión (corte con alambre)

en los aceros para herramientas del tipo O1 y O2"

que presenta el pasante: Edgardo Fabricio Ortiz Hernández

con número de cuenta: 071407B-3 para obtener el TITULO de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APPROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 17 de Marzo de 199 7

PRESIDENTE : Ing. Ma. Soledad Alvarado Martínez

VOCAL M. en I. Enrique Curjel Reyna

SECRETARIO Ing. Sergio de Moraes Benitez

PRIMER SUPLENTE Ing. Felipe Díaz del Castillo

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Marco Antonio Hernández

UAE/DEF/VAP/01

Handwritten signatures and dates:
 10-3-97
 10/6/97
 11/6/197

A MIS PADRES

**A quienes siempre me alentaron a seguir adelante
a ellos que siempre estuvieron conmigo en los
momentos difíciles.**

GRACIAS.

A MI MADRE

Por el sacrificio que tuvo que realizar para
que yo siempre saliera adelante.

A MI PADRE

Por sus palabras de aliento y la ayuda que
siempre me brindaste.

A MIS HERMANOS

OSCAR, ERIKA Y KARLA

Por animarme a realizar mis propósitos.

A MI ABUELO SALVADOR

Por que aunque ya no este con nosotros
se que el hubiera estado orgulloso de mi.

A MI TIA INES Y MI ABUELA DOMINGUITA.

Por mostrar siempre interés en mis estudios y apoyarme
siempre que fue necesario.

A SERGIO DE MORAES

Por brindarme su confianza
y darme su apoyo.

A MIS PROFESORES

Por compartir sus conocimientos
para alcanzar esta meta.

A MIS AMIGOS

Por los momentos que compartimos
y su ayuda.

A ESTA H. UNIVERSIDAD

Por permitirme ser uno mas de esta
gran familia.

A TODOS ELLOS GRACIAS

Por que esto no sea el final de mis metas,
si no el principio de ellas.

I N D I C E.

INTRODUCCION.	1
1. CLASIFICACION DE LOS ACEROS.	
1.1. Clasificación general de los aceros.	2
1.2. Clasificación de los aceros de herramientas.	5
2. TRATAMIENTO TERMICO DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS.	
2.1. Metodos de tratamiento térmico.	12
2.2 Factores que intervienen en el tratamiento térmico.	18
2.3 Características importantes de algunos aceros de herramientas	22
3. MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA.	
3.1 Operaciones para el corte de materiales duros.	37
4. PARTE EXPERIMENTAL.	48
5. PLANTEAMIENTO DE LOS EXPERIMENTOS.	49
6. RESULTADOS OBTENIDOS.	53
7. ANALISIS DE RESULTADOS.	55
8. CONCLUSIONES.	61
BIBLIOGRAFIA.	62

INTRODUCCIÓN

El proceso de corte por electroerosión, es un maquinado especial en el cual por medio de un arco eléctrico entre electrodo y pieza, se pueden realizar cortes en materiales sumamente duros; tal es el caso de los aceros para herramientas, y hasta el carburo de tungsteno; proporcionándonos cortes con un alto grado de precisión en sus dimensiones

Se ha encontrado que durante este proceso los materiales erosionados sufren variaciones en las dimensiones finales del corte (distorsión).

En la presente investigación nos abocamos a confirmar si esta distorsión existe; si es así trataremos de conocer las causas de dicha distorsión.

Identificadas las causas trataremos de obtener una solución para tratar de eliminarlas o en su defecto minimizarlas.

En esta tesis se tomaron con motivo de análisis los tipos de aceros para herramientas O1 y D2 a los cuales se les realizó un tratamiento térmico de temple y revenido

CAPITULO 1

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS

1.1 Clasificación general de los aceros.

El acero es una aleación de hierro, carbono y otros varios elementos, que endurece cuando se le enfria bruscamente después de estar arriba de su temperatura crítica. No contiene escoria y se puede moldear, laminar o forjar. El carbono es un constituyente muy importante, por su habilidad de aumentar la dureza y la resistencia del acero. No obstante que el acero puede ser vaciado en moldes para conformarlo a un perfil y tamaño definido y complejo, lo más común es que se moldee en formas de lingotes, para usarlo después, en la fabricación de tubos, barras, laminas o formas estructurales.

El acero de acuerdo con los elementos de aleación que contiene. El carbono es el elemento más importante, por cuya razón todos los aceros se clasifican de acuerdo con el contenido de carbono. El acero al carbono contiene principalmente hierro y carbono y se clasifica como aceros 10XX, en donde los 2 primeros dígitos se refieren a los aceros al carbono. El tercer y cuarto dígitos se refieren al contenido de carbono en centésimos de porcentaje. Así un acero 1035 es un acero al carbono con 0,35 % de carbono. Existen diferentes cantidades de otros materiales en el acero al carbono, pero su contenido es tan pequeño que no afecta a las propiedades físicas.

Los aceros aleados han sido clasificados por Society of Automotive Engineers y por el American Iron and Steel Institute. Algunas de las designaciones aceptadas por ellos, como normas, se muestran en la tabla 1.1. Con frecuencia podrán estar cinco o más elementos de la aleación y la facilidad para describir correctamente a la aleación por medio de un simple sistema de numeración, se hace imposible.

TABLA 1.1

CLASIFICACION	NUMERO	CLASIFICACION DE NUMERO
Acero al carbono SAE- AISI	10XX	
Carbono	10XX	1006 - 1095
Mecanizado libre (Resulfurizado)	11XX	1108 - 1151
Resulfurizado resulfurizado	12XX	1211 - 1214
Manganeso(1.5 - 2 %)	13XX	1320 - 1340
Niobio	45XX	
C- Mo (0.25 % Mo)	46XX	4024 - 4068
Cr - Mo (Cr 0.70% Mo 0.15%)	41XX	4130 - 4150
Ni- Cr - Mo (Ni 1.8% Cr 0.65%)	43XX	4317 - 4340
Ni- Mo (1.75% Ni)	46XX	4608 - 4640
Ni - Cr (0.45% Mo) (0.2%)	47XX	
Ni - Mo (3.5% Ni, 0.25% Mo)	48XX	4812 - 4820
Cromo	53XX	
0.5 % Cr	50XX	
1.0 % Cr	51XX	5120 - 5152
1.5 % Cr	52XX	52095 - 52101
Resistencia a la corrosión - calor	514XX	(AISI 400 series)
Cromo - Vanadio	65XX	
1 % Cr, 0.12% V	61XX	6120 - 6152
Silicio - Manganeso		
0.85 Mn, 2.0 % Si	92XX	9255 - 9262
Aceros aleados triples		
0.55 % Ni, 0.50% Cr, 0.20% Mo	86XX	8615 - 8660
0.55 % Ni, 0.50% Cr, 0.25% Mo	87XX	8720 - 8750
3.25 % Ni, 1.20% Cr, 0.12% Mo	93XX	9310 - 9317
0.45 % Ni, 0.40% Cr, 0.12% Mo	94XX	9437 - 9445
0.45 % Ni, 0.15% Cr, 0.20% Mo	97XX	9747 - 9763
1.0 % Ni, 0.80% Cr, 0.25% Mo	98XX	9840 - 9850
Boro (alrededor de 0.005% Mn)	XXBXX	

El boro se indica con la adición de una B. Boro- Vanadio se indica con la adición de BV. Ejemplos: 80BXX, 14BXX, 50BXX, 45BV14. Las letras que aparecen antes del número indican lo siguiente:

A= Aleación - básica horno - abierto, B= Carbono - ácido Bessemer, C= Carbono básico horno - abierto, D= Carbono-ácido, horno-abierto, E= Horno eléctrico.

Aceros inoxidables resistentes al calor:

2XX Tipos Cromo - Níquel - Manganeso.

3XX Tipos Cromo Níquel.

4XX Tipos Cromo Recto.

5XX Tipos Bajo Cromo.

Todos los aceros inoxidables son producidos en horno eléctrico.

Las designaciones de la tabla 1.1 pueden servir para identificar el proceso metalúrgico empleado. Así, un acero C1035 se hace en un horno de hogar abierto, básico. Cada acero tiene propiedades específicas y la selección de uno de ellos para una aplicación particular, amerita estudio.

Los aceros se pueden clasificar más ampliamente como sigue:

A. Aceros al carbón.

1. De bajo carbono (menos del 0.30 %).
2. De medio carbono (0.30 a 0.70 %).
3. De alto carbono (0.70 a 1.40 %).

B. Aceros aleados.

1. De baja aleación (los elementos especiales de aleación suman menos del 8 %).
2. De alta aleación (los elementos especiales de aleación suman arriba del 8 %).

Los aceros de bajo carbono se emplean para alambres, perfiles estructurales y órganos de fijación de máquinas, tales como tornillo, tuercas y pernos. Los aceros de medio carbono, se usan para carriles, ejes, engranes y partes que requieren alta resistencia y dureza moderada. Los aceros de alto carbono encuentran su aplicación en herramientas de corte, como cuchillas, brocas, machuelos y piezas con propiedades de resistencia a la abrasión.

Los aceros de aleación cuya producción es de solamente el 15% de la producción total de acero, se seleccionan para muchos usos, por que contienen ciertas características que son superiores a aquellos simples aceros de carbono. Aun cuando todos los aceros aleados no contienen cada una de las características siguientes se les adjudica:

1. Mejoría en la ductilidad, sin disminución de la resistencia a la tensión.
2. Facilidad para ser endurecido por enfriamiento brusco en aceite o en aire en vez de agua, disminuyendo así la posibilidad de rajaduras o torceduras.

1.2 Clasificación de los aceros de herramientas.

Cualquier acero utilizado como herramienta puede clasificarse técnicamente como acero para herramientas; sin embargo, el término suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o formado.

Hay varios métodos para clasificar a los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se usen, como aceros templables en agua, aceros templables en aceite y aceros templables en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas.

Un último método de agrupación es el basado en el empleo del acero para herramientas, como aceros para el trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajo en frío.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros de herramientas adoptado por la AISI (American Iron and Steel Institute), tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas.

Los aceros para herramientas que más se utilizan se han agrupado en siete grupos y a cada grupo o subgrupo; se le ha asignado una letra del alfabeto, como sigue:

GRUPO	SÍMBOLO Y TIPO
Templado en agua	W
Resistentes al impacto.	S
Trabajo en frío	O Templable en aceite. A Mediana aleación y templable en aire. D Alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H (H1 - H19 incluso, base cromo; H20 - H39, incluso base tungsteno; H40 - H59, incluso base molibdeno)
Alta velocidad.	T Base tungsteno. M Base molibdeno.
Moldes.	P Aceros para moldes (P1-P19, incluso bajo carbono; P20-P39 incluso otros tipos).
Propósitos específicos.	L Baja aleación. F Carbono - Tungsteno.

Tabla 2. Identificación y tipo de clasificación de aceros para herramientas.

ELEMENTOS DE IDENTIFICACIÓN PORCENTAJES.

