



11161
3
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

"EFECTO DEL CORTE POR ELECTRODESCARGAS EN LA
DEFORMACIÓN DE LOS ACEROS HERRAMIENTA 01 Y
D2 TEMPLADOS Y REVENIDOS"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA METAL MECANICA
P R E S E N T A :
ALFONSO ORTIZ ESTRADA

ASESOR: M. EN I, SERGIO DE MORAES BENITEZ

2003

4



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARTA DE VOTOS APROBATORIOS

Coordinación General de Estudios de Posgrado
FES-Cuautitlán
Presente.

Por medio de la presente nos permitimos comunicar a usted que revisamos la tesis titulada "EFECTO DEL CORTE POR ELECTRODESCARGAS EN LA DEFORMACION DE LOS ACEROS HERRAMIENTA 01 Y 02 TEMPLADOS Y REVENIDOS".

que presenta el (la) alumno (a) ALFONSO ORTIZ ESTRADA

con número de cuenta 7829422-2 y número de expediente 75520

para obtener el grado de MAESTRIA EN INGENIERIA (METAL-MECANICA)

Consideramos que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el Examen de Grado correspondiente, otorgamos el voto aprobatorio.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

_____ a _____ de _____ del _____

NOMBRE DE LOS SINODALES

Presidente DRA. MA. ELENA VILLAFUERTE CASTREJON

Vocal M.I. HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA

Secretario M.I. SERGIO DE MORAES BENITEZ

Primer Suplente M.I. MARCO ANTONIO ALARCON RAMIREZ

Segundo Suplente M.I. TOMAS RANGEL ORTIZ

Ma. Elena Villafuerte
[Signature]
[Signature]
[Signature]
[Signature]

B

AGRADECIMIENTOS

**A mi Esposa, María Guadalupe Espino:
Por ser el complemento de mi vida.**

**A mis Hijos, Gabriela y Alfonso:
Por existir y dar un nuevo sentido a mi vida.**

**A mis Padres, Sra. Martha Estrada y Dr. Alfonso Ortiz:
Por darme el ser,
por su guía y apoyo incondicional.**

**A mis Hermanos Martha, Norma, Mónica y Alejandro:
Por su cariño y apoyo.**

**A la UNAM:
Por la oportunidad de concretar
una etapa más de superación profesional.**

**A mi Asesor:
Por su orientación, consejos y asesoría.**

**A Dios:
Gracias por TODO.**

C

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1 LOS ACEROS HERRAMIENTA	6
1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS HERRAMIENTA	7
1.2 EFECTO DE LOS ALEANTES EN LOS ACEROS HERRAMIENTA O1 Y D2	8
CAPÍTULO 2 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS HERRAMIENTA	10
2.1 AUSTENITIZACIÓN	10
2.2 RECOCIDO	12
2.3 NORMALIZADO	13
2.4 TEMPLE	14
2.5 REVENIDO	17
CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS	20
3.1 INICIOS DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS	21
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	24
3.3 LOS SEIS TIPOS BÁSICOS DE MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN	35
3.4 ACABADO SUPERFICIAL Y PROPIEDADES MECANICAS	38
3.5 ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR ALAMBRE	43
3.6 APLICACIONES DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA	46

INDICE

	Pág.
CAPÍTULO 4 PARTE EXPERIMENTAL	50
4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS	51
4.2 CONDICIONES DE LA INVESTIGACION	52
4.3 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA EL ACERO O1	53
4.4 TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO D2	54
4.5 PROCESO DE CORTE DE LAS PROBETAS	56
4.6 MEDICION DE LAS MUESTRAS	57
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	59
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	75

INTRODUCCION

La industria metalmecánica ha desarrollado nuevas tecnologías debido a las necesidades de la humanidad, sus crecientes requerimientos obligan a la investigación y aplicación de nuevos conocimientos.

El desarrollo requiere de nuevos procesos de manufactura, materiales, técnicas, etc. para la realización de productos ya que la necesidad de eficiencia y competitividad cada vez son más grandes. El apoyo por parte de muchas disciplinas ha favorecido y facilitado tanto la investigación, desarrollo y puesta a prueba de muchos procesos y técnicas nuevas.

Uno de las partes importantes en la etapa de desarrollo de algún proceso productivo, es la fabricación de las herramientas y dispositivos necesarios para realizar las pruebas que se requieren para verificar y en su caso comprobar el funcionamiento del proceso o método en cuestión. Las exigencias de algunos componentes mecánicos obligaron al surgimiento de nuevos procesos de manufactura, tales como los maquinados por control numérico computarizado, maquinado por electrodescargas, corte por plasma, corte por láser y corte por chorro de agua.

Todos estos procesos tienen ventajas y desventajas uno sobre otro, por lo tanto, su campo de aplicación no es general, sino específico. Las condiciones de

cada caso en particular indicarán cual de ellos es el más apropiado para ser aplicado.

Uno de los procesos más utilizados en la fabricación de herramientas de alta precisión es el maquinado por electrodescargas, siendo los más comunes la electroerosión de corte por alambre y electroerosión por penetración.

El presente trabajo consiste en el estudio de la distorsión que se provoca en los metales cortados por electroerosión con alambre, ya que es una de las desventajas inherentes al proceso. Se analizarán las causas de dicho problema y se medirán las distorsiones generadas en piezas de aceros herramienta tratadas térmicamente al ser cortadas mediante este proceso. Siendo uno de los principales medios de fabricación de herramientas (troqueles y moldes) es importante entender el porque de la distorsión y prevenir dicho fenómeno.

OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo de investigación son:

- 1) Definir las condiciones de temple y revenido de los aceros herramienta (O1 y D2) a los que se ha de medir la distorsión durante el proceso de corte por alambre.
- 2) Medir la distorsión sufrida por los aceros herramienta (O1 y D2) al se sometidos a corte por medio de electroerosión por alambre.
- 3) Comparar los valores obtenidos de las mediciones de la distorsión cuando se realizan operaciones de cortes múltiples.
- 4) Realizar un cuadro informativo para determinar la relación que existe entre el numero de cortes (pasadas) y la distorsión que sufre el acero.
- 5) Sugerir métodos para la prevención o al menos el control de la distorsión sufrida por los aceros herramienta cortados por electroerosión de alambre.

CAPÍTULO 1. LOS ACEROS HERRAMIENTA

La definición de acero herramienta no aceptada de manera general ya que los requerimientos específicos son diferentes para cada persona que trabaja un material.

En general los aceros herramienta están fabricados con tolerancias muy cerradas en cuanto a su composición química y propiedades físicas se refiere, se usan generalmente para fabricar herramientas de corte, embutido, formado y en general cualquier componente mecánico que requiera alguna o varias de las siguientes propiedades: alta dureza, tenacidad aceptable, resistencia a temperaturas altas y estabilidad dimensional entre otras.

Cabe mencionar que las propiedades físicas que tenga un acero dependerán de su composición química así como del tratamiento térmico a los que haya sido sometido.

Las aplicaciones de los aceros herramienta son muy variadas, se pueden utilizar como componentes de herramientas o maquinaria, pero una característica será común en estas aplicaciones, las severas condiciones de operación a que están sometidas. Algunos ejemplos pueden ser, rodamientos sujetos a altas temperaturas, herramientas de corte para metales, válvulas y resortes para altas temperaturas, válvulas para materiales abrasivos en extremo etc.

El buen desempeño de un componente fabricado con un acero herramienta depende de varios factores dentro de los cuales podemos señalar: un diseño adecuado de la parte o componente, un selección correcta del acero a emplear y un tratamiento térmico adecuado. Cubriendo cada uno de los puntos arriba mencionados podemos obtener una buena combinación de resistencia al desgaste, a la deformación y al choque, a la fractura con cargas elevadas, además de una buena resistencia al ablandamiento a temperaturas altas.

1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS HERRAMIENTA

Existen varios criterios par clasificar a los aceros herramientas ya que algunos atienden a su composición química, algunos otros a su aplicación y otros a características menos comunes, debido a esta diversidad de criterios no existe una clasificación única. Para el presente trabajo nos basaremos en la clasificación de la A.I.S.I. que está fundamentada en su aplicación y su medio de temple.(1,6)

PROPIEDADES	CÓDIGO
Templables en agua	W
Trabajo en frío	O Templables en aceite.
	A Mediana aleación, templable en aire.
	D Alto carbono alto cromo.
Resistentes al impacto	S Resistente al impacto
Trabajo en caliente	H
Alta velocidad	M Base molibdeno
	T Base tungsteno
Acero para Moldes	P
Propósitos Especificos	L Baja aleación
	F Carbono Tungsteno

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los aceros cuya distorsión al ser cortados por electroerosión estudiaremos se encuentran en el segundo grupo de la clasificación (O1 y D2).

En otra clasificación el acero O1 se encuentra en el grupo de aceros de baja aleación y para trabajo en frío, mientras que el al D2 se le considera de alta aleación y para trabajo en frío.

1.2 EFECTO DE LOS ALEANTES EN LOS ACEROS HERRAMIENTA O1 Y D2.

La influencia de los aleantes en las propiedades mecánicas de los aceros herramienta no se deben considerar aisladamente, sino como el resultado de varios factores que actúan al mismo tiempo, el generalizar una situación determinada puede llevarnos a conceptos equivocados, por ejemplo; si tomáramos como regla que el cromo proporciona mayor dureza a un acero, mientras que el níquel y el manganeso le confieren tenacidad, podríamos encontrar algunos casos en lo que esto no es necesariamente cierto.

El cromo proporciona mayor dureza y resistencia a la abrasión si consideramos un tipo de acero que contenga un 2% de C, en este caso un 12% de cromo efectivamente proporcionará las propiedades antes mencionadas, sin embargo, si elegimos un acero con 0.10% de C. y un 12 % de Cr., la dureza obtenida será baja.

Lo mismo sucede con el manganeso, para un acero Hadfield con una concentración de 12 a 14 % la tenacidad obtenida es alta, pero en concentraciones de 1 a 5% y la combinación con otros aleantes puede provocar fragilidad o simplemente pérdida de tenacidad.

ELEMENTOS FORMADORES DE AUSTENITA

Los elementos más importantes en este grupo son el C, Mn y Ni. cantidades suficientes de estos aleantes pueden convertir a un acero en austenítico aun a temperatura ambiente. Un ejemplo de esto son los llamados aceros Hadfield los cuales contienen 13% de Mn, 1.2% de Cr y 1% de C. En este caso ambos, el manganeso y carbono tienen parte en la estabilización de la austenita. Otro ejemplo de esto es el acero inoxidable austenítico, con 18% de Cr y 8% de Ni.

ELEMENTOS FORMADORES DE FERRITA

Los elementos con más influencia son Cr, Si, Mo, W y Al. Las aleaciones de Fe-Cr con un porcentaje de 13% de Cr. o más pueden tener una estructura ferrítica aún a temperaturas cercanas al punto de fusión.(6,19,2a)

CAPÍTULO 2. TRATAMIENTO TERMICO DE LOS ACEROS HERRAMIENTA

Como se mencionó, las propiedades finales de los aceros en general dependen de su composición química y de su tratamiento térmico, mencionamos a continuación los más comunes, haciendo especial énfasis en el temple y revenido, ya que serán los tratamientos que se le darán a las probetas sobre las cuales se medirá la distorsión al cortarlas por erosión.

2.1 AUSTENITIZACIÓN

Para la mayoría de los tratamientos térmicos es necesario obtener una estructura llamada austenita (GAMA), ya que ésta se transformará en otras estructuras de acuerdo a las condiciones de enfriamiento que se le apliquen.

La austenitización es la más crítica de las operaciones de calentamiento llevadas a cabo en los aceros. Una temperatura de austenitización demasiado alta, o un periodo muy prolongado de permanencia a la temperatura necesaria para la transformación, pueden resultar en un crecimiento de grano indeseable, que Da como resultado pérdida de ductilidad o baja resistencia, esto es especialmente importante en los aceros herramienta.

Cuando se realiza el enfriamiento para el temple a partir de temperaturas bajas, respecto a la temperatura de austenitización, puede ocasionar durezas bajas

después del temple y también baja resistencia a la abrasión. Por otro lado, si al momento del temple, el centro de la herramienta se encuentra más frío que el exterior, debido a la falta de tiempo en el proceso, se pueden generar fisuras o desportilladuras e incluso fracturas de las esquinas, por las tensiones generadas durante el enfriamiento, especialmente en los aceros herramientas templables al agua.

El equipo para la austenitización de los aceros herramientas, se selecciona de acuerdo a la composición del acero, su tamaño y forma, así como los requerimientos de producción. Los hornos al vacío, los de atmósfera controlada y los baños de sales han probado satisfactoriamente su aplicación en rangos de temperatura de 750 a 1300°C.

Precalear los aceros antes de la austenitización es una práctica común aunque no siempre es necesaria, para piezas pequeñas y de geometría uniforme, el precalentamiento puede ser eliminado, se utiliza como una manera de protección contra las fisuras y distorsión extrema que resultan cuando una pieza es enfriada después de que es expuesta a las altas temperaturas de austenitización.

El precalentamiento es especialmente benéfico para los aceros altamente aleados para trabajo en caliente y los aceros de alta velocidad debido a que requieren largos periodos de permanencia a las altas temperaturas de

austenitización para lograr el equilibrio térmico y disminuir al máximo el riesgo de fisuras. (1,6,19,28)

2.2 RECOCIDO

La mayoría de los aceros herramienta son surtidos en estado recocido, en esta condición se obtiene la mínima dureza posible y por lo tanto la maquinabilidad es mejor, este tratamiento es de importante en los aceros herramienta, pues algunos de ellos tienen una dureza (debida a su propia composición química) que dificulta su maquinado, por lo que se requiere un recocido total, sin embargo, es necesario tener ciertas precauciones para evitar un crecimiento excesivo del grano.

El Recocido Total implica calentar el acero de manera lenta y uniforme hasta llegar a la temperatura de austenitización, se debe mantener a esta temperatura por periodos prolongados para permitir que el calor penetre completamente, (estos periodos varían dependiendo del tamaño de la pieza), y posteriormente se enfría de manera lenta también. Para la mayoría de los aceros herramientas el enfriamiento debe ser controlado hasta llegar a los 540 °C y en algunas ocasiones menor. Es importante evitar la nariz de la curva TTT para evitar transformaciones en estructuras no deseadas como la bainita o la martensita.

Para el recocido se utilizan hornos de atmósfera controlada, baños de sales u hornos al vacío, en todos los casos se requiere un equipo de control de temperatura

con posibilidad de manipular con precisión la temperatura durante los ciclos térmicos. Cuando no se tiene un horno del tipo de los mencionados arriba, se utilizan métodos alternos para prevenir la descarburización de los aceros, uno de los más comunes es el de empaquetar las piezas que se van a calentar, entre los materiales más utilizados para éste propósito podemos mencionar; el carbón mineral, la viruta de hierro gris y preparados de carbón activado.

Las fracturas provocadas por el choque térmico se pueden minimizar calentando el horno desde temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura de austenitización y mantener la temperatura un tiempo determinado para lograr la transformación austenítica completa, una vez superada ésta etapa, se debe enfriar lentamente dentro del horno de preferencia a razón de 8 a 22° C cada hora o menos hasta llegar a 540 °C, el enfriamiento posterior hasta llegar a temperatura ambiente se puede realizar en la mayoría de los aceros herramienta al aire tranquilo.

La estructura que se obtiene con un tratamiento de este tipo es el de una matriz perlítica con carburos disueltos en ella, ya que no se siempre se disuelven a las temperaturas de austenitización.(6,19,28,1)

2.3 NORMALIZADO

El normalizado requiere un calentamiento lento y uniforme hasta superar la temperatura de austenitización para lograr la disolución de la mayoría de enlaces

formados, y posteriormente se enfría en aire calmado. El normalizado se utiliza para lograr un relevado de esfuerzos residuales y un tamaño de grano más fino y uniforme, además de reducir los efectos tensionantes causados por las diferencias de secciones de un proceso mecánico (la forja por ejemplo), o bien, las diferencias de espesor de una pieza maquinada. En algunas ocasiones se utiliza el normalizado como un tratamiento previo a un recocido total o algún proceso de endurecimiento.

Algunos aceros herramienta endurecen aún enfriándose en aire calmado cuando se encuentran a temperaturas mayores que la de transformación austenítica, en estos casos no es recomendable utilizar el normalizado, de hecho, en ningún acero herramienta está recomendada la aplicación del normalizado excepto en aceros como el A2 y el P4.

Para otro tipo de aceros el normalizado se utiliza después de haber sido forjados y antes de ser recocidos, también suele usarse en recocidos totales que se dan a partes ya endurecidas y que requieren ser retrabajadas y posteriormente ser templadas nuevamente.(1,5,5)

2.4 TEMPLE

Consiste en el enfriamiento del acero desde la temperatura de austenitización hasta una temperatura predeterminada (por las características específicas de cada acero). El enfriamiento debe ser lo suficientemente rápido para lograr la

transformación de la austenita en martensita, la curva de enfriamiento debe evitar tocar la nariz de la curva TTT y llegar a la temperatura Ms y lograr la transformación austenita-martensita para obtener dureza en el acero.

Algunos de los medios de enfriamiento más comúnmente utilizados son: salmuera, agua, aceite, baño de sales, o bien, aire. Aunque el enfriamiento debe ser lo suficientemente rápido para asegurar, el endurecimiento total de la pieza, no es recomendable el uso de un medio de temple que exceda la velocidad de enfriamiento necesaria, pues se corre el riesgo de provocar fisuras o fracturas en la pieza. Algunos aceros herramienta que son templables en aire, se templean en atmósferas calientes, de 540 a 650°C dependiendo de su composición. El tiempo de austenitización para el proceso de temple debe ser suficiente para asegurar que el acero alcance la misma temperatura en toda su extensión, sin embargo, no debe excederse para prevenir el inicio de la descomposición de la austenita, crecimiento excesivo de grano y algunos otros efectos contraproducentes. Después del temple en caliente los aceros son enfriados en aire o en aceite a la temperatura ambiente. El temple en caliente minimiza la distorsión sin que se presenten efectos adversos en cuanto a la dureza y propiedades mecánicas se refiere y en la mayoría de los aceros templables al aire previene algunos efectos adversos que se presentan durante el enfriamiento convencional.

El temple es el tratamiento térmico más utilizado en los aceros herramienta, ya que lo que se busca en este tipo de aceros es la dureza y resistencia mecánica a

temperaturas altas, así como su estabilidad dimensional. En éste tratamiento son de vital importancia las temperaturas de cada etapa del tratamiento así como del tiempo de permanencia, la alteración en alguno de ellos puede traer diferentes consecuencias como podrían ser; falta de dureza en la pieza de trabajo, fisuras o fracturas, descarburización de la pieza lo que la convertiría en inservible, y cambios irreversibles en la estructura del acero.

En la gran mayoría de aplicaciones, el funcionamiento de una herramienta depende principalmente del adecuado diseño de la misma y de una correcta selección tanto del acero con que se ha de fabricar así como del tratamiento térmico que debe aplicarse. El rendimiento de una herramienta puede verse seriamente afectado por una mala selección de material, o bien, cuando el acero es el correcto, por un tratamiento térmico defectuoso.

Durante el temple no se debe considerar como objetivo único el obtener la mayor dureza posible, ya que en algunas ocasiones para lograr esto se expone el material a temperaturas de austenitización más altas de lo indicado y utilizando un medio de temple con un poder de enfriamiento mayor al especificado para el tipo de acero, esto trae como resultado, una mayor dureza, pero también, un tamaño de grano mayor y una cantidad mayor de tensiones internas lo que puede provocar fisuras o fracturas en la pieza posteriores al tratamiento e incluso cuando la pieza ya esta en servicio, siendo estas fallas generalmente catastróficas y sin posibilidad de reparación. (1,28,6.5)

El temple por si mismo es un tratamiento drástico, ya que el enfriamiento es brusco y genera una serie de tensiones internas por lo tanto es en muy contadas ocasiones cuando se utilizan las piezas directamente después del temple, generalmente se someten a un tratamiento posterior para relajar en forma controlada las tensiones generadas, este tratamiento es el revenido. Si no se diera este tratamiento posterior, la acumulación de las tensiones internas en la pieza producidas por el temple sumadas a las producidas por las condiciones de trabajo de la pieza, podrían superar la resistencia mecánica de la misma y producir una fractura.

2.5 REVENIDO

El revenido modifica las propiedades de los aceros templados para obtener una mejor combinación de resistencia, tenacidad y dureza que se obtienen de un proceso de temple. La estructura de un acero recién templado consiste en una mezcla heterogénea de austenita retenida, martensita y carburos. Para lograr la transformación de la austenita retenida a martensita, de la martensita a martensita revenida y un mejor acomodo de los carburos se realiza el revenido. En algunos casos es necesario realizar más de un revenido para asegurar una transformación completa, ó al menos lo más completa posible. En los aceros herramienta es una práctica común dar dos o tres ciclos de revenido dependiendo de la aplicación que se requiera.

Durante el primer revenido, parte de la austenita retenida se transforma en martensita y es necesario transformarla en martensita revenida por lo que se aconseja un segundo revenido. En algunos casos se presenta una segunda transformación y se repite el ciclo, esto significa, que es necesario un tercer revenido para asegurar que la cantidad de austenita retenida sea mínima y no representa peligro para la pieza por la transformación a martensita durante las condiciones de trabajo a que será sometida, ya que en la práctica común es imposible eliminar totalmente la austenita retenida.

Los cambios estructurales que tienen lugar en los aceros templados durante el revenido dependen del tiempo y temperatura. El tiempo de permanencia a la temperatura de revenido debe ser de al menos una hora por pulgada de espesor en cada ciclo. La mayoría de los fabricantes de herramienta que trabajan con aceros alta velocidad, recomiendan varios revenidos de al menos dos horas a la temperatura de revenido para asegurar la mejor combinación de propiedades mecánicas.

Es importante considerar el tiempo de permanencia a la temperatura de revenido para los diferentes espesores de las herramientas cuando se someten a un revenido, ya que se debe procurar una distribución uniforme de la temperatura en todas las secciones de la pieza en cuestión, esto es particularmente importante cuando se manejan temperaturas de revenido bajas. Para lograr buenos resultados en un tratamiento de revenido es importante considerar el tipo de horno en el que se lleva a cabo el mismo, así como los instrumentos de medición y control con los que

se cuenta. Para lograr un tratamiento de revenido adecuado es importante seleccionar correctamente la temperatura de revenido, la forma de acomodar la pieza en el horno para lograr un calentamiento uniforme, y mantener el tiempo necesario la pieza para asegurar la transformación deseada. Dentro de los medios más utilizados se encuentran; los hornos de sales, baños de plomo y hornos de atmósfera controlada recirculante.