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
------	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----

ACEROS PARA HERRAMIENTAS TEMPLABLES EN AGUA

SÍMBOLO W

W1	0.60-1.40									
W2	0.60-1.40					0.25				
W5	1.10			0.50						

ACEROS PARA HERRAMIENTAS RESISTENTES AL IMPACTO

SÍMBOLO S

S1	0.50			1.50			2.50			
S2	0.50		1.00					0.50		
S5	0.50	0.80	2.00					0.40		
S7	0.50			3.25				1.40		

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO

SÍMBOLO O. TIPOS TEMPLABLES EN ACEITE

O1	0.90	1.60		0.50			0.50			
O2	0.90	1.60								
O6	1.45		1.00					0.25		
O7	1.20			0.75			1.75			

Tabla 2. (continuación)

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
------	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----

SÍMBOLO A, MEDIANA ALEACIÓN, TIPOS TEMPABLES EN AIRE

A2	1.00			5.00				1.00		
A3	1.25			5.00		1.00		1.00		
A4	1.00	2.00		1.00				1.00		
A6	0.70	2.00		1.00				1.00		
A7	2.25			5.25		4.75	1.00	1.00		
A8	0.55			5.00			1.25	1.25		
A9	0.50			5.00	1.50	1.00		1.40		
A10	1.35	1.80	1.25		1.80			1.50		

SÍMBOLO D, TIPOS ALTO CARBONO, ALTO CROMO

D2	1.50			12.0				1.00		
D3	2.25			12.0				1.00		
D4	2.25			12.0				1.00		
D5	1.50			12.0		4.00		1.00	3.00	
D7	.35			12.0				1.00		

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN CALIENTE

SÍMBOLO H

H1 - H19, INCLUSO TIPOS BASE CROMO.

H10	0.40			3.25		0.40		2.50		
H11	0.35			5.00		0.40		1.50		
H12	0.35			5.00		0.40	1.50	1.50		
H13	0.35			5.00		1.00		1.50		
H14	0.40			5.00			5.00			
H19	0.40			4.25		2.00	4.25		4.25	

Tabla 2. (continuación).

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
------	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----

H20 - H39, INCLUSO TIPOS BASE TUNGSTENO (H27 - H39 NO DESIGNADOS)

H21	0.35			3.50			9.00			
H22	0.35			2.00			11.0			
H23	0.30			12.0			12.0			
H24	0.35			3.00			15.0			
H25	.025			4.00			15.0			
H26	0.50			4.00		1.00	18.0			

H40- H59, INCLUSO TIPOS BASE MOLIBDENO (H40, H44 - H59 NO DESIGNADOS).

H41	0.65			4.00		1.00	1.50	8.00		
H42	0.60			4.00		2.00	6.00	5.00		
H43	0.55			4.00		2.00		8.00		

**ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD.
SÍMBOLO T, TIPOS DE BASE TUNGSTENO.**

H41	0.70			4.00		1.00	18.0	8.00		
H41	0.80			4.00		2.00	18.0	8.00		
H41	0.75			4.00		1.00	18.0	8.00		
H41	0.80			4.00		2.00	18.0	8.00		
H41	0.80			4.50		1.50	20.0	8.00		
H41	0.75			4.00		2.00	14.0	8.00		
H41	1.50			4.00		5.00	12.0	8.00		

Tabla 2. (continuación)

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
------	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----

SÍMBOLO M, TIPOS BASE MOLIBDENO

M1	0.80	-1.00		4.00		1.00	1.50	8.00		
M2	0.85			4.00		2.00	6.00	5.00		
M3	1.05			4.00		2.40	6.00	5.00		
M4	1.30			4.00		4.00	5.50	4.50		
M6	0.80			4.00		1.05	4.00	5.00	12.0	
M7	1.00			4.00		2.00	1.75	8.75		
M10	0.85			4.00		2.00		8.00		
M30	0.80			4.00		1.25	2.00	8.00	5.00	
M34	0.90			4.00		2.00	2.00	8.00	8.00	
M36	0.80			4.00		2.00	6.00	5.00	8.00	
M41	1.10			4.25		2.00	6.75	3.75	5.00	
M42	1.10			3.75		1.15	1.50	9.50	8.00	
M43	1.20			3.75		1.60	2.75	8.00	8.25	
M44	1.50			4.25		2.25	5.25	6.25	12.0	
M46	1.25			4.00		3.20	2.00	8.25	8.25	
M47	1.10			3.75		1.25	1.50	9.50	5.00	

ACEROS PARA HERRAMIENTA CON FINES ESPECÍFICOS.

SÍMBOLO L, TIPOS BAJA ALEACIÓN

L2	0.50	-1.10		1.00		0.20	1.50			
L3	1.00			1.50		0.20	1.50			
L6	0.70			0.75	1.50			0.25		

SÍMBOLO F, TIPOS CARBONO - TUNGSTENO

F1	1.00						1.25			
F2	1.25						3.50			

Tabla 2. (continuación)

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
------	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----

ACEROS PARA MOLDES, SÍMBOLO P

P1 - P19, INCLUSO TIPOS BAJO CARBONO (P7 - P19 NO DESIGNADOS).

P2	0.07			2.00	0.50			0.20		
P3	0.10			0.60	1.25					
P4	0.07			3.00						
P5	0.10			2.25						
P6	0.10			1.50	3.50					

P20 - P39, INCLUSO OTROS TIPOS (P22- P39 NO DESIGNADOS)

P20	0.30			1.25				0.25		
P21	0.20				4.00					1.20

CAPITULO 2

TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS

2.1 Métodos de tratamiento térmico.

Estrictamente hablando, todas las operaciones de calentamiento y enfriamiento constituyen el tratamiento térmico - cualquiera que sea su propósito - .Algunas veces esa expresión se usa en un sentido más restrictivo para señalar el temple y el revenido.

A continuación se explican los tratamientos térmicos mas comunes aplicables a los aceros para herramientas:

Normalizado. El normalizado, consiste en calentar el acero a una temperatura mayor que la usual para el temple, con el objeto de eliminar cualquier condición indeseable en la estructura .Es una especie de tratamiento correctivo usado después de la forja o después de un templado defectuoso, con objeto de devolver a el acero a una condición más "normal". En la mayoría de los casos, el acero se enfría al aire desde la temperatura de normalizado. Este tratamiento no se recomienda para aceros de temple en aire de alta velocidad o aceros para herramienta rojo- duro.

Recocido. El recocido puede efectuarse por muchas razones, de las cuales sólo dos son de interés para el fabricante de herramientas.

Recocido de suavizado. Un acero para herramientas forjado o en barra, tal como viene del forjado o del laminado, es muy duro para maquinarlo y debe ser recocido; o posiblemente un acero que ha sido ya templado deba ser recocido para cierto maquinado adicional. Para este tipo de recocido se acostumbra calentar el acero ligeramente por encima de su intervalo critico y entonces enfriarlo muy lentamente. El fabricante de herramientas siempre suministra temperaturas de recocido para el manejo de su acero.

Recocido para eliminar esfuerzos. No importa que tan cuidadosamente haya sido recocido un acero para herramientas en la primera ocasión, ya que debido a ciertas operaciones en el trabajo del acero pueden originarse esfuerzos internos considerables. Antes de templar la herramienta es conveniente eliminar dichos esfuerzos. Si se va a eliminar una gran cantidad de metal por maquinado, los esfuerzos resultantes son suficientes para provocar que la herramienta se deforme durante el temple, aunque se esté usando un acero templable en aceite o uno indeformable templable al aire. Cuando se necesita un maquinado extenso, en una herramienta que se requiera exactitud extrema, es buena práctica, para desbastar, darle un recocido a la pieza para eliminar esfuerzos y después terminar el maquinado con un corte ligero. Las operaciones en frío, de mandrilado, doblado, perfilado y acuñado (o aun estampado profundo) provocan esfuerzos internos en el metal que, deberán ser eliminados, igualmente, por medio de un recocido. Si no se eliminan esos esfuerzos pueden incrementarse tanto que, cuando se agregue el esfuerzo adicional del temple, la herramienta se deformara o romperá.

El recocido para eliminar esfuerzos se obtiene calentando el acero a temperaturas por debajo de su punto crítico y enfriándolo después. El enfriamiento en el horno es el mejor, el enfriamiento en cenizas secas es bastante bueno; incluso el enfriamiento al aire es mejor que no eliminar de alguna forma los esfuerzos. Si el fabricante de acero no proporciona la temperatura de este recocido, puede usarse el intervalo de 691° a 718 ° C para casi todos los aceros para herramientas, a reserva de que se hagan algunos análisis.

Endurecimiento o temple. Las herramientas se templan para aumentar su dureza y resistencia al desgaste. La operación consiste en calentar el acero a cierta temperatura por encima del punto crítico y entonces enfriarlo rápidamente para provocar el endurecimiento.

Debe aplicarse la temperatura de temple que proporcionan los fabricantes del acero, a menos que el usuario desee experimentar para encontrar una temperatura que se amolde mejor a sus necesidades particulares.

El medio de temple está también prescrito por el fabricante del acero. Algunos aceros deben ser templados en agua (o salmuera), otros deberán enfriarse en aceite y otros son templados por enfriamiento al aire. La temple en realidad se lleva a cabo en dos pasos separados y distintos. El primer paso es enfriar de una temperatura de aproximadamente 593°C con una rapidez mayor que la rapidez crítica de enfriamiento del acero, para asegurar el temple. El segundo es el templado, o endurecimiento, propiamente dicho, el cual en un acero al carbono comienza aproximadamente a los 260° C y se completa aproximadamente cuando el acero se enfría por debajo del punto de ebullición del agua o alrededor de los 93 °C.

Por esto es importante, en el enfriamiento, asegurarse que toda la sección de la herramienta, desde el centro hasta la superficie se enfríe por debajo de los 93°C, si va a endurecerse completamente. No es necesario, y en muchos casos no es deseable, enfriar una herramienta "a frío de piedra" , aunque ésta debe estar lo suficientemente fría como para que no hierva una gota de agua, antes que se considere segura para llevarla al horno de revenido.

Ya que el endurecimiento real ocurre en el intervalo de aproximadamente 260°C a la temperatura ambiente, se deduce que los llamados esfuerzos de enfriamiento, que a veces provocan fracturas, también se vean en este intervalo. Hay métodos de templado especiales que han sido concedidos para minimizar dichos esfuerzos, y por lo tanto, reducir el peligro de fractura por medio de enfriamiento retardado a través del intervalo de bajas temperaturas. Estos métodos se conocen por varios nombres, tales como "revenido diferido, (martempering)", "enfriamiento de tiempo" y " enfriamiento isotérmico". Estos fueron desarrollados principalmente para tratamiento térmico de piezas, más que de herramientas, y, puesto que es esencial el tiempo exacto, se usan más en el temple de producción, que para herramientas o piezas ocasionales. Por lo tanto, dichos tratamientos sólo se han utilizado en un sector reducido del temple para herramientas.

Temple en paquete. Este es un procedimiento de temple modificado y algunas veces recomendando para ciertos tipos de acero para herramientas, cuando no se dispone de hornos de temple de atmósfera controlada. Esto implica empaquetar en un recipiente con un material carbonáceo adecuado, preferentemente rebabas limpias de hierro colado, y después calentar todo el paquete a la temperatura de temple. Obviamente, el calentamiento procede más lentamente, y el tiempo necesario para el temple aumenta. Cuando se ha cumplido el tiempo adecuado, la herramienta se saca del paquete y se enfría. Aparte de los efectos de calentamiento lento y largo periodo de temple - el cual en ocasiones es deseable- este procedimiento mantiene la superficie de la herramienta libre de marcas y a menudo ayuda a prevenir la descarbonización de la superficie. Se recomiendan las rebabas de hierro colado porque, mientras protegen la superficie, agregan poco o ningún carbono. Es conveniente envolver la herramienta en papel de estraza, esto evita que las rebabas se adhieran a la superficie.