El objetivo principal del revenido es disminuir las tensiones internas de un material que ha sido sometido a un tratamiento de temple, y esto se hace calentando la pieza a una temperatura determinada y posteriormente dejando enfriar la pieza generalmente en aire quieto. Como se mencionó anteriormente el número de ciclos de revenido dependerá de las propiedades finales que se requiera obtener. (1,19,28,6).

CAPÍTULO 3. PRINCIPIOS DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS

El maquinado por electrodescargas ha estado presente desde hace más de cuarenta y cinco años, en sus inicios, se le consideró como un método para maquinado de metales, que en poco tiempo convertiría en obsoletos, todos los procesos de maquinado anteriores. Sin embargo, el proceso de corte por descargas eléctricas tiene algunas limitantes por lo que no ha cumplido con las optimistas expectativas que se habían generado en sus inicios.

El maquinado por electrodescargas se utiliza en varios campos de la producción, por ejemplo: el sistema de inyección de combustible en los motores de la industria aeronáutica ya que continuamente se requiere añadir perforaciones muy pequeñas y precisas para conservar las emisiones dentro de las normas ambientales, en la industria electrónica, de joyería ,en el área médica y en general cualquier industria en la que se requiera el maquinado de formas muy intrincadas, pequeñas o de alta precisión. Sin embargo, el maquinado por electrodescargas no ha logrado una aceptación total en aquellos campos en donde el maquinado convencional es todavía competitivo, principalmente cuando se requiere remover una gran cantidad de material y se puede cortar con herramientas convencionales (de acero rápido ó de carburo de tungsteno).

Debido a su fuerte relación con la electrónica el maquinado por electrodescargas ha tenido también un desarrollo principalmente en el manejo del

comportamiento del arco eléctrico lo que ha dado como resultado una mayor velocidad de remoción de material. Aunado a esto se han desarrollado una serie de accesorios que hacen el proceso de mucho más versátil con lo que se acentúan las ventajas de este proceso sobre el maquinado convencional, de hecho, algunas operaciones que se realizan por electroerosión son virtualmente imposibles de realizar por otro método. (8,9)

3.1 INICIOS DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS

El desarrollo de esta tecnología se inicia durante los años posteriores a la segunda guerra mundial, los principales investigadores en este campo fueron dos científicos rusos B.R y N.I Lazarenko, en la entonces Unión Soviética, y es de hecho a ellos a quien se les atribuye la invención de la primera máquina que se puede considerar como apropiada para el maquinado por electrodescargas ó electroerosionadora en 1944.

La máquina inventada por los Lazarenko utilizaba el mismo principio y tenía muchas similitudes a los desintegradores utilizados en los Estados Unidos desde 1942, es decir, usaban una fuente de poder de corriente directa y un baño de líquido dieléctrico. Sin embargo otra de las máquinas descritas en el artículo de los Lazarenko era muy diferente a las usadas hasta ese entonces, pues esta usaba un soporte para el electrodo que era controlado por un servomotor(Figura 1), lo cual permitía mantener a una distancia constante de trabajo al electrodo con respecto a la

pieza de trabajo, además, el inicio e interrupción de la chispa estaban controlados por un circuito de resistencia capacitor y no por el movimiento del electrodo. Todas estas diferencias hicieron al proceso más eficiente y es de hecho sobre ese principio de funcionamiento sobre el cual se desarrollo la tecnología actual de la electroerosión de penetración.

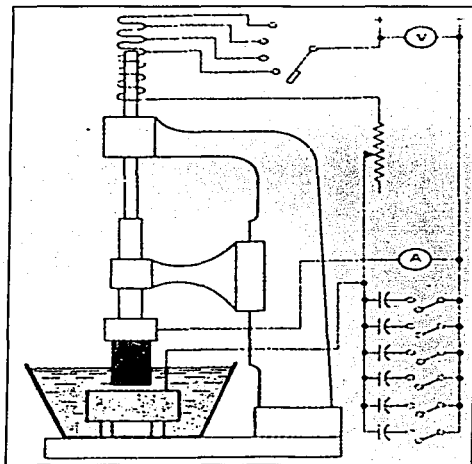


FIGURA 1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Durante los cinco años posteriores a la revelación de los Lazarenko se desarrolló rápidamente el proceso de maquinado por electrodescargas. La idea de usar corriente directa pulsante se adoptó de manera universal, algunos utilizaron el circuito resistencia capacitor, otros usaron una línea de corriente alterna rectificada y algunos otros utilizaron un alternador manejado por un motor de alta frecuencia, pero todos aceptaron la idea de controlar la chispa desde la fuente de poder. (10)

Las máquinas de aquellos entonces empezaron a parecerse más a las máquinas de ahora, es decir, la apariencia de una fresadora vertical con un motor servo-controlado para posicionar el electrodo sobre la pieza de trabajo que se encuentra sobre una mesa, que esta cubierta por una tina que se encuentra llena de líquido dieléctrico y un sistema de recirculación y limpieza del dieléctrico para conservar sus propiedades en un nivel apropiado.

A pesar de las bajas velocidades de corte que se obtenían de estas máquinas en algunas aplicaciones eran de una utilidad extrema, por ejemplo, en un reporte emitido por General Motors se describía el ahorro que se tuvo en la reparación y modificación de unos troqueles en los que se utilizaron 48 horas de trabajo de una máquina de electroerosión con su respectivo operador, la compañía estimó que de no contar con la electroerosión habría sido necesario el repetir esas herramientas habiéndose requerido aproximadamente unas 4,200 horas de trabajo. Las ventajas del maquinado por electrodescargas sobre el maquinado convencional son la precisión y repetibilidad del proceso, por ejemplo, se pueden maquinar orificios de un

diámetro de 30 ó 40 milésimas de pulgada con una precisión de ± 0.0002 " teniendo además otra ventaja, que no se presentan virutas y/o deformaciones que sí se presentan con el maquinado convencional.(18,4)

3.2 DESCRIPCION DEL PROCESO

El proceso de maquinado por electrodescargas puede ser muy simple o bastante complicado de entender, esto depende de que tanto se quiera saber lo que pasa en el momento del arco eléctrico y que tan a fondo se quiera llegar. Esencialmente este es un proceso de erosión en un material conductor de la electricidad mediante la producción de arcos eléctricos.

El cómo se produce por el arco eléctrico y realiza la erosión ha estado sujeto a diferentes y variadas teorías y una considerable cantidad de investigaciones, aún así, muchos investigadores admiten que algunos de los fenómenos que se dan en el arco eléctrico no han sido comprendidos y por lo tanto explicados completamente. Sin embargo, lo que se sabe del fenómeno ha servido de base y como un apoyo sólido para los fabricantes de las máquinas de electroerosión y aunado a sus propios esfuerzos e investigaciones se han construido cada vez máquinas más confiables y totalmente predecibles, y por otra parte se ha buscado que su funcionamiento y operación así como su mantenimiento sea lo más fácil posible.

La siguiente explicación tiene por objeto exponer los antecedentes y las bases para saber como pueden afectar las variantes durante el proceso de maquinado por electroerosión y cuáles son las formas de controlarlas. Es importante mencionar sin embargo, que no es el objeto del presente trabajo profundizar en la teoría del principio del funcionamiento de la electroerosión por lo que la explicación que a continuación se expone es solamente un apoyo para soportar la parte experimental.

Los elementos básicos de cualquier sistema de electroerosión convencional o de corte por alambre son: el dieléctrico, electrodo, fuente de suministro de potencia o fuente de poder y un sistema de control (normalmente servo-controlado) para el movimiento del electrodo y que es el que determina cuando debe avanzar y cuando debe detenerse el electrodo de acuerdo a las condiciones de la zona de arco. La explicación se basará en una máquina de electroerosión vertical, la cual tiene un tanque de líquido dieléctrico, un filtro y una bomba para la recirculación y limpieza(FIGURA 2).

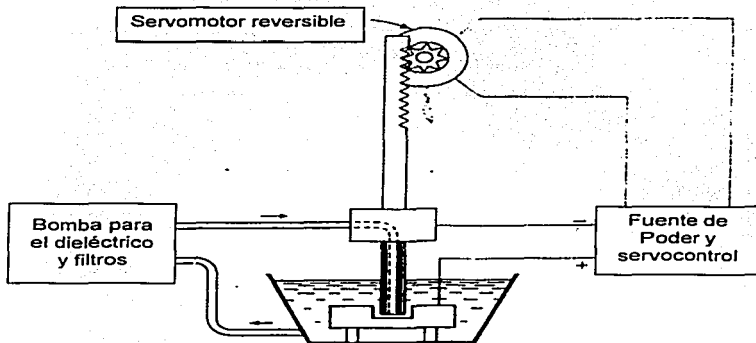


FIGURA 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La pieza de trabajo es montada dentro del tanque, conectada a la terminal de la fuente de poder y cubierta con el líquido dieléctrico, usualmente un aceite ligero. El electrodo se aproxima en forma descendente hasta quedar hasta quedar a unas cuantas milésimas de pulgada de separación, entonces se ponen en marcha la bomba del dieléctrico así como la fuente de poder y el servomotor. Durante todo el proceso de corte el electrodo es manejado por el servomotor y lo mantiene a una distancia constante, al menos de forma aproximada, de la pieza de trabajo.

La fuente de poder ha establecido una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza de trabajo, y cuando esta distancia es la correcta, permite apenas el paso del líquido dieléctrico provocando entonces un arco eléctrico y salta una chispa iniciándose el proceso de electroerosión. Si no se produce la chispa, el servomecanismo aproximará mas al electrodo para un nuevo intento, si el electrodo toca a la pieza de trabajo, se producirá un corto circuito y el servomotor alejará al electrodo y lo pondrá a la distancia adecuada. (10,11,1216,17)

El arco eléctrico tiene una duración de diezmilésimas y aun cienmilésimas de segundo, aunque se producen solo una chispa cada vez, cada una produce una pequeña erosión al fundir parte de la superficie de la pieza de trabajo y forma pequeños cráteres, el metal se solidifica en forma de pequeñas esferas que quedan suspendidas en el líquido y de no ser removidas afectaran la estabilidad del arco, por lo que es necesario eliminarlas y para eso se utiliza una bomba de succión y un filtro. Para poder guiar el líquido filtrado se usan mangueras y boquillas para lograr un mejor manejo. (Figura 2)

La erosión de la pieza se da cuando el electrodo va avanzando de posición hacia la pieza de trabajo aunque estos nunca deben tocarse. Normalmente la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo es de algunas milésimas de pulgada dependiendo de los parámetros que se tengan en la fuente de poder, es decir, si se está realizando un maquinado de desbaste o uno de afinado, a esa distancia que se requiere mantener para la formación del arco se le llama sobrecorte (gap). Al final del

maquinado por electroerosión la cavidad o hueco producido por el electrodo será más grande que el electrodo mismo, es decir tendrá la dimensión del electrodo mas la del sobrecorte.

El electrodo es una parte esencial del proceso de maquinado, una vez conectado al circuito de trabajo sufre también cierto grado de desgaste, y es por esto, que la selección de los materiales a utilizar en el electrodo para cada tipo de pieza de trabajo es de suma importancia para que el desgaste mayor se dé en donde se desea, es decir, en la pieza de trabajo. Los parámetros de corte juegan también un papel muy importante y su selección requiere del conocimiento del tipo de fuente de poder que se está utilizando.

Algunos investigadores descubrieron que cuando se invierte la polaridad de una fuente de poder de corriente directa y con un arreglo de electrodo-pieza de trabajo ya establecido, se podía también invertir la razón de desgaste entre ambos. Debido a esto, se desarrollaron fuentes de poder de corriente directa con la posibilidad de cambiar la polaridad dependiendo del tipo de material de la pieza de trabajo y del electrodo.

El circuito de desactivación de la chispa por medio de un circuito resistor-capacitor desarrollado por los Lazarenko, eliminó la necesidad del electrodo vibratorio, al menos para activar y desactivar la chispa. Como se mencionó anteriormente, se descubrió que se obtenía mayor velocidad de maquinado

manteniendo la posición del electrodo constante con respecto a la pieza de trabajo y controlando la chispa desde la fuente de poder.

El siguiente paso importante en la electroerosión fue la combinación del circuito de activación y desactivación de la chispa mediante el circuito resistor-capacitor y el manejo del posicionamiento del electrodo mediante un mecanismo de servomotor. Con esta combinación se pudo responder al constante cambio de distancia de sobrecorte (gap) que se presenta durante el maquinado. La variación se presenta debido a las condiciones del líquido dieléctrico, calor acumulado, etc.

Durante el proceso de la generación de la chispa se produce un ciclo en donde se producen incrementos y decrementos de voltaje, producto del acercamiento y alejamiento del electrodo con la pieza de trabajo. Estas variaciones de voltaje son una manera indirecta de medir la distancia que existe entre el electrodo y la pieza de trabajo.

Los Lazarenko y algunos otros pioneros en la fabricación de máquinas de electroerosión utilizaron esta manera indirecta de medición para controlar el movimiento recíprocante del servomotor que controla la posición del electrodo. Un simple circuito establece el equilibrio representado por el voltaje cero en las terminales del servomotor cuando el voltaje de la chispa tiene el nivel correspondiente al gap. El incremento y decremento del voltaje de la chispa aparece como corriente de polaridades diferentes en las terminales del servomotor,

cambiando el giro del motor en una dirección u otra. Los avances que se dieron posteriormente se enfocaron al principio electromecánico del proceso y se logró obtener un proceso más controlado, predecible y, por lo tanto, eficiente.

El desarrollo se ha llevado a cabo a pesar de no existir una explicación totalmente aceptada del fenómeno de la electroerosión. Las teorías de cómo la chispa erosiona a la pieza de trabajo (y al electrodo) no han sido completamente soportadas por una evidencia experimental, pero una teoría que propone que la acción erosiva es una compleja combinación de efectos térmicos y eléctricos, es la más aceptada.

Esta teoría llamada termoelectrónica desplazó a otras dos cuyos principios eran; en la teoría electromecánica que la erosión es el producto de la expulsión de partículas provenientes de la pieza de trabajo debido a un fuerte campo eléctrico y por otro lado, la segunda teoría expone que varios efectos de la descarga eléctrica generan "chorros de flamas" que funden el metal de la pieza de trabajo.

La teoría electromecánica asume que no existen efectos por el calor, y que la pieza de trabajo no se ve afectada en su micro estructura y en sus propiedades. Estas aseveraciones son equivocadas, y esto se ha probado en la práctica. Las herramientas fabricadas por medio de electroerosión en algunas ocasiones se fracturan o se rompen sin una razón aparente. Esta situación empezó a aclararse a principios de los sesenta cuando con técnicas de investigación metalográficas

combinadas con un buen poder de ampliación del microscopio, se logró observar la presencia de una pequeña capa de metal fundido y reendurecido en la superficie de la pieza de trabajo. Las pruebas mostraron que esta capa era usualmente más dura que el material base de la pieza y que presentaba una concentración de esfuerzos ligeramente mayor, esto reducía la resistencia a la fatiga de las partes y explicaba la presencia de fracturas en las piezas.(10,11,15)

Sin duda alguna el calor es un fenómeno presente en la electroerosión, durante algún tiempo no se entendía de donde provenía el calor pero se daba por hecho, posteriormente se hicieron estimaciones de la temperatura generada en el arco y se calculó que podría llegar hasta decenas de miles de grados Celcius. Otra conclusión fue que la generación de calor variaba con el tiempo en que estaba activada la chispa y la frecuencia con la que se daba, es decir, como se desarrollaba el proceso de corte.

De acuerdo a la última teoría termoeléctrica, la descarga ocurre en varios pasos como se ilustra en la Figura 3, primero, el estado de ionización mostrado en la figura 3(a), la carga inducida en los dos electrodos por la fuente de poder, genera un fuerte campo eléctrico, que es más fuerte mientras más se acercan hasta casi tocarse, y es ahí cuando la descarga tiene lugar. Iones y moléculas del líquido dieléctrico están polarizadas y orientadas entre estos dos picos formando un estrecho canal de baja resistencia, por el cual se inicia el flujo de corriente lo cuál abrirá el camino para el flujo de corriente principal. (10,11,16)

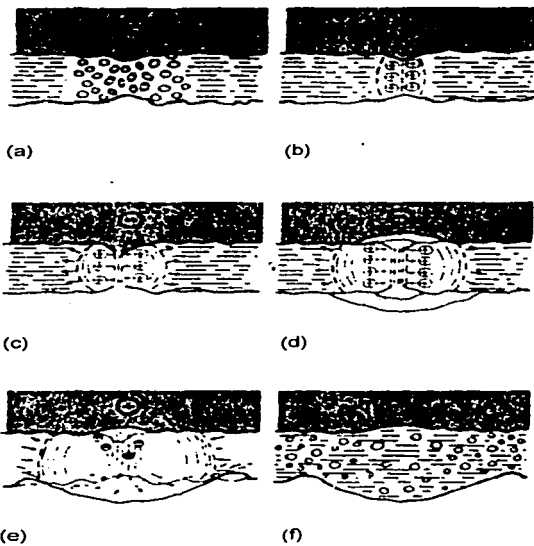


FIGURA 3

La ionización continúa en la siguiente etapa 3(b) aún cuando la corriente continúa fluyendo entre los electrodos. En la etapa 3(c), la resistencia en el canal empieza a decrecer mientras que se incrementa la corriente. En este punto el canal se ha ionizado por completo y consiste en plasma formado por iones positivos y electrones libres, mezclados con gas formado por la descomposición química del líquido dieléctrico, el vapor de metal es expelido por ambos electrodos.

La intensidad de corriente en esta etapa es muy alto quizá de 10^7 ó 10^8 amp./seg. La corriente alta produce un fuerte campo magnético en el canal, lo cual atrae los iones hacia el eje del canal de descarga. Los iones atraídos magnéticamente comprimen el canal de corriente e incrementan la temperatura hasta llegar a decenas de miles de grados Celsius, lo cual funde una porción de metal de la pieza de trabajo y la vaporiza 3(d). El vapor provee algo de la fuerza que expelle el metal fundido de la pieza de trabajo y ayuda además a que se colapse el canal ionizado 3(e). Otro efecto, el impacto mecánico de la descarga en si, contribuye a su expulsión. La trayectoria de expulsión deja marcas en el filo de los cráteres como se muestra en la figura 3(f). (10,11)

En el último dibujo se muestra el resultado de la descarga, un gran cráter en la pieza de trabajo y (lo inevitable) un cráter mucho más pequeño en el electrodo. En este caso pequeño y grande son relativos, sin embargo una medida típica para un diámetro de cráter en la pieza de trabajo sería de 100 micro pulgadas.

El ciclo está ahora completo, el metal fundido es removido de la superficie de los electrodos por el líquido dieléctrico formando pequeñas esferas que son expulsadas por el flujo del mismo.

Otros elementos del proceso de electroerosión que han sido analizados mediante la teoría termoelectrica incluyen, el poder de remoción de metal, absorción del calor del electrodo y del líquido dieléctrico, efectos de la duración del pulso y las características de la superficie electroerosionada.

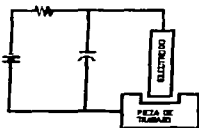
Los experimentos mostraron que más del 90% de la energía de la chispa se utiliza en calentar la superficie del electrodo. La mayor parte de la energía que absorbe el electrodo funde parte de él pero no es expulsado el metal fundido ya que se enfría rápidamente por lo que permanece unido a la superficie.

La diferencia en la duración del pulso tiende a alterar el comportamiento eléctrico y mecánico en la remoción de material. Los experimentos también mostraron que pulsos más largos eran menos eficientes en términos de remoción de material para una cantidad de energía dada. Sin embargo, los pulsos más largos dan una velocidad de remoción de material mayor hasta ciertos niveles, se incrementa la rugosidad, aunque el desgaste del electrodo es menor.

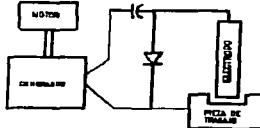
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3. LOS SEIS TIPOS BÁSICOS DE MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN.

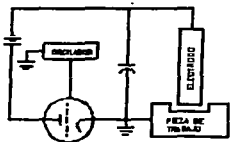
Las siguientes ilustraciones muestran en orden cronológico los avances que han tenido, en cuanto a diseño, las fuentes de poder usadas en electroerosión.



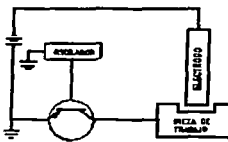
CIRCUITO RC "RELAJADOR"
FIGURA 4 (a)



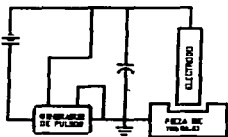
GENERADOR ROTATORIO
FIGURA 4(b)



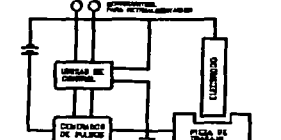
GENERADOR-TUBO DE VACIO
FIGURA 4(c)



GENERADOR CON TRANSISTOR
FIGURA 4(d)



GENERADOR DE PULSOS
FIGURA 4(e)



GENERADOR DE PULSOS CON SERVOCONTROL
FIGURA 4(f)

FIGURA 4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El circuito RC es con el que se inició la electroerosión, este es uno de los circuitos básicos en la electrónica, lo conocen como "relajador", lo cual significa, que almacena energía durante un determinado tiempo y entonces se "relaja", es decir, descarga la energía a través de la resistencia. En este caso, la carga es almacenada en el capacitor y posteriormente es descargada a través de la baja resistencia del canal ionizado. La pieza de trabajo y el electrodo forman en ese momento un capacitor por si mismas, conectadas en paralelo con el circuito capacitor, el cual es escogido para que rompa su resistencia dieléctrica primero, figura 4(a). El valor del resistor, el cual determina la velocidad de carga, y la capacitancia en paralelo determinan la frecuencia de descarga del circuito.

El circuito RC es simple y controlable pero en cuanto a velocidad de corte es lento, esto es debido a que no puede manejar pulsos largos o de alto amperaje.

El generador de impulsos, un motor manejado con generador con salida de corriente directa rectificadas, maneja pulsos largos y de alto amperaje, pero tiene la desventaja de que no puede dar acabados finos. Figura 4(b).

Los tubos de vacío han sido usados en circuitos RC para incrementar la cantidad de energía que pueden manejar, esto a pesar de que los tubos de vacío no son totalmente compatibles con las características de voltaje y energía que se utiliza en la electroerosión y por lo tanto, no son muy efectivos cuando se usan para controlar el pulso directamente. La función principal de los tubos de vacío es

desactivar intermitentemente la corriente, dejando al resistor y al capacitor determinar la energía de la chispa. Figura 4(c).