Revenido. Esta operación consiste en un recalentamiento de la pieza templada, con objeto de eliminar los esfuerzos internos producidos durante el temple y aumentar su tenacidad. Generalmente provoca que la herramienta pierda algo de su dureza. El revenido se realiza usualmente a temperatura relativamente baja, si se compara con la temperatura de temple.

El tiempo que la herramienta permanece a la temperatura de revenido es importante. Los resultados deseados se aseguran por una combinación de tiempo y temperatura. Ninguna herramienta deberá ser sacada de la temperatura de revenido antes de una hora. Aún en los pocos casos en que el templador pudiera sacarla durante poco tiempo, es más conveniente que perjudicial el dejar la herramienta durante todo una hora en calor. En esta tesis "una hora de revenido" significa una hora de permanencia después de que la herramienta haya alcanzado la temperatura de revenido. El tiempo necesario para que la herramienta se caliente a la temperatura de revenido depende de la sección, la temperatura de revenido y el medio de calentamiento.

Mientras mas grande sea la herramienta y menor la temperatura de revenido, el tiempo requerido será mayor. Los baños líquidos y los hornos de aire circulante calientan mas rápido que los hornos de revenido ordinarios. Como las herramientas templadas son revenidas a baja temperatura, que el ojo humano no puede apreciar, es importante tener una guía que permita estimar el tiempo probable para alcanzar la temperatura. El tiempo necesario después de que la herramienta ha alcanzado la temperatura, depende del tamaño y características de la herramienta. Las herramientas grandes o complicadas deben revenirse por más de una hora, por ejemplo: Las herramientas de estampado, bien podrían ser revenidas por dos horas, si la matriz fuera de alrededor de 15.2 cm por lado; y cuatro a cinco horas si fuera el doble de largo. En general, los aceros para herramienta altamente aleados deben ser revenidos durante más tiempo que aquellos que tienen muy poca o ninguna aleación.

Es años recientes, han aparecido nuevos métodos interesantes para producir suavamiento o superficies auto lubricantes en el acabado de herramientas. Esto usualmente implica el calentamiento de las herramientas terminadas hasta, o cerca de, la temperatura de revenido, en un baño de sales apropiado o en una atmósfera vaporosa o gaseosa. El resultado es una capa adherente que se dice incrementa la resistencia al desgaste de la superficie de la herramienta, proveyéndola de un portador para lubricante.

Tratamiento en frío (congelado profundo). Desde el principio se estableció que el temple del acero para herramientas se completa por debajo del punto de ebullición del agua, en otras palabras, cerca de la temperatura ambiente. Por muchos años se ha sabido que con el enfriamiento a la temperatura ambiente casi queda completo el temple, aunque hay a menudo una parte de la estructura del acero que hace la promesa de templarse y se enfría cruzando la temperatura crítica de enfriamiento, pero no lo cumple a la temperatura ambiente. Se cumpliría la promesa, sin embargo, si se enfría por debajo de dicha temperatura. En años recientes se han venido desarrollando equipos y materiales para eliminar los últimos rastros de estructura no templada, enfriando a bajas temperaturas. Estos métodos se conocen como "tratamiento en frío", "congelado profundo", etc., y se consiguen enfriando las herramientas

en hielo seco o en equipo especial de refrigeración. Con objeto de disminuir el peligro de fractura, la herramienta debe revenirse antes del tratamiento en frío, y este debe ser seguido por un segundo revenido. El tratamiento en frío se usa algunas veces para corregir los efectos de un sobrecalentamiento en ciertos aceros, tales como: al alto carbono; tipos alto cromo, los cuales desarrollan "austenita retenida" cuando se templen desde muy altas temperaturas.

Estabilizado. Mientras que el propósito primario del tratamiento en frío es completar cualquier templado que no haya tenido lugar a la temperatura del baño de enfriamiento, tiene otro resultado importante la estabilización del acero templado. Ciertos calibradores o herramientas muy exactas deben rectificarse hasta medidas precisas y deben mantener esta medida indefinidamente. Al transcurrir el tiempo ocurre que una herramienta templada puede cambiar su medida o forma desde unas diezmilésimas hasta fracciones mayores. Esto sucede por un proceso natural de "envejecimiento" en el que la austenita retenida se convierte en martensita. Obviamente, los fabricantes de herramientas no pueden esperar durante años para que dicha herramienta sea estable. Muchos años de envejecimiento pueden acumularse en pocas horas al aplicar un tratamiento en frío modificado, como el siguiente:

Después de que la herramienta ha salido convenientemente templada y revenida, se lleva al punto de pulido. Entonces se calienta durante una o dos horas a la temperatura de ebullición del agua y se enfría a la temperatura ambiente. A continuación se enfría en hielo seco por un equipo refrigerante adecuado durante un lapso similar, y después se le permite alcanzar la temperatura ambiente. Se somete al mismo ciclo de calentamiento y enfriamiento cuatro o cinco veces más, lo que proporciona al acero una condición estable, después de la cual se completa la operación de pulido.

Nitrurado. El término "nitrurado", como más comúnmente se usa, se refiere al temple de la superficie de ciertos aceros aleados, mediante la adición de nitrógeno a la superficie. Esto se hace por tratamiento térmico y terminado de las partes en una atmósfera gaseosa adecuada -

comúnmente amoniaco-, a una temperatura alrededor de 538°C la cual esta por debajo de la temperatura usual de revenido de estos aceros.

Los únicos aceros para herramienta para los cuales esto es lo indicado, son los que tienen temperaturas de revenido mayores de 538°C y principalmente los aceros de alta velocidad. Un método adecuado de nitrurar herramientas, conocido como baño de sales nitrurantes, es calentar las herramientas terminadas, o casi, en un baño de sales que contenga altos porcentajes de sales de cianuro. Para el acero de alta velocidad, la temperatura más recomendable es de 538 a 566°C y el tiempo de inmersión de 20 min. a una hora, dependiendo de los resultados deseados. El propósito es producir una capa extremadamente dura en la superficie, aunque esto sólo se obtiene algunas veces con la pérdida de algo de tenacidad.

Cianurado. Aunque el tratamiento con cianuro se aplica usualmente a piezas de acero suave para obtener superficies resistentes al desgaste, en ocasiones se aplica en aceros para herramientas, para obtener ciertas condiciones finales de la superficie. Brevemente, el proceso consiste en calentar la herramienta a la temperatura de temple en un baño con un porcentaje apreciable de cianuro de sodio. Dicha mezcla proporcionará algún carbono y nitrógeno a la superficie de la herramienta. Para el funcionamiento apropiado de los baños de cianuro es necesario verificarlos diariamente, ya que las sales de cianuro se pueden descomponer rápidamente.

2.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO.

En el análisis de los equipos para el tratamiento térmico es importante recordar que todas las operaciones inherentes son cuestión de temperatura, tiempo, atmósfera y rapidez de enfriamiento. Si la herramienta se calienta a la temperatura adecuada en el intervalo apropiado, -se mantiene durante el tiempo apropiado- en la atmósfera apropiada- y se enfría con la rapidez apropiada-, no hay ninguna diferencia entre que clase de equipo para tratamiento térmico deba ser usado.

Si tal transformación ideal se puede obtener con varios tipos diferentes de equipos, la elección puede hacerse sobre la base de costo y conveniencia. Vale la pena profundizar en los tres primeros de estos cuatro factores.

Temperatura. Las instrucciones de tratamiento térmico siempre prescriben que el acero deberá calentarse a cierta temperatura definida o en determinado intervalo de temperatura. La capacidad para hacer esto depende del horno que se utilice, el equipo de pirómetro y la habilidad y el cuidado del templador. Entre las mejores prácticas comerciales de temple, se acostumbra a permanecer en el intervalo de 14°C por ejemplo de 816 a 829°C. Trabajar dentro de un rango total de 28°C, es medianamente permisible -una variación mayor podría causar problemas en los aceros de alta aleación-.

La temperatura de temple debe ser controlada por muchas razones. Si es muy baja, el acero no se templará apropiadamente; en muchos de los casos la tenacidad puede ser perjudicada igualmente por temperaturas muy bajas o muy altas. Por muchos años se considero como una regla fundamental que “un acero para herramientas debe templarse a la más baja temperatura a la que pueda templarse totalmente”. Hoy se sabe que con frecuencia esta regla es errónea, más que correcta -por lo tanto es conveniente olvidarla-. El sobre calentamiento también tiene objeciones. Incrementa la descarburación, predispone a la torcedura y distorsiones. Si se lleva al exceso, causa crecimiento de grano, fragilidad y frecuentes fracturas.

De lo anterior se puede concluir que cada acero para herramientas tiene una única temperatura óptima de temple, la cual nunca deberá ser variada. Aunque esto no es completamente cierto. Las temperaturas de temple más altas producen mayor penetración de la dureza e incrementan la fuerza de la herramienta para resistir compresiones. Las temperaturas de temple más bajas disminuyen la penetración de la dureza, pero proveen de resistencia a agrietamientos o reventados. Por lo tanto, puede decirse que hay una mejor temperatura de temple para una herramienta dada. Esto no quiere decir que un acero deberá ser templado siempre a la misma temperatura, ya que esta depende de su uso.

Tiempo. El tiempo involucra la razón a la que el acero se calienta hasta su máxima temperatura y el periodo durante el cual se mantiene a esa temperatura. La mayoría de los templadores usan un reloj de alguna especie. - frecuentemente usan uno con alarma que suena después de transcurrir periodos medidos con precisión El tiempo de control en minutos, o incluso en segundos- no es mucho pedirle al templador.

El tiempo requerido para calentar una herramienta a una determinada temperatura es muy importante y depende de varios factores, tales como el tamaño de la pieza, el método de calentamiento; esto es, en horno, en baño de sales, etc.- la temperatura del horno al introducir la pieza y la máxima temperatura de calentamiento. Debe quedar bien establecido que el calentamiento de una herramienta se lleva a cabo en dos etapas. La primera etapa de éstas es el calentamiento hasta el punto crítico, o de absorción del acero, y en esta etapa la temperatura de la herramienta aumenta en proporción a la cantidad de calor que se le este dando. La segunda etapa es el calentamiento después del punto crítico. En realidad el acero absorbe calor cuando pasa por el intervalo crítico, sin aumentar su temperatura y debe absorber suficiente calor para completar sus cambios en el intervalo crítico, antes de que se continúe elevando la temperatura.

En el pasado se consideraba importante calentar el acero muy lentamente, particularmente si era de sección grande en la creencia de que la superficie se calentaría mucho más rápido que en el interior y, por lo tanto, se podría perjudicar al acero. Esto se considera ahora cierto solo para herramientas de pequeñas y medianas proporciones. En herramientas de diseño sólido se ha encontrado que, debido a la alta conductividad térmica del acero, sólo hay una pequeña diferencia entre el centro y la superficie en los primeros pasos del calentamiento (primera etapa), y prácticamente ninguna en la segunda etapa.

Si la herramienta se pone directamente en el horno caliente, el centro y la superficie alcanzarán la temperatura máxima exactamente al mismo tiempo. Consecuentemente, las nuevas recomendaciones para el temple de aceros tenaces, sugieren colocarlos directamente en un horno caliente a la temperatura de temple, permitiéndoles calentares “naturalmente”.

Esta práctica tiene varias ventajas, una de las cuales es un mejor control de la descarburación. Esto, sin embargo, no es aplicable a aceros cuyas temperaturas de temple sean mayores de 899°C, a menos que se use un paquete.

Atmósfera. Aunque los templadores hayan reconocido que la atmósfera que rodea a sus herramientas durante el temple tiene cierta influencia en los resultados, ha sido en los últimos años que se ha hecho trabajo científico sobre la relativo a este punto, y todavía más reciente el que se estén construyendo hornos de temple con atmósfera generada y controlada. Brevemente, se han aceptado dos tipos generales de atmósfera en los hornos - Oxidante y reductora-. Una atmósfera oxidante se crea admitiendo más aire en el horno que el necesario para quemar combustible. Una atmósfera reductora se obtiene admitiendo menos aire del necesario para quemar el combustible completamente; por lo tanto se deja un exceso de gases del combustible en el horno. Una atmósfera que se encuentre entre estas dos, que no tenga efectos oxidantes ni reductores sobre la superficie del acero, se denomina neutral. Con objeto de controlar la atmósfera con mayor exactitud, se disponen de equipos modernos que introducen al horno gases de composición conocida en porcentajes definidos. Estos se conocen como hornos con atmósfera controlada.

Se han establecido hechos definidos concernientes a los efectos de la atmósfera durante el calentamiento del acero, que brevemente se pueden resumir como sigue:

Se sabe que la composición del acero es importante, algunos tipos tienden a escamarse o descarburarse más que otros.

Puede establecerse generalmente que una atmósfera oxidante, aunque produce escamado en la herramientas, lo hace sin descarburar el metal en la capa interior. Una atmósfera reductora evita el escamado, pero puede producir descarburación si hay mucha humedad o CO₂ presentes.

En un horno controlado manualmente, la mejor atmósfera para el intervalo de temperaturas más bajo de temple, esto es, arriba de los 871°C es claramente oxidante.

Para el intervalo más alto de las temperaturas- superior a los 927°C- los hornos controlados manualmente pueden usarse con seguridad sólo para templado en paquete. De otra manera debe emplearse una atmósfera generada, en la que pueda controlarse el contenido de la mezcla.

La cantidad de flujo de la atmósfera en el horno es importante. Las áreas estancadas en una atmósfera oxidante tienden a convertirse en neutrales o aun reductoras, con lo que se producirá la descarburación. Las áreas estancadas (tales como aquellas dentro de los barrenos ciegos de una matriz), tenderán a ser atmósferas altamente reductoras, o a convertirse en más reductoras, y este efecto es tan pronunciado en ocasiones que, frecuentemente, se produce una descarburación excesiva.

Como ya se sabe que la atmósfera afecta la superficie y estructura de las herramientas, debe hacerse el mayor esfuerzo para mantener la atmósfera uniforme. No se pueden asegurar los mismos resultados una y otra vez, si el templador permite que la atmósfera de su horno varíe notablemente. Al seleccionar un horno de temple, la posibilidad de controlar la temperatura es, por tanto, un aspecto importante. Los hornos de temple al vacío eliminan por completo los problemas relacionados con la atmósfera, mientras funcionan apropiadamente.

2.3 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE ALGUNOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

AISI TIPO 01

Tipo de análisis:

Carbono	0.90%
Manganeso.....	1.60%
Silicio.....	0.25% Propiedades.

Descripción. El acero tipo 01 es un tipo de acero para herramientas, templeable en aceite no deformable, empleando especialmente para propósitos de trabajo con herramientas manuales. Se temple con seguridad, aún en la secciones más intrincadas y muestra muy pequeña variación de tamaño, o deformación en la operación de templado.

El acero tipo 01 también se obtienen en planos libres de descarbonación. Estos planos poseen un terminado en micropulgadas de 150 en los cuatro lados, eliminando la necesidad de eliminar la corteza. Están provistas de un barniz que impide el enmohecimiento y se empaacan con tiras especiales que protegen todas las superficies y bordes de los daños de transporte o almacenamiento.

Deformación durante el temple. Cuando se endurece adecuadamente el acero tipo 01 se dilata ligeramente - pero después del temple regresará, casi aun tamaño original, la figura 2.1 muestra la variación de tamaño por pulgadas de longitud. Debe recordarse que los aceros templados en aceite, mantienen mejor su tamaño sólo cuando se enfrían desde la temperatura apropiada de endurecimiento. Si se sobrecalientan tienden a mostrar contracción después del revenido a la temperatura recomendada.

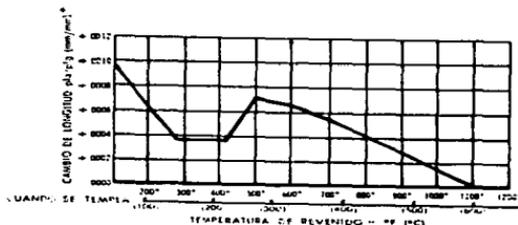


Figura 2.1. Cambio de tamaño de 1plg (25.4 mm) de diámetro que ha sido templado en aceite desde 802°C y revenido una hora a esa temperatura.

Descarburación. El acero tipo 01 no esta más sujeto a una descarburación en la superficie que los aceros para herramienta al carbono. Esto es muy importante por que mantienen el tamaño con tanta precisión, que muchas personas no afilan sus herramientas después del endurecimiento. La probabilidad de que el acero 01 forme una cáscara suave no es muy frecuente. Se recomienda que se trate térmicamente en un baño de sales neutras o en un horno de atmósfera controlada correctamente ajustada. Se sugiere un punto de rocío entre 7 y 13°C en una atmósfera endotérmica. En los antiguos hornos de atmósfera exotérmica, operados manualmente, se necesita definitivamente una atmósfera oxidante. Cualquier exceso de oxigeno ente el 2 y 12% hará un buen trabajo, pero es más conveniente entre 2 y 4%.

Maquinabilidad. La maquinabilidad de un acero tipo 01 puede establecerse entre 90 y 100% comparada con un acero con 1.0% de carbono para herramientas templado en agua, o de un 55 a 65% de un B1112. Las velocidades de corte recomendadas deben ser aproximadamente 100 a 120 pies por minuto en la superficie (30 a 37 m/seg.), cuando se emplean herramientas de corte de alta velocidad.

Aplicaciones. El acero tipo 01 se recomienda para muchas aplicaciones; las más importantes entre ellas son:

Dados sacabrocas.	Arboles o ejes.
Matrices de laminación.	Machos o maestros.
Matrices de moldeo.	Calibradores de rosca.
Matrices para accesorios.	Estampas.
Herramientas maestras.	

Tratamiento térmico.

Forja. Debe forjarse a una temperatura no mayor de 1066°C y dejar que las piezas se enfrien al aire en un lugar seco. Si las piezas de forja tienen un equivalente de 4 pulgadas o mayores, deberán enfriarse lentamente en cenizas o en un horno frío.

Normalizado. Las piezas de forja se normalizan por calentamiento a 816°C y se enfrian al aire.

Recocido. Para el recocido, el acero debe empacarse en un recipiente adecuado, usando un compuesto de empaquetado neutro o colocarse en un horno de atmósfera controlada. Debe calentarse uniformemente hasta 721 a 732°C, y enfriarse muy lentamente dentro del horno a una razón no mayor de 11°C por hora, hasta que el horno este negro. El horno puede entonces apagarse y proceder a un enfriamiento normal. Esto produce un máximo de dureza 217 Brinell.

Para eliminar los esfuerzos de maquinado y obtener una mayor exactitud al templar -primero machine burdamente, siga con un recocido por debajo del punto crítico de 649 a 677°C y enfriarse lentamente- finalmente concluya el maquinado.

Temple. El acero tipo 01 puede ser templado a partir de temperaturas entre 774 a 830°C. Las atmósferas endotérmicas deberán mantenerse con puntos de rocío entre 7 y 13°C. Este amplio intervalo de templado hace posible que sea aplicado en muchas secuencias del tratamiento térmico durante el día (este extenso intervalo de templado supera a todas las referencias de temperatura de endurecimiento del acero tipo 01 previamente enumeradas).

Sin calentamiento previo, coloque la herramienta dentro del horno caliente y déjese calentar "normalmente" hasta que su color coincida con el termopar del horno. Manténgase 5 min. por plg de espesor y enfriese en aceite.

Enfríese la herramienta hasta que adquiera la temperatura del aceite. Dejar el recipiente en que se transportan las herramientas dentro del tanque de inmersión en un buen lugar de "almacenaje" para herramientas endurecidas por unos cuantos minutos, mientras esperan el revenido. El acero tipo 01 es fácil de templear- caliéntese, manténgase y enfríese. Esto ahorra tiempo y problemas - es el procedimiento más seguro y da las mejores herramientas- .

Revenido. La tabla siguiente muestra el efecto del revenido a varias temperaturas con el acero de tipo 01. Se recomienda el revenido entre 191 y 204°C para producir la mejor combinación de alta dureza y tenacidad satisfactoria.

TABLA 2.1 Efecto de la temperatura de revenido en la dureza. Templado en aceite desde 802.5°C, revenido durante una hora a esa temperatura.

Temperatura de temple ° F °C Cuando se temple		Dureza Rockwell C
200	93	63/65
300	149	63/65
350	177	63/64
375	191	62/63
400	204	61/62
500	260	60/61
600	316	58/59
700	371	54/55
800	427	47/48
900	482	43/44
1000	538	33/37

Propiedades mecánicas.

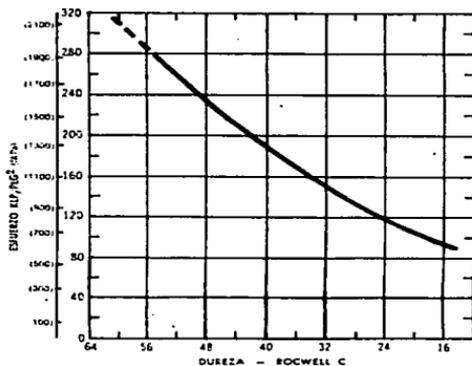


Figura 2.2 Resistencia a la tensión.

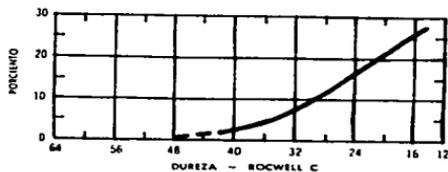


Figura 2.3 Porcentaje de alargamiento en 2 plg(50.8 mm).

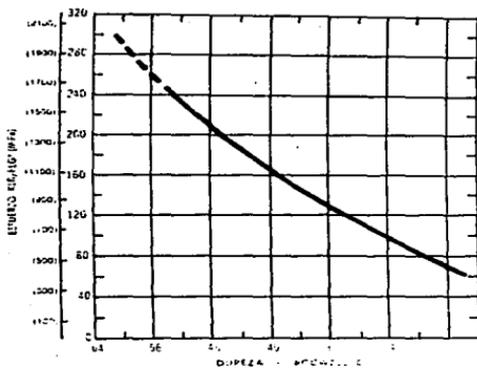


Figura 2.4 Resistencia típica a la cedencia.

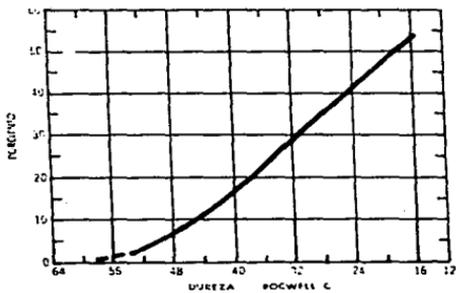


Figura 2.5 Porcentaje de reducción de área.