Cuando la "trayectoria" eléctrica entre el electrodo y pieza de trabajo se rompe, el capacitor tiene una oportunidad de recargarse. Los tubos permiten también un control directo de la frecuencia por medio de un oscilador que activa y desactiva el tubo. Un inconveniente de los tubos de vacío es su baja capacidad de respuesta a los cambios de activación /desactivación, lo que produce una chispa inconsistente.

Los transistores son ideales para cambiar directamente el pulso a desactivado y activado, controlados por sistemas de retroalimentación Figura 4(d) y más recientemente por otros dispositivos de control más sofisticados, son la base de todas las fuentes de poder modernas Figura 4(e). Cuando aparecieron los transistores de alto poder, a principios de los cincuenta, los fabricantes de las fuentes de poder tuvieron al fin a su alcance un elemento que les permitía utilizar un elemento para controlar el tiempo de activación y desactivación, el flujo de corriente pico y la iniciación de la chispa. Los transistores permitieron grandes flujos de corriente a bajos voltajes y permitieron utilizar un interruptor para cambiar la energía a desactivada y activada. Un oscilador de frecuencia variable puede ser usado para controlar la relación del cambio del transistor, como se hacía en los circuitos con tubos de vacío. Sin embargo, en los circuitos con transistores, la señal del oscilador controla no solamente la terminación del pulso, si no también el tiempo durante el cual el pulso es suministrado al electrodo y pieza de trabajo. Figura 4(f). Con este

circuito el pulso generado puede ser totalmente controlado, el oscilador algunas veces puede estar en forma de dos circuitos independientes, y permiten por lo tanto el ajuste del tiempo de activado y desactivado en forma independiente. (10,11,3)

3.4 ACABADO SUPERFICIAL Y PROPIEDADES MECANICAS

La figura 5 muestra la naturaleza de una superficie electroerosionada. A diferencia de la mayoría de las superficies maquinadas, no presenta un patrón o marcas de la dirección de maquinado, su textura es regular (fina o gruesa) debido a que durante el proceso de corte se formaron pequeños cráteres en un acomodo muy regular puesto que la descarga eléctrica es bastante uniforme en toda la superficie.

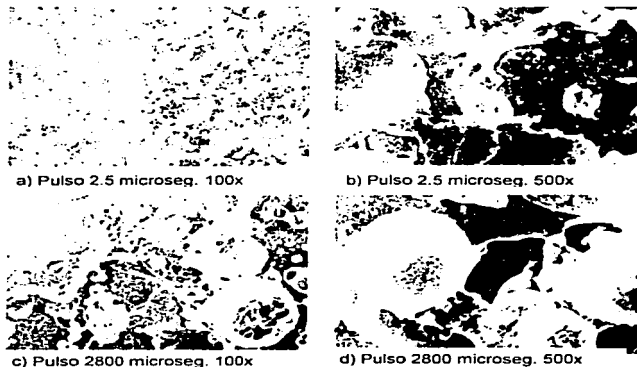


FIGURA 5

El no tener una superficie con marcas direccionales ha probado ser una de las mayores ventajas del proceso de electroerosión sobre los métodos convencionales de corte, especialmente en la fabricación de punzones y matrices en troqueles, y en corazones y cavidades en moldes. Las superficies electroerosionadas son más fáciles de pulir que las partes fresadas, taladradas, esmeriladas o torneadas. (18,214)

Las fotografías tomadas con un microscopio electrónico de barrido muestran la apariencia típica de una superficie electroerosionada, esto es, parecida a la piel de una persona atacada por viruela. Esto se debe a la formación de pequeños cráteres durante el proceso de corte, debido a las chispas producidas por el arco eléctrico.

Las cuatro fotos tomadas por el profesor asociado C.H. Kahang y A.H. Bekkala de la Universidad Tecnológica de Michigan muestran la microestructura de un acero A.I.S.I 4140 electroerosionado. En las fotografías 5a y 5b se muestran el acabado de una superficie en donde el pulso duró 2.5 microsegundos, era un ciclo corto para dar un acabado. Las fotografías 5c y 5d se muestra la superficie con un pulso de 2,800 microsegundos, un ciclo largo para un trabajo de desbaste. Ambas pruebas fueron realizadas en una máquina convencional con una corriente pico de 19 amperes. La fotografía número 1 muestra la textura característica de una superficie electroerosionada, es decir, una distribución uniforme de cráteres traslapados y la presencia de esferas de metal sólido pero que fue fundido en el proceso. En al foto 5b amplificada 5 veces más, se aprecia con más claridad la

presencia de los cráteres traslapados así como sus bordes, y además las múltiples capas de material fundido y vuelto a solidificar.

Las fotos 5b y 5c muestran el efecto de un pulso de mayor duración por más de 1000 veces, se aprecian esferas de material más grandes y fracturadas, cráteres más grandes y una capa de resolidificación más gruesa. Con una mayor amplificación se observa una serie de pequeñas fracturas.

Actualmente, las máquinas de electroerosión pueden dar acabados superficiales muy finos y en formas muy intrincadas, con la enorme ventaja de que el acabado será uniforme en toda la superficie sin importar la forma. Esta característica ha sido un punto de atención al que han puesto un especial empeño los fabricantes de máquinas de electroerosión.

Algunas de las industrias más beneficiadas con la electroerosión son: la aeronáutica y automotriz, la superficie no direccional de la electroerosión ha permitido una mejora notable en el comportamiento de los sistemas de control de flujo de combustible e inyección de mezclas en ambas industrias, pues las marcas de maquinado convencional afectaban considerablemente el control de la cantidad y dirección del flujo.

Como se mencionó anteriormente, toda la superficie expuesta al proceso de electroerosión es fundida y enfriada rápidamente. La capa resolidificada es por lo

general más dura que el material base (generalmente 0.001 pulg.), sin embargo, en algunas ocasiones llega a ser más blanda, sobre todo cuando se usan fuertes descargas para lograr velocidades de remoción altas, esto se debe principalmente a que la masa del material fundido se enfría más lentamente al utilizarse mayor energía y por períodos más largos, lo que hace que permanezca caliente más tiempo y puede llegar a ser más blanda, dependiendo por supuesto, del tipo de material en cuestión.

Cuando la superficie es más dura o más blanda se producen esfuerzos internos que pueden reducir la resistencia mecánica de la parte terminada. Cuando se utilizan pulsos de alta energía pueden conducir a fracturas "grandes", aunque en la mayoría de los casos, éstas sólo sean visibles al microscopio, generalmente se distribuyen en toda la superficie y en algunas ocasiones generan un verdadero "laberinto" de fracturas microscópicas.

Las pruebas de fatiga realizadas a partes electro erosionadas mostraron que hay fracturas en todas las superficies, aún las que fueron maquinadas con voltajes bajos. Las fracturas en la mayoría de los casos son demasiado pequeñas para ser apreciadas a simple vista, sin embargo, su presencia se hace evidente en la dramática reducción de la resistencia a la fatiga, que en algunos casos llega a ser hasta de un 25%. (20,21,6)

La capa adyacente a la capa de metal resolidificado, (usualmente de 0.001 de pulgada ó menos) conocida como capa afectada por el calor, también es calentada y enfriada, por lo que, contiene esfuerzos producto de esta variación de temperaturas tan brusca. Se supone que estos esfuerzos se concentran en los límites de grano, lo cual también reduce la resistencia a la fatiga.

Las pruebas hechas a partes electroerosionadas demuestran que el retirar la capa resolidificada se incrementa la resistencia a la fatiga en un 4.5% solamente, por otro lado, si se retira también la capa de la zona afectada por el calor, se puede recuperar hasta el 95% del valor original de la resistencia.

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACION

3.5. ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR ALAMBRE

Una máquina de corte por alambre es mucho más compleja que una máquina de penetración o vertical ya que requiere una serie de controles y dispositivos auxiliares para su funcionamiento. Primero, tiene un mecanismo de alimentación, en él se encuentra una bobina de alambre y una serie de poleas y guías que llevan al alambre a través de la máquina a la zona de corte, cuenta además con un sensor para interrumpir la descarga de energía cuando se rompe el alambre o se termina. Otro dispositivo necesario es un elemento de contacto para permitir el paso de corriente de la fuente de poder al alambre. En la zona de corte el alambre requiere de ser guiado de una manera muy precisa, por esto, se utilizan guías cuyas tolerancias dimensionales son muy cerradas y que son de material duro, generalmente de zafiro e incluso diamante. Un aspecto importante también es la tensión que debe mantener el alambre durante todo el proceso de corte, para ello un conjunto de dos motores y un mecanismo de freno se conjunta para lograr el objetivo de mantener la tensión. Figura 6.

Cuenta con un sistema de posicionamiento en los ejes X, Y, esto se hace generalmente con una mesa que se desliza sobre guías con rodamientos de rodillos cónicos para un mejor control y precisión, esta debe ser mayor que las máquinas para rectificado, normalmente su precisión oscila entre 0.0001 y 0.0002 de pulgada.

TESIS CON
FALLA DE CALIBRE

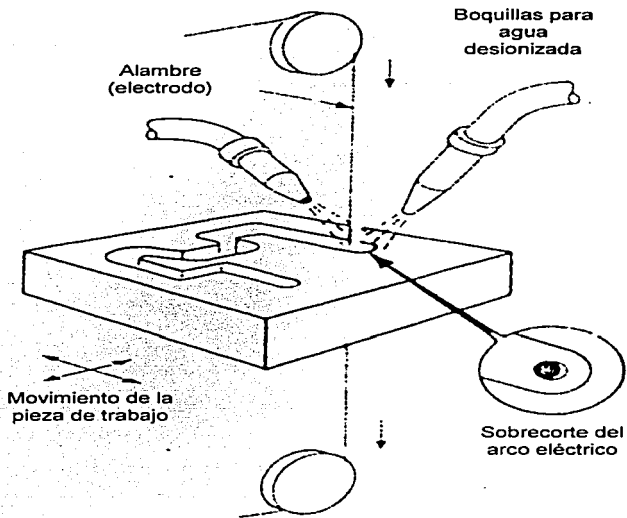


FIGURA 6

Una de las ventajas de las máquinas de corte por alambre, es la posibilidad de ser movida por servomotores que a su vez pueden ser manejados por circuitos movidos mediante computadora, es decir cuentan con un Control Numérico por Computadora (CNC). El CNC ha dado al proceso de corte por alambre una

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

versatilidad prácticamente insuperable. Es importante mencionar que actualmente, las máquinas de penetración también cuentan con movimientos controlados por computadora, y aunque sus movimientos son para cambiar de posición a la pieza de trabajo con respecto al electrodo, su precisión es también bastante alta.(13,14,15)

La sofisticación a la que se ha llegado en la actualidad, permite que algunas máquinas de electroerosión puedan tener ciclos de maquinado en los que no requieren la atención humana, es decir, pueden cambiar de posición, electrodo (en su caso), de programa e incluso de condiciones de trabajo automáticamente, aunque obviamente, esto tiene que ser programado de antemano por un operador.

FIGURA 7.