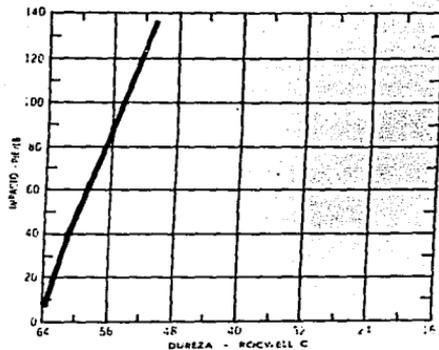


Figura 2.6 Análisis de impacto con probeta sin muesca.

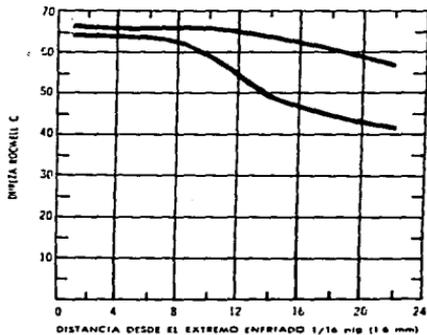


Figura 2.7 Prueba de templabilidad Jominy.

Propiedades físicas.

Peso específico.....7.60
 Densidad.
 lb/plg³..... 0.275
 Kg/m³..... 7612
 Modulo de elasticidad.
 lb/plg².....30.3 X 10⁴
 Mpa 209 X 10³
 Temperaturas criticas.
 As de C1 = 727°C
 As de C3 = 749°C

TABLA 2.2 Coeficiente de expansión térmica.

77.5°F	a	25.2°C	10 - 5.5°F	K - 1.100
38		5.7	10.3	
200		93	6.5	11.7
300		149	7.0	12.6
400		204	7.0	12.6
500		260	7.2	13.0
600		316	7.4	13.3
700		371	7.7	13.9
800		427	7.7	13.9
900		482	8.0	14.4
1000		538	8.1	14.6
1100		593	8.3	14.9
1200		649	8.4	15.1

AISI TIPO D2.

Tipo de análisis:

Carbono	1.50%
Manganeso	0.50%
Silicio	0.30%
Cromo	12.0%
Molibdeno	0.80%
Vanadio	0.90%

Propiedades.

Descripción. El acero tipo D2 es un acero de alto carbono y alto cromo, con propiedades de resistencia al desgaste extremadamente altas. Es de endurecimiento muy profundo y prácticamente no se deformará después de un tratamiento adecuado. El alto contenido de cromo le confiere propiedades de resistencia a la corrosión suave cuando esta endurecido. El acero tipo D2 también está disponible en placas sin descarburación con micrograbado menor de 150 en las cuatro caras, lo que elimina la necesidad de quitar la corteza de las barras, y están recubiertas con una laca que impide la herrumbre, y empacadas con tiras de ángulo para proteger las superficies y bordes contra daños en el embarque y almacenaje.

Deformación en el temple. Las propiedades de inderformabilidad del acero tipo D2 se ilustran en la figura 2.8. Si durante el temple se sobrecalienta a 1038°C o más, se contraerá y se hará ligeramente no magnético. Si esto ocurre, la herramienta debe ser totalmente enfriada y revenida. Si esto no resulta, puede intentarse una temperatura de revenido de 510 a 538°C.

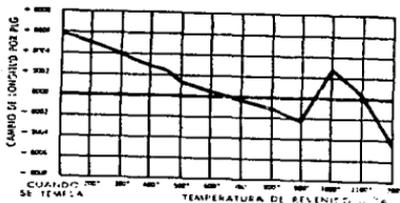


Figura 2.8 Cambio de tamaño en 1 plg (25.4mm) de diámetro, muestra templada en aire desde 10110.5°C y revenida durante 1 hora a la temperatura indicada.

Descarburación. Esta puede evitarse calentando en un baño de sales neutras o en horno de atmósfera controlada. Si no se dispone de éstos, se recomienda el templar en paquete.

Maquinabilidad. La maquinabilidad del D2 puede considerarse entre el 30 y 40% de la del acero para herramientas templado en agua con 1.0% de carbono al rededor de 20 al 30% del acero B1112. Cuando se utilizan herramientas de corte de alta velocidad se recomienda velocidades superficiales de torneado de aproximadamente 40 a 50 pies por min. (0.20 a 0.25 m/seg).

Aplicaciones

Las aplicaciones típicas son:

Dados de troquelado
 Dados de formado.
 Dados de acuñado
 Cortadores de cintas.
 Herramientas de cabecear.
 Dados de estirado.
 Punzones intrincados.

Punzones largos.
 Rodillos de formado.
 Rodillos de engargolado
 Herramientas patrón.
 Rodillos para molduras.
 Dados de extrusión.

Tratamiento térmico.

Forjado. El acero Tipo D2 se forja de modo muy similar al de alta velocidad. Calentar uniformemente y forjar desde una temperatura entre 1052 y 1093°C. No continuar la forja por debajo de 927°C pero recalentar tantas veces como sea necesario. Las forjas pequeñas y sencillas pueden enfriarse lentamente en cal; para forjas grandes, la mejor practica es colocarlas en un horno calentado a cerca de 843°C, calentarlas uniformemente a esta temperatura y luego apagar el horno, dejando que la pieza se enfríe lentamente en el. Esto no es un recocido, por lo que, después de enfriarse, la forja debe recocerse como se indica a continuación.

Normalizado. El normalizado no se recomienda si es necesario después del enfriamiento descrito en el horno.

Recocido. Para el recocido el acero debe empacarse en un recipiente adecuado con un compuesto neutro de empaque, o bien colocado en un horno de atmósfera controlada. Calentar uniformemente entre 843 y 871°C y enfriar muy lentamente en el horno a una razón no mayor de 11°C por hora, hasta que el horno esté negro, después de lo cual puede apagarse y dejar que se enfríe naturalmente. Esto producirá una máxima dureza 241 Brinell. Para eliminar esfuerzos del maquinado para mayor precisión en el templado, primero desbastar, después recocer por debajo de la temperatura crítica de 649 a 677°C y enfriar lentamente; luego terminar el maquinado.

Temple . endurecimiento. La dureza máxima se obtiene entre 996 y 1024°C. El acero tipo D2 conserva mejor sus dimensiones si se temple en este intervalo. Si se sobrecalienta se suaviza y contraerá perjudicialmente, al igual que otros aceros para herramientas de alto carbono y alto cromo. No se sobrecalienta. Sin precalentar se coloca la herramienta directamente en el horno caliente y se deja calentar naturalmente hasta que su color se iguale uniformemente al del termopar del horno. Las herramientas deben remojar a la temperatura durante 20 min., más 5 min. por pulgada de espesor, enfriarse al aire.

Tabla 2.3 Efecto de las diferentes temperaturas de endurecimiento sobre la dureza.

Enfriamiento en aire desde		Dureza
°F	°C	Rockwell C
1650	899	58/60
1700	927	60/61
1750	954	61/62
1800	982	62/63
1850	1010	62/63
1950	1066	60/62
2050	1121	48/49

Para este acero, lo más conveniente es el endurecimiento en baños de sales neutras o en hornos de atmósfera controlada. Las atmósferas endotérmicas deben mantenerse con puntos de rocío entre -6.7 a 4.4°C. Si no se dispone de lo anterior, un procedimiento común es empacar las herramientas en virutas limpias de hierro fundido o en compuestos de empaque neutros que existen en el mercado desde 996 a 1024 °C, sacar las herramientas del paquete y enfriar al aire. No se recomienda chorro de aire.

Sugerencia: Para evitar que las virutas de hierro se adhieran a la herramienta, envolver esta en un papel de estraza grueso antes de colocarla en el paquete. El papel se quemará y prácticamente desaparecerá al sacar la herramienta caliente para enfriarla.

Nota: Un tubo cilíndrico empacado con virutas limpias de hierro fundido requiere de cerca de 25min por pulgada de diámetro para calentarse hasta 1010°C si el horno se mantiene a una temperatura estable y se deja calentar el paquete "naturalmente".

Revenido. En la tabla 2.4 se señalan los efectos de diferentes temperaturas de revenido sobre la dureza del acero tipo D2.

TABLA 2.4 Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza.

Temperatura de revenido		Dureza	Equivalente
°F	°C	Rockwell	Escleroscopio
200	93	62/63	88
400	204	61/62	86
450	232	59/60	83
550	288	59/60	83
700	371	56/57	77
800	427	56/57	77
900	482	58/59	82
1000	538	59/60	83
1100	593	50/55	70
1200	649	44/45	58

Se verá que el acero tipo D2 tiene dos tenacidades óptimas, una a 232°C y otra 371°C. Para la mejor combinación de tenacidad y dureza, revenir el tipo D2 a 232°C. Aunque para prácticamente todos los efectos ésta es la mejor temperatura de revenido, puede obtenerse una mayor ductilidad reviniendo a 371°C, sacrificando alguna dureza. Es conveniente el doble revenido, haciendo el segundo 14°C por debajo del primero.

La curva de dureza muestra la misma restitución o dureza secundaria que se produce en el acero de alta velocidad. En el tipo D2 esto ocurre a 538°C, y si por accidente las herramientas se han sobrecalentado en el templado, causando contracción y pérdida de dureza, puede salvarse reviniendolas a 538°C. Recobrarán algo de su dureza perdida y casi su tamaño original. Los valores de dureza dados en la tabla anterior a 538°C se basan en una hora de calentamiento. Un calentamiento más prolongado provocara una dureza Rockwell C algo más baja.

Puesto que el acero tipo D2 mantiene elevada dureza después del revenido a 538°C, se presenta al nitrado gaseoso o al cianurado líquido, lo que proporciona un aumento de la resistencia al desgaste para herramientas revenidas y formadas.

TABLA 2.5 Coeficiente de expansión térmica (Las cifras son los coeficientes promedio entre la temperatura ambiente y la elevación de temperatura específica en la condición de recocido).

Temperatura ambiente		Coeficiente promedio	
66°F	a	20°C	
10 e	-5°F	K	e-1
212		100	5.81 10.5
392		200	6.29 11.3
572		300	6.56 11.8
752		400	6.76 12.2
932		500	6.93 12.5
1112		600	7.00 12.6
1292		700	7.09 12.8
1382		750	
1472		800	7.24 13.0

CAPITULO 3

MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA.

Muchos de los procesos por moldeado, formado, unión y corte de materiales se ha conocido y utilizado por muchos años. Las técnicas más nuevas que se han desarrollado se llaman maquinado no tradicional, no ordinario, sin posicionamiento o no mecánico. Estas incluyen el corte y soldadura con electrones, plasma, rayo láser y flujo abrasivo, chorro de agua y maquinado ultrasónico.

Entre otras técnicas está un grupo que básicamente son eléctricas, para materiales duros que no pueden cortarse con facilidad o por completo imposibles con medios mecánicos. Este grupo incluye el maquinado por electrodescarga (EDM), corte con alambre por electrodescarga (EDWC), rectificado por electrodescarga (EDG), maquinado electroquímico (ECM), esmerilado electroquímico (ECG), maquinado por descarga electroquímica (ECDM) y pulido electroquímico (ECH). Un segundo grupo remueve el metal por ataque o corrosión por vía química, en el fotograbado y operaciones de fresado químico.

3.1 OPERACIONES PARA EL CORTE DE MATERIALES DUROS.

Maquinado por electrodescarga (EDM). El EDM es un medio de conformar metales duros y formar agujeros profundos y de formas complejas mediante erosión por arco de todas las clases de materiales electroconductores. Las máquinas EDM más antiguas emplearon circuitos de resistencia - capacitancia (RC) o circuitos de relajación donde la energía se almacena en un capacitor y se descarga repetidamente a través de un claro. La red de estado sólido indicada en la figura 3.1 ha probado ser más eficiente y rápida.