FIGURA 7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También en la programación, se tiene actualmente un auxiliar muy importante, son los sistemas de maquinado asistido por computadora CAM. Mediante estos sistemas, es posible programar: trayectorias de corte, cambios de posición, parámetros de corte y cuando se requiere, cambios de electrodo, de manera automática y muy fácilmente.^(13,26)

3.6. APLICACIONES DEL MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA

Como se mencionó anteriormente, la aplicación más generalizada del maquinado por electrodescarga es la fabricación de moldes de inyección de plástico o de inyección a presión de aluminio y zamac (o sus derivados), esto para la máquina de erosión vertical o de penetración, y fabricación de troqueles (punzones, matrices, guías, portapunzones, etc.) para la máquina de corte por alambre. Sus aplicaciones, sin embargo, son mucho más amplias y se diversifican cada vez más, en la industria eléctrica y electrónica, en la aeronáutica y espacial, en los sistemas de inyección de combustible, etc. FIGURA 8.

En la fabricación de moldes, es de gran ayuda la electroerosión por penetración ya que, gracias a la posibilidad de poder remover material en materiales endurecidos, la pieza a fabricar puede ser aproximada por maquinado convencional, tratada térmicamente, y una vez endurecida, erosionar para dar las medidas finales. Durante el proceso de acabado se pueden controlar los parámetros de corte para

que la superficie sea áspera, tersa e incluso en algunas máquinas, semi-pulido dependiendo de las necesidades de cada pieza en particular.

Las máquinas con C.N.C. cuentan con ventajas como la incorporación del quinto y sexto eje lo que les da una versatilidad prácticamente total, en este caso existe la posibilidad de realizar cortes simultáneos en cinco seis ejes cuando así se requiera. La precisión que se puede obtener con una máquina de corte por alambre en un trabajo de éste tipo puede llegar a ser de ± 0.003 milímetros. (13,23)

El campo principal de aplicación de estas máquinas es la fabricación de herramientas para la industria de la computación, aeronáutica, automotriz y electrodomésticos así como en el área de control y medición.

Por todas estas ventajas se justifica el costo superior de una máquina de corte por alambre contra una de penetración, ya que la primera ofrece una gran posibilidad de ahorrar tiempo y material, puesto que no es necesario fabricar varios electrodos para realizar un mismo trabajo, por otro lado, la rapidez con que se pueden realizar montajes y la toma de referencias para iniciar el maquinado es mayor.(24,27)

La facilidad con la que se realiza el proceso de electroerosión y el ahorro significativo en cuanto a materiales y horas hombre de trabajo han dado a éste proceso un impulso ayudado a su desarrollo. Son varias sus ventajas, aunque

también existen desventajas en el proceso, a manera de resumen se enlistan a continuación las principales ventajas y desventajas del proceso de electroerosión.

DESVENTAJAS:

- La velocidad de remoción de material todavía es baja
- Las piezas de trabajo deben ser conductoras de electricidad.
- Las superficies electroerosionadas tienen una gran cantidad de esfuerzos internos, lo que puede reducir su resistencia a la fatiga, principalmente en el proceso de penetración, aunque también se presenta en el de corte por alambre.
- Las cavidades erosionadas por penetración presentan una conicidad debida al desgaste del electrodo.
- El desgaste del electrodo puede provocar fallas en la precisión.
- Se presenta distorsión de las partes maquinadas, particularmente en las que son cortadas con erosión de alambre.

VENTAJAS.

- Se pueden cortar indistintamente metales suaves o muy duros. (23,24,27)
- La máquina no provoca cargas de maquinado al electrodo ni a la pieza de trabajo
- Se pueden cortar materiales sin importar su dureza (siendo conductores eléctricos).

- **No se producen virutas.**
- **El proceso de maquinado es automático.**
- **Se pueden cortar formas intrincadas en interiores o exteriores de las piezas según se requiera**
- **Se pueden eliminar algunas operaciones finales como el lijado ó el pulido fino.**

CAPÍTULO 4. PARTE EXPERIMENTAL

La presente investigación está enfocada al estudio de la distorsión que sufren los aceros herramienta (O1 y D2) al ser cortados por electroerosión de corte por alambre. Estos aceros se utilizan de manera muy común en la fabricación de herramientas primarios como son: troqueles, moldes, dados, formadores, etc. Se utilizan estos por la posibilidad de ser endurecidos mediante tratamiento térmico y otras propiedades mecánicas, sin embargo, es importante mencionar que no necesariamente son los mejores para todas las aplicaciones, sino que son los de uso más común, especialmente para la fabricación de troqueles de corte y embutido, en algunos casos como corazones o cavidades en moldes de inyección.

Debido a que una de sus ventajas es la posibilidad de endurecerse por medio de tratamiento térmico, se utilizan en esta condición, y debido a que pueden ser cortados mediante la electroerosión por alambre aún ya endurecidos, la práctica común es; maquinar para la preparación de la pieza, tratarla térmicamente, rectificarla a dimensiones finales (exteriores) y cortarla por electroerosión de alambre.

La intención de realizar estas actividades en ese orden es absorber la distorsión que sufren las piezas durante un tratamiento térmico, dejando un sobrematerial que será retirado en el exterior con rectificado. Al cortarlas ya tratadas se evita en buena medida la distorsión, sin embargo, como ya se explicó

anteriormente, durante el proceso de electroerosión, se generan una serie de esfuerzos internos debido a los choques térmicos y las transformaciones metalúrgicas que finalmente resultan en distorsión, siendo ese fenómeno el objeto de este trabajo. A continuación se describe el tratamiento térmico que se aplicará a cada uno de los dos aceros que se estudiaron y la forma en que se prepararon las muestras antes de aplicarles dicho tratamiento, su maquinado final y procedimiento de corte.

4.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las piezas que se utilizaron como probetas para la realización de los cortes se prepararon de la siguiente manera: partiendo de un material surtido por una casa que distribuye aceros, se maquinaron para su habilitado. Se partió de un bloque de dimensiones $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor y $2 \frac{1}{2}$ pulgadas de largo y ancho, mediante un proceso de fresado se desbastó aproximadamente 30 milésimas de pulgada por cada uno de los 6 lados del bloque, posteriormente se rectificó hasta borrar las marcas del maquinado, finalmente, se barrenaron al centro de el plano formado por las caras de $2 \frac{1}{2}$ pulgadas con una broca de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro. Es importante mencionar que durante el desbaste se emplearon profundidades de corte mínimas (0.005") para evitar la concentración de esfuerzos por maquinado, así como también durante el rectificado (0.001").

Posteriormente se aplicó el tratamiento térmico indicado para cada uno de los dos tipos de acero, tomando en cuenta las recomendaciones para cada uno de ellos. Una vez terminados los ciclos de tratamiento, se rectificaron nuevamente todas las probetas y se dejaron a las mismas dimensiones finales que fueron: espesor 11.00mm y 36.5 X 36.5mm.

Después del rectificado final, se procedió a limpiar las probetas con un solvente para eliminar grasa proveniente del líquido refrigerante que se utiliza durante el rectificado, y remover los restos e impurezas generados por el tratamiento térmico en el barreno central de cada probeta. Una vez limpias perfectamente, se les dio un proceso de desmagnetización para evitar posibles alteraciones del arco eléctrico durante el proceso de corte.

4.2 CONDICIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Se prepararon cuatro muestras de cada material para realizar cortes con cuatro tipos de condiciones, es decir, en la primera muestra se realizó un corte de desbaste, en la segunda, un corte de desbaste y uno de afinado, en la tercera, un corte de desbaste, uno de semiacabado y uno de acabado, y por último, en la cuarta, un corte de desbaste, dos de semiacabado y uno de acabado final. Se realizó esto con el fin de poder analizar el efecto de cortes múltiples en la distorsión generada en las piezas que son cortadas por electroerosión. El tamaño y la forma de la figura cortada en el interior de cada una de las muestras fue idéntica, y los parámetros

utilizados cuando los cortes se repetían, fueron los mismos, todo esto para reducir las variables introducidas durante el proceso de corte.

4.3. TRATAMIENTO TÉRMICO PARA EL ACERO O1

Para el temple del acero se utilizó un horno eléctrico tipo mufia con control digital de temperatura para lograr un mejor seguimiento del ciclo de tratamiento. Se introdujeron las 4 piezas a la cámara cuando ambas se encontraban a temperatura ambiente y de ahí se inició el calentamiento. Se realizó un precalentamiento a 650°C y se mantuvo la temperatura por 30 minutos, posteriormente se elevó la temperatura hasta 815°C y se permitió la estabilización de la cámara y las piezas, se mantuvo esta temperatura de austenitización por 45 minutos y posteriormente se procedió a enfriar las piezas en aceite desulfurado cuya temperatura era de 40 ° C.

Cuando las piezas alcanzaron una temperatura de 55°C se introdujeron a una segunda cámara cuya temperatura estaba previamente establecida en 250°C, esto para dar el revenido correspondiente

La dureza obtenida después del ciclo de tratamiento térmico fue de 58-60 Rockwell C, es importante mencionar que la dureza fue uniforme en todas las piezas y en toda la superficie.

4.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO D2

Para el tratamiento de este acero fue necesario, empacarlo con carbón para evitar la descarburización debido a las altas temperaturas que se manejan durante los ciclos de calentamiento para el temple.

Una vez hecha la preparación del empaquetado, se introdujo al horno estando ambos a temperatura ambiente, se inició el ciclo de calentamiento hasta llegar a 750°C y se mantuvo ahí durante una hora. Prosiguiendo con el ciclo de calentamiento, se llegó hasta la temperatura de austenitización que fue de 1015°C, manteniéndose ahí durante una hora, después de haber permitido la estabilización de la cámara.

Después de este periodo de permanencia las piezas (en el paquete) fueron sacadas del horno y separadas del paquete, y enfriadas con aire forzado durante 20 segundos y posteriormente se permitió que se enfriaran en aire calmado. Cuando las piezas alcanzaron la temperatura de 70°C, se introdujeron a la segunda cámara para el revenido, esta cámara estaba ya estabilizada a 538°C. Se mantuvieron en la segunda cámara durante una hora, después de ese tiempo se sacaron las piezas y se dejaron enfriar en aire calmado. Cuando las piezas llegaron a 70°C, nuevamente se introdujeron a la cámara de revenido y se volvieron a dejar ahí durante una hora, terminado esto, se sacaron nuevamente y se permitió su enfriamiento hasta temperatura ambiente. La dureza obtenida fue de 59 a 61 Rockwell C.

Los instrumentos utilizados para ambos tratamientos fueron hornos eléctricos tipo mufla con control digital y programables, pirómetro y termómetro digital con dispositivo para medir por contacto. Los materiales de empaquetamiento y los medios de temple fueron los comercialmente disponibles.

4.5. PROCESO DE CORTE DE LAS PROBETAS

El corte de las probetas se realizó en una máquina con la capacidad de ser programada y operar automáticamente, además de contar con un sistema de control de temperatura cuyo sensor está instalado en el centro de la bancada de la máquina, y que activa un enfriador al detectar un aumento en la temperatura de la misma bancada, la pieza de trabajo o fluido de enjuague (agua). Todo esto ayudó para disminuir las variables que se ven involucradas durante el proceso de corte.⁽¹³⁾

Las probetas se montaron en la máquina y se sujetaron con los dispositivos de fijación de la misma, se alineó la pieza y se tomaron las referencias correspondientes para obtener el centro en cada una de ellas, se enhebro el alambre cuya verticalidad había sido ajustada previamente y se procedió a cortar cada una de las ocho probetas. El proceso de corte se realizó de modo sumergido porque es más recomendable cuando las piezas a cortar son de un mismo espesor, es decir, no tienen protuberancias, además de que mantiene más fría a la pieza de trabajo al encontrarse esta totalmente bajo el agua.