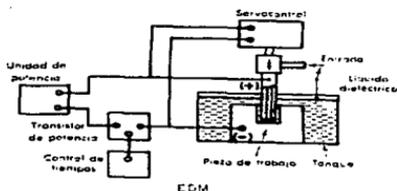


Figura 3.1. Elementos de un EDM.

La herramienta se acerca a la superficie de la pieza de trabajo, es decir, 0.025mm, y el claro se llena con un fluido dieléctrico. Cuando el banco de transistores se dispara por el control de tiempo, el potencial polariza una trayectoria sobre la cual fluye la corriente directa de la unidad de potencia, (como generador o un rectificador), formando una chispa entre los puntos más próximos del electrodo y la pieza de trabajo. Se funde y expulsa una cantidad diminuta de metal cuando la chispa salta a la pieza de trabajo dejando un pequeño cráter como de evidencia por el hueco producido en la superficie y la forma globular del desperdicio. También ocurre desgaste en el electrodo.

Mientras más sea la energía en un pulso (esto es, mientras más corriente se suministre al arco), más grande será el desperdicio arrancado de la pieza de trabajo; demasiada energía puede crear fisuras y dañar la pieza y es ineficiente. Un buen acabado requiere chispas débiles que dejen cráteres pequeños. La cantidad de corriente depende del número de transistores activados en el banco (porque cada transistor lleva solo determinada corriente) y la duración; del pulso (chispa) por el ajuste del temporizador para encender y apagar los transistores. Cuando un par de puntos (lo más cercanamente juntos) se arrancan por el arco, en otro par se vuelven los más cercanos y el siguiente pulso envía una chispa entre ellos y así sucesivamente. Por tanto, el arco y la remoción de material se mueven alrededor en el claro entre el electrodo y la pieza de trabajo. La polaridad inversa en la pieza de trabajo negativa mostrada en la figura 3.2 es de uso común para el desbaste, pero la polaridad directa de una pieza de trabajo positiva se refiere para algunas aplicaciones, especialmente para el acabado.

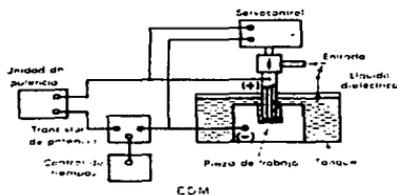


Figura 3.2 Elementos de un sistema EDM con polaridad inversa.

El temporizador en un sistema EDM, actúa para iniciar una serie de pulsos durante el curso de una operación y regula la longitud de cada pulso y el tiempo entre pulsos. Estos intervalos y la cantidad de corriente están preestablecidas para la mayoría de los sistemas, pero en algunos sistemas se varían durante la operación para optimizar el rendimiento mediante red de control adoptivo. Con tiempos en microsegundos, los pulsos son bastante cortos y ocurren a frecuencias altas. En un sistema, la duración de pulsos y el tiempo entre pulsos puede establecerse por separado en incrementos de 1 a 2999 microsegundos; otros tienen controles menos precisos. Los ajustes finos proporcionan control estrecho para acabado. Algunas máquinas tienen medios para agrupar series de pulsos en trenes cortos con intervalos ajustables entre grupos. Esto da a los controles más tiempo para corregir condiciones anormales como chisporroteo excesivo o cortocircuitos en el caso de que sucedan.

El claro entre la herramienta y la pieza de trabajo se mantiene por dispositivo de control servogobernado por el voltaje a través del claro en el tiempo de la descarga de la chispa. En algunos sistemas la herramienta se mueve en pulsos para evitar que el arco permanezca en un punto demasiado tiempo y ayuda a expulsar el ruido. Esto permite el uso de más corriente y una cantidad más alta de remoción de metal, hasta de cuatro veces más como se observa en un caso. En lugar de alimentarse en línea recta como es común, la herramienta puede orbitarse en algunas máquinas, esto es, la herramienta se gira sobre un eje excéntrico bajo control servo para barrer una forma más grande que ella misma, cortar conos hacia arriba y hacia abajo, cortes socavados y otros perfiles. En algunas máquinas las herramientas pueden moverse en trayectorias cuadradas o rectangulares o en líneas rectas conforme se alimentan en el trabajo. La pieza de trabajo, no la herramienta se orbita en algunos sistemas. Además de la capacidad de formar cavidades de muchas formas (algunas difíciles por otros medios), el orbitado ayuda la acción EDM por el agitado y enjuagado del electrolito y ayuda a distribuir el desgaste en el electrodo, mejorando la exactitud y el acabado. Conforme se desgasta una herramienta, el tamaño puede mantenerse aumentando la orbita. El baño de fluido que alimenta la herramienta y la pieza de trabajo realiza varias funciones. Como un dialéctico, soporta el voltaje para asegurar una alta acumulación de energía para cada

descarga. Entonces el fluido y las impurezas que contiene suministran iones para la trayectoria del arco.

El calor de la chispa vaporiza instantáneamente y descompone el fluido en su trayectoria. La inercia del fluido resiste la expansión rápida y causa una alta presión en la columna de descarga que intensifique el arco, donde se informa que alcanza temperaturas de decenas de miles de grados, y expulsa el metal fundido. Entonces, el fluido sirve para enfriar y solidificar y arrastrar el desperdicio y enfría la herramienta y la pieza de trabajo. Es deseable un flujo copioso del mismo; la práctica común es sumergir la herramienta y la pieza de trabajo en un baño y bombear fluido a través de agujeros en el electrodo. Los aceites minerales ligeros, como queroseno o aceite de lubricación, son fluidos satisfactorios para la mayoría de los casos. Se ha encontrado que para aplicaciones particulares son de ayuda los aditivos o compuestos de agua. Son deseables algunas impurezas, pero es necesario el filtrado para evitar demasiada contaminación.

Se usan electrodos de zinc - estaño, aleaciones de cobre y tungsteno, carburos cementados, aluminio, acero y grafito y algunas veces otros materiales para adecuarse a diversas condiciones. Un electrodo puede comportarse mejor que otros con cierto material de trabajo. Los electrodos pueden maquinarse en las formas ordinarias. Por ejemplo, se necesita un número de electrodos idénticos para hacer copias de un dado de forja y las aleaciones de zinc - estaño son económicas para dicho propósito porque pueden colarse y acuñarse con facilidad en un dado maestro. El grafito es barato y se maquina con facilidad, proporciona rápida remoción de metal y es el más empleado.

Los factores que determinan el rendimiento de una operación EDM son la cantidad de corriente eléctrica suministrada, I_s , la proporción de tiempo sobre la cual fluye la corriente, y el voltaje a través del claro en el arco. El tiempo en que la corriente pasa durante cualquier curso se representa por T_i . Principalmente este tiempo es una cantidad preestablecida, T_p , pero puede ser menos que T_p en algunos pulsos que se retardan, por ejemplo, por ionización lenta. También hay un tiempo ocioso establecido para cada ciclo. Entonces el tiempo total de la corriente I_s , que fluye durante un periodo sustancial, p , es ΣT_i , y la corriente

promedio efectiva es $I_e = I_c \left(\sum T_i / p \right)$. La cantidad de metal por remover es grande para una corriente efectiva grande y pequeña para una corriente efectiva pequeña.

Para cualquier voltaje suministrado, hay un claro máximo más allá del cual el dialéctico no llega a ionizarse en forma suficiente y no ocurrirá descarga. Por ejemplo, si se aplican 100 V a dos puntos cercanos juntos pero 25 μm aparte, el dialéctico se ioniza entre los dos puntos y se emite un arco que transmite toda la corriente que suministra. (Las cifras probablemente sean diferentes en otro caso). Para cualquier claro pequeño, el voltaje del arco es casi proporcionalmente más pequeño, por ejemplo, 40V por μm . Estos números son simplemente hipotéticos para ilustración y el valor que tendrían en cualquier caso depende de las circunstancias. El operador ajusta el dispositivo servo de alimentación para encontrar un potencial de claros deseado. Al adherirse a este potencial, el servo mantiene un claro constante conforme alimenta el electrodo en la pieza de trabajo.

Algunos de los pulsos no disparan debido a las impurezas en el electrolito, y otros factores; con más frecuencia cuando el claro es grande que cuando es pequeño. En consecuencia, para una entrada dada, la corriente efectiva, aumenta y así lo hace la cantidad de metal por remover conforme el claro se mantiene más pequeño, hasta un pico, por lo general donde I_e es aproximadamente el 90% del máximo. Cualquier claro más pequeño parece impedir la remoción del desperdicio, etc., y el rendimiento se va abajo. Se han derivado ecuaciones y cartas empíricas para diversas combinaciones de materiales en electrodo y pieza de trabajo y sistemas, y están disponibles para ayudar al operador a encontrar los ajustes óptimos para la máquina EDM. Los sistemas más avanzados incluyen controladores programables con memoria para almacenar información en los parámetros de operación y con capacidad para aplicar esta información según sea necesario para optimizar la acción. Un estándar promedio para remoción de material es aproximadamente 0.8 cm^3/Ah de corriente nominal para desgaste. Esto significa un estándar de remoción de 16 cm^3/h en una máquina con capacidad de 20 A. Para el acabado, la cantidad de metal por remover puede ser hasta de un tercio a la mitad.

El electrodo por lo general se mantiene a polaridad positiva para maquinar acero, aluminio, hierro fundido y algunas superaleaciones y se desgastan principalmente por la pérdida de iones durante la etapa inicial de cada ciclo. Esta es una parte pequeña de la acción durante los cortes de desbaste pesados pero no excesivos. Puede hacerse que un poco de metal removido de la pieza de trabajo se adhiera a la herramienta para compensar el desgaste. Por tanto bajo condiciones apropiadas y control en el desbaste, el desgaste de la herramienta puede hacerse tan pequeño que algunos fabricantes de maquinas reclaman que prácticamente "no hay desgaste", pero rara vez es posible lograr el ideal en producción. Por otra parte, el desgaste de la herramienta es relativamente severo para los cortes ligeros y acabado pero los acabados en la superficie son mejores. Una herramienta EDM se desgasta principalmente en las esquinas y los filos, de modo que estos pueden redondearse y deben evitarse esquinas marcadas tanto como sea posible en el diseño de la pieza de trabajo.

El tamaño puede mantenerse con bastante exactitud en el EDM, pero la precisión cuesta más. Un agujero hecho por EDM ordinario tiene la misma forma que la herramienta; una herramienta redonda hace un agujero redondo, etc. Un electrodo con una forma esculpida en camafeo produce un bajo relieve de la misma forma en la pieza de trabajo. Con control numérico, una herramienta simple puede moverse con respecto al trabajo o viceversa para labrar por EDM una superficie compleja. La cantidad del claro entre la herramienta y la pieza de trabajo, llamada sobrecorte, determina el tamaño del corte. El claro puede variar desde aproximadamente 5 mm a 175 μm más o menos, pero usualmente entre 25 μm y 75 μm . Mientras más alta es la cantidad de metal por remover, más grande deberá ser el sobrecorte ya que las descargas pesadas de chispas arrastran más metal de los lados y el espacio se necesita para despejar virutas grandes.