Se realizaron cuatro cortes en cada tipo de acero, esto es, un corte con determinadas condiciones en cada probeta, y cada una de ellas fue medida posterior a cada corte para monitorear su comportamiento. Después de cada corte, la pieza era medida y anotadas sus dimensiones así como los parámetros de corte utilizados y el desempeño de la máquina en cada caso particular.

La figura que se cortó en las probetas fue un cuadrado de 20mm por lado para permitir el acceso de los instrumentos de medición que en éste caso fueron: micrómetro digital e indicador de carátula con una precisión de una diezmilésima de pulgada.

4.6. MEDICION DE LAS MUESTRAS

Para poder realizar la medición de las muestras de manera confiable se utilizó un micrómetro digital con rango de 0 a 1" y con una precisión de 0.00005", sin embargo, la medición se limitó a 0.0001" de pulgada para que los resultados sean aplicativos en condiciones reales.

La medición se realizó de la siguiente manera:

Se colocó el extremo fijo del micrómetro en la parte interna de la muestra cortada pero sobre un perno cuyo diámetro era conocido (0.125") y alineado con la dirección del corte del alambre, y la parte móvil del micrómetro sobre el exterior de la muestra.

Se tomó la lectura y solo se descontó el diámetro del perno para obtener el resultado.

La finalidad de que la medición fuera en una línea de contacto sobre la superficie cilíndrica del perno, fue evitar la interferencia de las posibles irregularidades de la superficie próxima al punto de medición

Una vez terminado el proceso de corte y el de medición se obtuvieron los resultados siguientes:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

De acuerdo a las mediciones realizadas en las probetas cortadas por alambre se generó la siguiente relación de resultados:

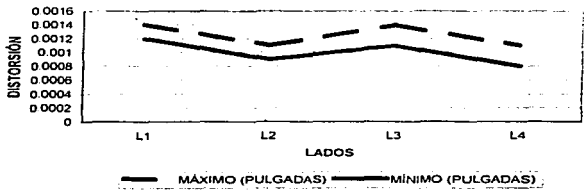
PROBETA N° 1 material: acero O1 con un solo corte con un voltaje durante el arco de 30 volts. y una corriente de 9.2 amperes, la velocidad de corte fue en promedio de 0.210 pulgadas/minuto.

Las distorsiones obtenidas fueron:

Tabla 1: O1 CON UN CORTE

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0014	0.0012
L2	0.0011	0.0009
L3	0.0014	0.0011
L4	0.0011	0.0008

TABLA 1: O1 CON UN CORTE



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

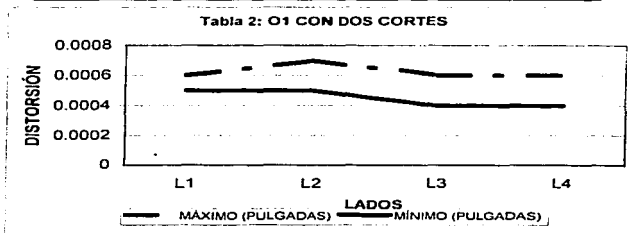
PROBETA N°2; acero O1 con dos cortes, para el primer corte el voltaje fue de 35 volts y el amperaje de 13.0 amperes con una velocidad promedio de corte de 0.235 pulgadas/minuto. Para el segundo corte, el voltaje utilizado fue de 60 volts, con un amperaje de 1.0 ampere, siendo la velocidad de corte promedio de 0.270 pulgadas/minuto.

En el primer corte las distorsiones repitieron, pero en el segundo, se obtuvieron las siguientes variaciones:

Tabla 2: O1 CON DOS CORTES

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0006	0.0005
L2	0.0007	0.0005
L3	0.0006	0.0004
L4	0.0006	0.0004

Tabla 2: O1 CON DOS CORTES



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

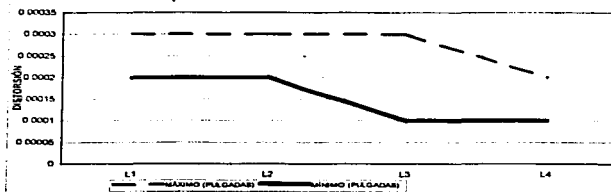
PROBETA N°3. Acero O1 con tres cortes. Durante el primero, el voltaje y amperaje utilizados fueron: 35 volts, 13.0 amperes y la velocidad de corte fue de 0.235 pulgadas/minuto, para el segundo corte se utilizaron 60 volts y 1.0 ampere y la velocidad de corte promedio fue de 0.270 pulgadas/minuto. Para el tercer corte se utilizaron 65 volts y 0.5 amperes y la velocidad de corte obtenida fue de 0.385 pulgadas/minuto.

En cuanto a las distorsiones en los primeros dos cortes realmente no se detectó una variación notable (respecto a las dos probetas anteriores) en los primeros dos cortes, sin embargo, en el tercer corte se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3: O1 CON TRES CORTES

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0003	0.0002
L2	0.0003	0.0002
L3	0.0003	0.0001
L4	0.0002	0.0001

Tabla 3: O1 CON TRES CORTES



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

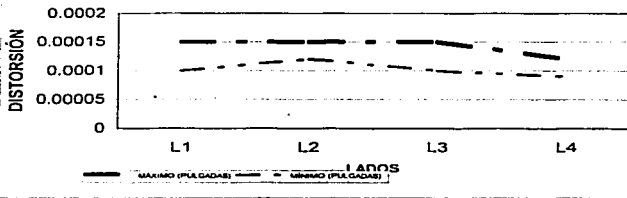
PROBETA N° 4 Acero O1 con cuatro cortes. Para el primer corte se utilizaron 35 volts y 13.0 amperes, obteniéndose una velocidad de 0.235pulgadas/minuto, para el segundo corte 60 volts y 1.0 amperes con una velocidad de 0.270 pulgadas/minuto, para la tercer pasada 65 volts y 0.5 amperes con una velocidad de 0.390 pulgadas/minuto. Para el cuarto corte se utilizaron 60 volts, 0.3 amperes y la velocidad de corte fue de 0.392 pulgadas/minuto.

Como en los casos anteriores, las distorsiones en los cortes precedentes fueron repetitivas en un rango de ± 0.0001 pulgadas, pero en el cuarto corte se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4: O1 CON CUATRO CORTES

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.00015	0.0001
L2	0.00015	0.00012
L3	0.00015	0.0001
L4	0.00012	0.00009

Tabla 4: O1 CON CUATRO CORTES



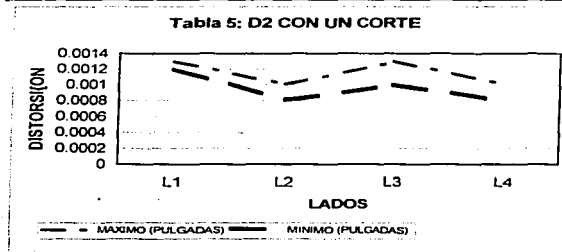
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROBETA N° 5 Acero D2, mismos valores de amperaje, voltaje que en la probeta N° 1 y con la velocidad de 0.213 pulgadas/minuto.

Tabla 5: D2 CON UN CORTE

DIMENSION	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0013	0.0012
L2	0.001	0.0008
L3	0.0013	0.001
L4	0.001	0.0008

Tabla 5: D2 CON UN CORTE



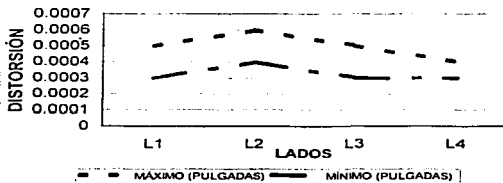
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROBETA N°6. Acero D2 ,mismos valores de voltaje y amperaje que la probeta N° 2 pero con la velocidad para el primer corte de 0,238 pulgadas/minuto y para el segundo corte de 0.272 pulgadas/minuto.

Tabla 6: D2 CON DOS CORTES

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0005	0.0003
L2	0.0006	0.0004
L3	0.0005	0.0003
L4	0.0004	0.0003

Tabla 6:D2 CON DOS CORTES



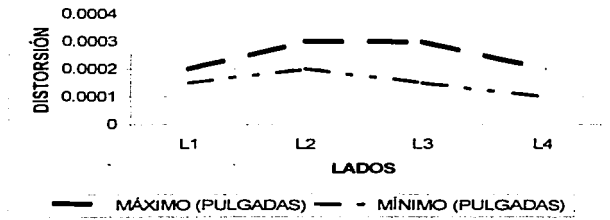
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROBETA N° 7. Acero D2 mismos valores de voltaje y amperaje que la probeta N° 3 pero con los valores de velocidad siguientes: para el primer corte 0.238, para el segundo 0.273 y para el tercero 0.389 pulgadas /minuto. Como se mencionó anteriormente, no es representativa la variación que se presentó al realizar cortes de aproximación en los que se repiten las condiciones de corte anteriores, por lo que sólo se reportan las dimensiones obtenidas en el corte final de cada probeta.

Tabla 7: D2 CON TRES CORTES

DIMENSION	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.0002	0.00015
L2	0.0003	0.0002
L3	0.0003	0.00015
L4	0.0002	0.0001

Tabla 7: D2 CON TRES CORTES



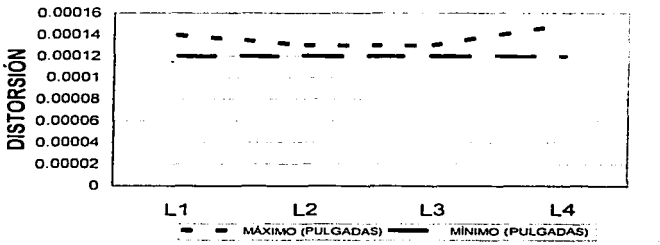
FALLA DE ORIGEN

PROBETA N° 8. Acero D2 mismas lecturas de voltaje amperaje que la probeta N° 4 pero con las siguientes velocidades: primer corte 0.238, segundo corte 0.273, tercero 0.389 y cuarto 0.395 pulgadas/minuto.

Tabla 8: D2 CON CUATRO CORTES

DIMENSIÓN	MAXIMO (PULGADAS)	MINIMO (PULGADAS)
L1	0.00014	0.00012
L2	0.00013	0.00012
L3	0.00013	0.00012
L4	0.00015	0.00012

Tabla 8: D2 CON CUATRO CORTES



Es importante mencionar que durante todos los cortes se mantuvieron iguales todas las demás posibles variantes tales como: tipo de alambre (el mismo rollo para todos los cortes), la presión de enjuague (12 Kg./cm² para el primer corte en cada probeta y 1 a 2 Kg./cm² en los siguientes en cada probeta), la velocidad de alimentación del alambre 10 m/minuto, tensión del alambre (1,800 gr), flujo de enjuague(5 a 6 lt para el primer corte y 1 a 2 lt para

los siguientes) y la resistividad del medio refrigerante que fue de 6×10^{-4} ohm por centímetro.(10)

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a lo que nos muestran las gráficas anteriores, podemos observar que la mayor distorsión se presenta al realizar el primer corte, ya que en los siguientes cortes la distorsión es menor y se va reduciendo a medida que aumenta el número de cortes.