La exactitud obtenida en el EDM depende principalmente de la exactitud de la herramienta, del desgaste que sufra durante la operación y del control del sobrecorte. Mientras más exacta sea la herramienta, más el costo. Si debe mantenerse pequeño el desgaste de la herramienta en el acabado, la remoción de material deberá mantenerse pequeña. Para un conjunto constante de condiciones, el sobrecorte puede mantenerse, uniformemente a una

tolerancia de 5 μm alrededor de la herramienta si el sobrecorte es pequeño. Una práctica común es hacer corte de desbaste y acabado con una serie de electrodos frescos, precisamente como se hacen varios cortes para el maquinado ordinario. Las tolerancias típicas mantenidas en los dados de forja con $\pm 75 \mu\text{m}$ con tres electrodos consecutivos a $\pm 25 \mu\text{m}$ con 7. En otro trabajo, se ha informado de una tolerancia tan baja como $\pm 2.5 \mu\text{m}$, en condiciones cuidadosamente controladas.

Otra consideración importante es el acabado de la superficie, el cual depende de qué tan rápido se haga el trabajo. Las descargas a baja energía que dejan cráteres pequeños son necesarias para los acabados finos. Por tanto, la velocidad de remoción de metal es lenta. Se ha informado de superficies acabadas a menos de 250 nm R_a a los estándares de remoción de 50 mm³/h, pero pueden esperarse a los estándares ordinarios de 750nm a 4 μm R_a .

Sin embargo, una superficie hecha por EDM no tiene marcas como una superficie cortada mecánicamente, puede mantener lubricidad, y para algunos propósitos es mejor que una superficie común con las mismas o menos rugosidades medianas.

Deben conocerse y controlarse algunas serias desventajas del EDM. Puede resultar porosidad en la superficie como resultados del EDM en acero sulfurado o por aceites sulfonados de corte en la superficie en operaciones previas. De más importancia, el EDM deja una capa blanca rica en carbono desde 2.51 μm para cortes ligeros hasta 125 μm para cortes pesados en acero endurecible. Esta capa es metal que ha sido fundido y vuelto a solidificar. Abajo de esta capa frecuentemente hay una segunda capa de acero endurecido o reendurecido, por lo general, más profunda que la primera. Abajo de estas dos capas hay una zona revenida gradualmente que puede variar en profundidad desde 50 μm hasta 750 μm . Una operación demasiado severa en el EDM puede dejar microgrietas en la superficie. El rectificado en una superficie hecha por el EDM puede causar microgrietas en la superficie que se desarrollan y propagan bajo esfuerzos. Las superficies hechas por el EDM son bastantes duras y resistentes al desgaste pero frágiles y la resistencia a la fatiga puede cortarse más que en una mitad. Puede mejorarse una superficie por el EDM ligero y lento

después del desgaste. Los esfuerzos pueden relevarse por recocido y las superficies afectadas pueden removerse por rectificado cuidadoso, lapeado o fresado electroquímico.

Una maquina típica EDM se asemeja a una maquina fresadora vertical del tipo de columna y ménsula con ariete, o manguito en lugar de una flecha de cortador, y con un tanque en la mesa para el fluido dieléctrico. Muchas máquinas EDM se han hecho mediante la conversión de maquinas de fresado verticales. Se proporcionan ajustes de precisión en las direcciones coordenadas. En las máquinas muy grandes, la herramienta puede montarse en una platina en postes. Se proporcionan medios para circular y filtrar el fluido. Muchas de las máquinas modernas tienen suministros y controles de potencia de estado sólido. Las máquinas EDM de herramientas múltiples para producción tienen un número variable de electrodos separados, montados por lo general en un solo cabezal de maquina con un sistema servo , y conectados a un solo suministro de potencia.

Por lo tanto, un número de partes (se informa que hasta 50) puede maquinarse a la vez con un bajo costo unitario. Las máquinas de transferencia también se construyen para el EDM; una con cinco estaciones se usa para perforar pequeños agujeros en componentes de motores a reacción. Una maquina EDM pequeña de propósito general tasada a 25 A, se cotiza aproximadamente en 34,000 Dls. Están disponibles unidades de control y potencia con capacidades hasta de cientos de amperes, en especial para producción. Las maquinas EDM poderosas, controladas numéricamente pueden costar cientos de miles de Dls. El EDM esta en ventaja para cortar materiales duros, formas internas (en particular si son difíciles de alcanzar). Formas difíciles de generar y piezas delicadas. Puede reproducir cualquier forma que pueda cortarse en una herramienta, y mecánicamente hacer una herramienta y ahondar una cavidad por EDM por tanto puede ser más fácil que tallar la cavidad. Es demasiado lento para competir con el maquinado ordinario de los materiales comunes particularmente para formas simples. Por otra parte, el EDM remueve material casi tan rápido como el esmerilado con carburos cementados, y aún más rápido que el esmerilado para algunos de los materiales de la edad espacial. El ahondar y volver a hondar los dados de forja de acero endurecido a llegado a ser casi un monopolio del EDM. Un taller de forja

informa que dos mitades de un dado de forma para cigüeñal tomaron 122 hrs mediante el maquinado ordinario, pero solo 68.8 hrs por medio del EDM en una maquina de 200 A. Las aplicaciones en producción en cantidades por el EDM están creciendo, por ejemplo corte fino y ranuras y agujeros sin rebabas a tolerancias estrechas en carburadores. Sin contacto físico y por tanto sin fuerza entre la herramienta y la pieza de trabajo, pueden maquinarse sin distorsiones piezas frágiles como estructuras de panal.

Un ejemplo de una tarea particularmente adecuada para el EDM es el corte de cien agujeros de 0.008 in. de diámetro a 0.010 in, entre centros con un espesor de pared entre los agujeros de 0.002 in, a tolerancia de diezmilésimos de pulgada en molibdeno. Una variación del proceso, llamado rectificado por electrodescarga (EDG), utiliza una rueda de grafito para rectificado como electrodo con el fin de cortar herramientas de carburo para corte de forma, ranuras delgadas y estrechamente espaciadas y similares.

El corte con alambre por electrodescarga (EDWC) es una variación del EDM hecha en la forma indicada en la figura 3.3. Un alambre que se mueve entre carretes y rodillos se mantiene tenso por un dispositivo tensionador, sirve como un electrodo y pasa en contacto cercano con la pieza de trabajo. Comúnmente el alambre, es de cobre de 200, 150 o 100 μm de diámetro, o 50 μm de diámetro en molibdeno. Ya que el alambre se usa solo una vez, el desgaste no es un factor. La pieza de trabajo se mueve en las direcciones X e Y perpendicularmente al alambre por medio de control numérico y cualquier trayectoria debe recorrerse con facilidad. Puede proporcionarse un tercer eje "timon" para inclinar el trabajo con respecto al alambre para cortar, conificar, estirar o dar relieve. La cantidad de material por remover se gobierna por los mismos factores que en el EDM ordinario, y el estándar de viaje depende del espesor de la pieza de trabajo. Una maquina EDWC especificada en cm^2/h o en in^2/h indica, el área en un lado del corte hecho en una unidad de tiempo. Por lo tanto, con un bloque dado con espesor de 25 mm un estándar de 15 cm^2/h es equivalente a una alimentación a lo largo de la trayectoria de corte de 60 mm/h.

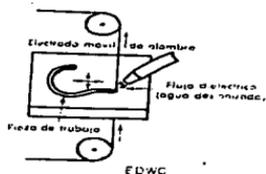


Figura 3.3 Elementos de un sistema EDWC.

Las formas interiores y exteriores pueden cortarse por el EDWC. El trabajo común incluye dados de estampado, partes prototipo y electrodos EDM. Los dados de carburo para estampado o progresivos, previamente tenían que hacerse en secciones rectificadas con exactitud y cuidadosamente ajustadas juntas, pero pueden producirse con mucha más rapidez con unidades enteras por el EDWC.

Por lo común se mantienen tolerancias tan estrechas como $5 \mu\text{m}$. El acabado promedio de superficie obtenido se estima que es desde 650 a $1150 \text{ nm } R_a$. El EDWC puede hacer cierto trabajo mejor que otros métodos; el costo de la herramienta es despreciable y el proceso puede correrse por periodos largos sin atención del operador. Algunos talleres dejan correr una máquina en un corte largo por un fin de semana completo con informe de buenos resultados. Sin embargo, las máquinas son costosas; combinan el EDM con control numérico.

4. PARTE EXPERIMENTAL.

OBJETIVO DE LA INVESTIGACION.

Confirmar si en el proceso de electroerosión por alambre existe la distorsión en las medidas finales del corte.

Si la respuesta es afirmativa tratar de encontrar una metodología para tratar de eliminarla, o en su defecto tratar de minimizarla.

METODOLOGIA.

Se cortaron, maquinaron, templaron y revinieron muestras de acero O1 y D2 de dimensiones de 41.885 mm de ancho por 41.012 mm de largo, con un espesor de 9.120 mm, todas con una tolerancia de ± 0.01 mm.

A estas muestras se les realizó un corte en el centro de una figura rectangular predeterminada, la cual se muestra en la figura 4.1, para posteriormente medirlas y así poder obtener los resultados indispensables para el análisis de la distorsión.

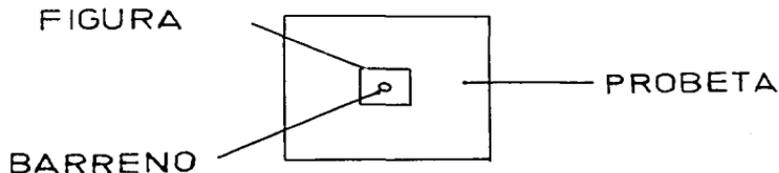


Figura 4.1.

5. PLANTEAMIENTO DE LOS EXPERIMENTOS

Muestras de acero O1 y D2 se maquinaron y rectificaron a una medida de 43 por 43 mm, con un espesor de 10 mm; cada medida con una tolerancia de ± 0.01 mm. Posteriormente se les realizó un barrenado de inicio de corte para poder introducir el alambre en el momento de electroerosionarse; ya que después de templadas sería muy difícil realizar este barrenado.

A continuación se les realizó un tratamiento térmico de temple con los siguientes parámetros:

El acero O1 se templó a una temperatura de 800 °C durante una hora e inmediatamente después se enfrió en aceite.

El acero D2 se templó a una temperatura de 1040 °C durante una hora e inmediatamente después se enfrió en aire.

Las tablas 5.1 y 5.2 nos muestran las durezas obtenidas en cada una de las probetas y el promedio obtenido para los dos tipos de aceros O1 y D2 respectivamente.

Tabla 5.1 Dureza obtenida después de el temple en el acero O1.

No de probeta.	Dureza R.C.	Promedio.
1	63, 62, 63	63
2	62, 62, 62	62
3	64, 63, 63	63
4	61, 63, 62	62

Tabla 5.2. Dureza obtenida después del temple en el acero D2.

No de probeta.	Dureza RC.	Promedio.
1	63, 63, 61	63
2	65, 65, 63	64
3	61, 62, 62	63
4	61, 62, 62	62

Inmediatamente después de templadas, se procedió a darles un tratamiento de revenido, con los siguientes parámetros:

El acero O1 se revino a una temperatura de 240 °C durante veinte minutos.

Al acero D2 se le realizó un doble revenido, por tener mayor cantidad de aleantes; estos dos tratamientos fueron hechos a una temperatura de 538 °C durante 20 y 15 minutos respectivamente.

Los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla 5.3 Dureza de el acero O1 después de ser revenido.

No de probeta.	Dureza RC	Promedio.
1	58, 58, 58	58
2	57, 58, 58	58
3	59, 58, 59	59
4	57, 59, 58	58

Tabla 5.4 Dureza de el acero D2 después de ser revenido.

No de probeta.	Dureza RC.	Promedio.
1	57, 58, 58	58
2	58, 58, 58	58
3	59, 58, 59	59
4	57, 59, 58	58

Finalmente se terminó la preparación de las probetas dándoles un último rectificado, para así obtener la medida final para la electroerosión.

La medida final fue de 41.885mm de ancho por 41.012mm de largo, con un espesor de 9.120mm; todas las medidas con un tolerancia de ± 0.01 mm

Preparadas las probetas se procedió a erosionarlas en una maquina de electroerosión por alambre del tipo CN, con una precisión de ± 0.001 mm, utilizando los siguientes parámetros.

PARÁMETROS.

Voltaje. (Volts).	Corriente. (Amp).	Tamaño de impulso. (Amp).	Velocidad. (mm/min)
3	3	8	0.48

Todas las probetas fueron erosionadas con los mismos parámetros.

Las dimensiones del corte que se realizó fue de 15 por 15 mm.

Figura 5.1. Maquina de electroerosion.

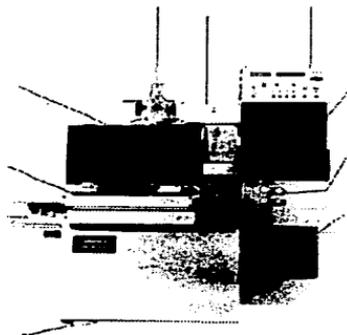
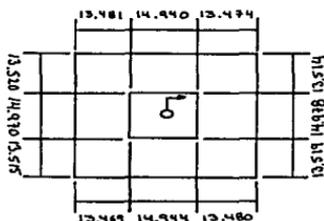


Figura 5.2. Panel de control de parametros.

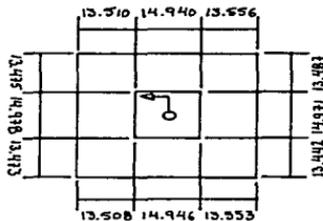


6. RESULTADOS OBTENIDOS.

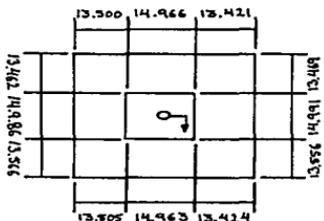
Las probetas al final fueron medidas en un comparador óptico, el cual cuenta con una precisión de 0.0025mm. Las medidas obtenidas de estas probetas se muestran en los esquemas que se encuentran a continuación.



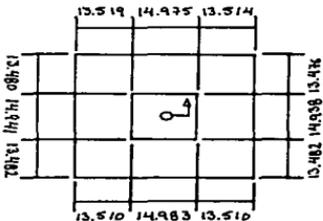
PROBETA 1



PROBETA 2

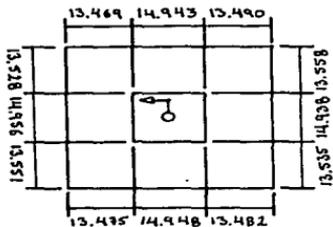


PROBETA 3

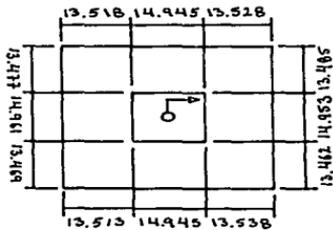


PROBETA 4

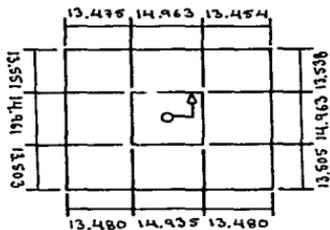
Figura 6.1 Medidas obtenidas en las probetas de acero O1.



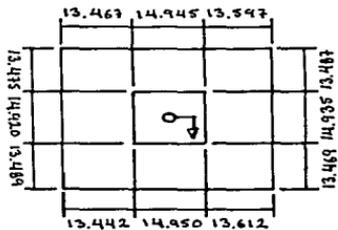
PROBETA 1



PROBETA 2



PROBETA 3



PROBETA 4

Figura 6.2 Medidas obtenidas en las probetas de acero D2.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

ACERO O1.

En la figura 7.1 se da la designación de las caras de las probetas para su identificación.

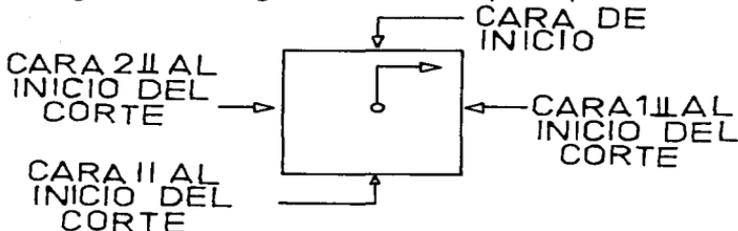


Figura 7.1. Nomenclatura de cada una de las caras de la probeta.

Tabla 7.1 Medidas de cada una de las caras del corte en las probetas del acero O1.

Probeta	Corte	Carra de inicio	C II al inicio del corte	C1 al inicio del corte	C2 al inicio ...del corte
1		14.940	14.944	14.978	14.970
2		14.938	14.943	14.978	14.971
3		14.966	14.966	14.991	14.986
4		14.938	14.941	14.986	14.975

Obteniendo la media de las diferencias de paralelismo (X_1) las caras a, b, c, y d (tabla 7.2). Podemos realizar una comparación con respecto al factor de error preestablecido el cual es de $E_p = \pm 0.01$ mm; ya que el indicador de carátula que se utilizo para alinear cada una de las probetas con respecto a los ejes coordenados (x,y) tiene esta precisión.

Tabla 7.2 Diferencias en el paralelismo entre las caras de las probetas (mm).

# Probeta	a	b	c	d
1	0.006	0.006	0.006	0.001
2	0.012	0.007	0.011	0.003
3	0.003	0.007	0.005	0.010
4	0.006	0.000	0.001	0.004

$$X_1 = \Sigma | a | + \Sigma | b | + \Sigma | c | + \Sigma | d |$$

$$X_1 = 0.005 \text{ mm}$$

$$X_1 < E_p$$

Por lo cual esta diferencia es aceptable.

Esto se puede corroborar observando las diferencias de las caras paralelas entre si dentro del corte. (Tabla 7.3).

Tabla 7.3 Diferencia entre caras paralelas pertenecientes al corte.

# Probeta	a - c	b - d
1	0.004	0.008
2	0.005	0.007
3	0.005	0.000
4	0.003	0.008
Media	0.004	0.006

Comparando:

$$\Sigma | a - c | / n < E_p$$

$$\Sigma | b - d | / n < E_p$$

Habiendo verificado el paralelismo entre las caras del corte; podemos ahora realizar una comparación entre las caras paralelas al inicio del corte y las caras perpendiculares al inicio del corte, siguiendo el siguiente procedimiento.

a) Obtener la media de las caras paralelas (X_p) y de las caras perpendiculares (X_d) al inicio del corte de cada una de las probetas

b) Calcular la diferencia o desviación (e) en valor absoluto de estas medidas.

c) Comparar los resultados.

Estos resultados se encuentran registrados en la tabla 7.4

Tabla 7.4 Desviación (e) entre las caras paralelas y perpendiculares al inicio del corte (mm).

# Probeta	$X_p = a+c/2$	$X_d = b+d/2$	$ X_p - X_d = e$
1	14.9420	14.9740	0.032
2	14.9405	14.9745	0.034
3	14.9440	14.9660	0.022
4	14.9395	14.979	0.039

El promedio de error obtenido es de :

$$e = \sum e/n = 0.031 \text{ mm}$$

Este valor se desvía de el nivel de error (E_p) preestablecido ; por lo tanto en este caso existe distorsión.

ACERO D2

Realizando el mismo análisis que para el caso anterior del acero O1 se obtuvieron los siguientes resultados :

Tabla 7.5 Medida de cada una de las caras del corte en las probetas.
acero D2

Probeta Corte	Cara de C II al inicio		C1 al inicio del corte	C2 al inicio ...del corte
	inicio	del corte		
1	14.953	14.948	14.956	14.938
2	14.945	14.945	14.953	14.961
3	14.963	14.961	14.963	14.935
4	14.935	14.920	14.950	14.945

Tabla 7.6 Diferencias en el paralelismo entre las caras de las probetas

# Probeta	a	b	c	d
1	0.030	0.006	0.016	0.008
2	0.008	0.010	0.007	0.005
3	0.024	0.013	0.005	0.002
4	0.015	0.020	0.025	0.012

$$E_p = 0.01$$

$$X_1 = 0.013$$

$$E_p < X_1$$

Tabla 7.7 Diferencia entre las caras paralelas pertenecientes al corte (mm)

# Probeta	a - c	b - d
1	0,014	0,002
2	0,001	0,005
3	0,019	0,011
4	0,010	0,008
Media	0,011	0,006

$$\Sigma | a - c | / n > E_p$$

$$\Sigma | b - d | / n < E_p$$

Analizando estos resultados podemos afirmar que existe distorsión en el paralelismo de las caras.

Tabla 7.8 Desviación (e) entre caras paralelas y perpendiculares al inicio del corte (mm).

# Probeta	$X_p = a+c/2$	$X_d = b+d/2$	$ X_p - X_d = e$
1	14,9505	14,9470	0,003
2	14,9450	14,9570	0,012
3	14,9620	14,9490	0,013
4	14,9275	14,9475	0,020

ESTE DOCUMENTO NO DEBE SER REPRODUCIDO SIN EL CONSENTIMIENTO DE LA FUENTE.

Obteniendo e tenemos que :

$$e = \sum e/n = 0.012 \text{ mm}$$

$$e > E_p$$

Por lo tanto existe distorsión en la perpendicularidad en las caras del corte.

CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que la distorsión existe dentro del proceso de electroerosión.

Para el caso en particular del acero para herramientas O1, la distorsión existe entre las caras perpendiculares al inicio del corte; tal distorsión representa en porcentaje con respecto al valor promedio de error E_p :

$$\% \text{ Distorsión} = (e - E_p / E_p) \cdot 100$$

$$\% \text{ Distorsión} = 210 \%$$

Para el caso en particular del acero para herramientas D2, la distorsión existe tanto en las caras perpendiculares al corte, como en las caras paralelas al corte; lo cual representa en porcentaje:

$$\% \text{ Distorsión (perpendicularidad)} = 20\%$$

$$\% \text{ Distorsión (paralelismo)} = 30\%$$

Esta mayor distorsión en el acero D2 muy posiblemente es provocada por la mayor cantidad de elementos de aleación, lo cual provoca un aumento en la respuesta a la templabilidad y por ende una mayor distorsión en el momento de ser electroerosionado provocado por una mayor liberación de esfuerzos en las caras del corte.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Wilson, Robert; Metallurgy and treatments of tool steels. Ed. Mc. Graw Hill
3a ed.1980.
- 2.- Doyle, Lawrence E., Materiales y procesos de manufactura para ingenieros.
Ed.Prentice hall. 3a ed.1988.
- 3.- Palmer, Frank R., Aceros para herramientas. Representaciones y servicios de ingenieria.
S.A. 4a ed. 1986
- 4.- Pekner, Donald; Handbook of stainless steels. Ed.Mc Graw Hill.
- 5.- Avner, Sydney H., Introducción a la metalurgia fisica. Ed.Mc. Graw Hill.
2a ed 1977
- 6.- Manual de operación de maquina de electroerosión JAPAX 3E.1979.
- 7.- Electromecanizado.Electroerosión y mecanizado electroquimico.
De. Marcombo,S.A. 1989.
- 8.- Metals Handbook Novena edición Volumen 16 "maquinado"