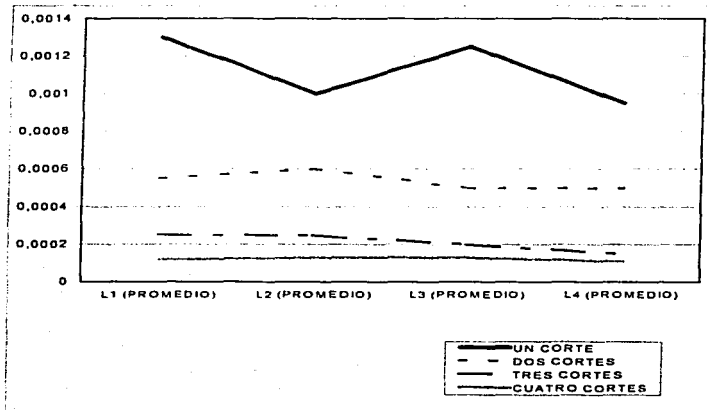
Es importante mencionar que el acero O1 sufrió una distorsión mayor que el D2 al ser cortados en condiciones similares y que este comportamiento fue constante.

La reducción de la distorsión no es proporcional a los valores de corriente aplicados durante los cortes ya que en el tercer y cuarto corte la reducción en distorsión es mínima y los valores de corriente sí sufren variación.

Para ilustrar de una manera más objetiva el comportamiento de los aceros al ser cortados por electroerosión, se muestran a continuación dos tablas con sus respectivas gráficas en las que se resume el comportamiento de cada uno de los dos aceros estudiados cuando son sometidos a uno o varios cortes. En las gráficas se indica en la tabla superior los valores obtenidos y el acero en cuestión.

RELACION DE DISTORSION V S NUMERO DE CORTES
EN ACERO O1

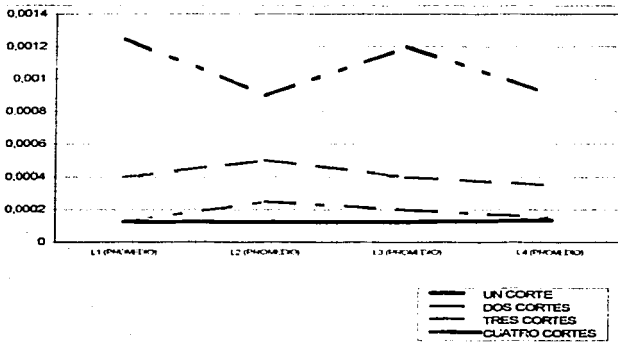
DIMENSION	L1 (PROMEDIO)	L2 (PROMEDIO)	L3 (PROMEDIO)	L4 (PROMEDIO)
UN CORTE	0,0013	0,001	0,00125	0,00095
DOS CORTES	0,00055	0,0006	0,0005	0,0005
TRES CORTES	0,00025	0,00025	0,0002	0,00015
CUATRO CORTES	0,00012	0,00013	0,00013	0,00011



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RELACION DE DISTORSION V S NUMERO DE CORTES
EN ACERO D2

DIMENSION	L1 (PROMEDIO)	L2 (PROMEDIO)	L3 (PROMEDIO)	L4 (PROMEDIO)
UN CORTE	0,00125	0,0009	0,0012	0,0009
DOS CORTES	0,0004	0,0005	0,0004	0,00035
TRES CORTES	0,000125	0,00025	0,0002	0,00015
CUATRO CORTES	0,000125	0,000125	0,000125	0,000135



FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

Los objetivos primarios de este trabajo se cubrieron de manera satisfactoria ya que se pudieron obtener muestras de los dos aceros de mayor uso en la fabricación de herramientas como troqueles y moldes y se trataron térmicamente para obtener los valores de dureza previamente estipulados.

La preparación de las muestras se realizó de acuerdo a procesos fácilmente reproducibles en una fábrica de herramientas y el corte de ellas se hizo de acuerdo a los parámetros recomendados por el fabricante de la máquina de corte por alambre obteniéndose los valores propuestos en su manual del usuario.

Después de cada corte en cada una de las probetas se pudo realizar la medición de la distorsión de una manera confiable, tomando nota de cada una de las lecturas realizando una serie de tablas y gráficas para informar de los resultados obtenidos.

Las gráficas de cada una de las muestras fueron realizadas de acuerdo a los valores obtenidos de manera individual y posteriormente se realizó una gráfica general para evidenciar aún más el comportamiento de acuerdo a las condiciones en que fueron cortadas.

Analizando los resultados podemos ver que a medida que se incrementa el número de cortes aplicados a cada pieza, se disminuye la distorsión presente en ellas, esto es debido a que en el primer corte la descarga es mayor y los esfuerzos mecánicos derivados de los choques térmicos también.

Durante la aplicación del corte inicial se aplican corrientes altas y esto provoca temperaturas elevadas y durante el enfriamiento, esfuerzos mecánicos que dan como resultado una gran distorsión, aunado a esto, está el hecho de quitar una porción de material a la muestra lo que implica pérdida de soporte mecánico provocado por la ausencia de material en el hueco generado por el corte de erosión.

Partiendo que el material está templado y revenido y que estos tratamientos térmicos generan tensiones internas en los materiales, al retirar un segmento central, es obvio que se producirá una liberación de esas tensiones internas y que por lo tanto darán como resultado una distorsión.

La presencia de todos estos fenómenos actuando de manera simultánea es lo que provoca una mayor distorsión en el corte inicial.

Al aplicar un corte adicional a las muestras, se reducen los valores de corriente aplicados en la descarga eléctrica y el tiempo de permanencia del arco eléctrico activado, dando como resultado menor temperatura y consecuentemente menores esfuerzos mecánicos, lo que resulta en menor

distorsión, por otro lado, la remoción de material es mucho menor por lo que la pérdida de soporte mecánico es mínima.

La desventaja de los valores bajos de corriente es esencialmente la baja velocidad de remoción de material que se deriva del poco poder del arco eléctrico. Por ésta razón es necesario analizar cuáles son las necesidades de tolerancias dimensionales a cubrir, y con base en ello determinar los parámetros de corte a emplear y el número de pasadas a realizar.

Para contrarrestar el efecto de la distorsión producida por los efectos físicos del corte por alambre, lo más recomendable es cortar en varias etapas las piezas de trabajo para lograr con un primer corte (desbaste) una rápida remoción de material, esto con parámetros altos en el arco, y posteriormente repasar el corte con parámetros más finos (acabado), tantas veces como se requiera, hasta lograr la precisión y acabado necesarios.

Desgraciadamente el costo del proceso de electroerosión es relativamente alto por lo que, generalmente, se opta por realizar el menor número de pasadas posible. Sin embargo, debe considerarse la cuestión dimensional y no la económica para tomar una decisión adecuada.

Para el control de la distorsión al realizar cortes con electroerosión de alambre, podemos optar por lo mencionado anteriormente (cortes en varias

etapas), ó realizar un relevado de esfuerzos a la pieza antes de dar la pasada final, o bien, al finalizar el proceso cuando se hace de un solo corte. Esto implica un mayor tiempo en el proceso y por lo tanto un costo mayor, por lo que su práctica no es tan generalizada.

Se sabe de los buenos resultados de este tipo de prácticas, sin embargo, sería necesario realizar un estudio detallado y controlado de esa opción para obtener resultados sustentables.

Con lo expuesto en el párrafo anterior queda cubierto el quinto objetivo de los planteados y se da por concluido el presente trabajo.

Es importante mencionar que durante este trabajo sólo se incluyeron dos tipos de aceros herramientas, con un tipo específico de tratamiento térmico, y por lo tanto son válidos para este tipo de condiciones. Para cada tipo de acero y tratamiento térmico, se requeriría realizar las pruebas que se describieron en la parte experimental para que los resultados sean representativos.

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, "METALS HANDBOOK NINTH EDITION, VOLUME 4, HEAT TREATING".

ASM, EUA-1981.

2. E. JULVE, P. MOLERA " DEFORMACIÓN METALICA"

CEDEL, BARCELONA-1986.

3. KARL-ERIK THELINING, "STEEL AND ITS HEAT TREATMENT".

BOFORS HANDBOOK

BUTTERWORTHS (PUBLISHERS) INC.,EUA-1974.

4. MENGES/MOHREN "HOW TO MAKE INJECTION MOLDS"

HANSER, ALEMANIA-1993.

5. G. ROBERTS R. CARY, "TOOL STEELS"

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, EUA-1980.

6. H. AVNER. "INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FISICA".

M^c-GRAW HILL, MEXICO-1974.

7. SOCIETY FOR MANUFACTURING ENGINEERS (SME) "DIE DESIGN HANDBOOK".

DAVID A. SMITH, EUA-1992.

8. GASTON CLERC. "MECANIZADO POR CHISPAS Y ELECTROEROSION" CEDEL, ESPAÑA-1990.

9. PERE MOLERA SOLA, "ELECTROMECHANIZADO: ELECTROEROSIÓN Y MECANIZADO ELECTROQUÍMICO". PRODUCTICA, ESPAÑA-1989.

10. EDWARD A. HUNTRESS, "ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING". EDM TECHNOLOGY TRANSFER, EUA-1999.

11. DEAN BRINK. "DIFERENT TYPES OF MACHINING PROCESSES THAT USE EDM". EDM TECHNOLOGY TRANSFER, EUA-1999.

12. OEWZARSKI, W.A. "INTRODUCTORY WELDING METALLURGY". AWS, EUA-1978.

13. FINE SODICK "MANUAL DEL USUARIO DE LA MAQUINA 320 AWT" SODICK ELECTRIC COMPANY, JAPON-1997.

14. JAPAX "MANUAL DEL USUARIO DE LA MAQUINA A-350 L"
JAPAX ELECTRIC COMPANY, JAPON-1980.
15. EDM TECHNOLOGY TRANSFER. "NEW TECHNOLOGY SPARK EDM"
E.D.M. TT. OREM, UT, EUA-2000.
16. EDM TECHNOLOGY TRANSFER. "E.D.M. PRINCIPLES OF
OPERATION"
E.D.M. TT. OREM, UT, EUA-2000.
17. NATIONAL HIGH MAGNETIC FIELDS LABORATORY. "ANNUAL
RESEARCH REVIEW".
LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, EUA-2001.
18. H. GERLING "ALREDEDOR DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS"
ED. REVERTE, BARCELONA-1980.
19. REED HILL "PRINCIPIOS DE METALURGIA FÍSICA".
C.E.C.S.A. SEGUNDA EDICIÓN, MÉXICO-1982.
20. HOROWITZ "SOLDADURA APLICACIONES Y PRACTICA"
ALFAOMEGA, MÉXICO-1990.

21. DAVIS-TROXELL "ENSAYE DE INSPECCION DE LOS MATERIALES EN INGENIERIA"
C.E.C.S.A., MÉXICO-1987.
22. A. ROSSEL "ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING"
EDMTT PUBLICATIONS, EUA-1999.
23. MASATADA, TETSUJI, NAOYUKY "DEVELOPMENT OF HIGH SPEED ELECTRODE FOR WIRE ELECTRODISCHARGE MACHINING"
SUMITOMO ELECTRICUSA, JAPON-2002.
24. ELECTRO DISCHARGE PROCESS "LASER MACHINERY"
ARTICULO DE JUNIO, EUA-1999.
25. METAL INDUSTRIES "METAL HEAT TREATMENT"
ARTICULO DE MAYO 2002, EUA-2002.
26. AGIE LTD "INSTALLING THAT FIRST EDM"
GARDNER PUBLICATIONS, EUA 1999.
27. INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW "WIRE EDM CUTTING OF PCD"
TECHNOLOGY UPDATE VOL 57, EUA-1997.

28. CHMER "MANUAL DEL USUARIO"

CHING HUNG & ELECTRIC INDUSTRIAL CO. LTD., TAIWAN-1998