

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE CORTE DE ALTA  
PRECISIÓN EDM Y PECM PARA ACEROS HSLA: FACTIBILIDAD DE LA  
HIBRIDACIÓN DE AMBOS SISTEMAS**

**POR**

**LUIS MARIO ZÚÑIGA ORTIZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**Saltillo, Coahuila; 23 de Septiembre del 2013**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE CORTE DE ALTA  
PRECISIÓN EDM Y PECM PARA ACEROS HSLA: FACTIBILIDAD DE LA  
HIBRIDACIÓN DE AMBOS SISTEMAS**

**POR**

**LUIS MARIO ZÚÑIGA ORTIZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**Saltillo, Coahuila; 23 de Septiembre del 2013**

# Agradecimientos

Por ayudarme a la realización de éste trabajo agradezco el apoyo de:

**CONACYT:** Por haberme brindado una beca de manutención durante todo el periodo de realización del trabajo y la estancia del caso de estudio al extranjero.

*“Lo que cuenta no es la cantidad de horas que dedicamos al trabajo, sino la calidad del trabajo que desempeñamos en esas horas”*

*Sam Ewing*

«» «» «» † † † «» «» «»

**COMIMSA:** Primero por haberme acogido como un estudiante más de la especialidad en soldadura, en segundo lugar por todos los apoyos brindados para poder concluir mi trabajo.

*“El modo de alcanzar el éxito es: 1º Tener una idea clara y práctica (una meta), 2º Tener y poner los medios para lograr sus fines (inteligencia, entusiasmo) 3º Aplicar todos sus medios a tal fin”*

*Anónimo*

«» «» «» † † † «» «» «»

**Dr. Héctor Hernández:** Quien fue mi tutor académico, a él le corresponde gran parte del crédito de éste trabajo, por el tiempo que invirtió en guiarme en el camino y sus asesorías, pero sobretodo agradezco su gran paciencia a lo largo de un año.

*“El conocimiento se aprende por medio del estudio. La sabiduría por medio de la observación”*

*F. López*

«» «» «» † † † «» «» «»

**Dr. Arturo Reyes:** Coordinador de posgrado COMIMSA-CONACYT, por velar en los intereses de los estudiantes y gestionar los apoyos necesarios durante todo el posgrado. Gracias por hacerme parte de la historia de COMIMSA.

*“No es grande el que siempre triunfa, sino el que jamás se desalienta”*

*Martín Descalzo*

«» «» «» † † † «» «» «»

**El personal que integra la gerencia de desarrollo humano:** a todas esas personas maravillosas que me permitieron la oportunidad de conocernos y contribuyeron directa e indirectamente a realizar e integrar el presente documento. Gracias por su paciencia y amistad.

*“Un amigo es la persona que nos marca un rumbo y recorre con nosotros una parte del mismo”*

*Francisco Alberoni*

«» «» «» † † † «» «» «»

**UNIFE:** Primero por haberme aceptado para la realización de mi caso de estudio y por último a todas las personas que estuvieron involucradas en él y el apoyo que se me brindo.

*“Sigue adelante. El próximo esfuerzo te dará nuevas alegrías”*

*M.J. Márquez*

«» «» «» † † † «» «» «»

**Mis Padres:** contribuyeron de forma indirecta, pero su apoyo fue de gran importancia para concluir éste trabajo. Gracias por estar siempre a mi lado y ser ese motor que me impulsa a superarme día a día, son mi ejemplo a seguir. De todo corazón, mil gracias.

*“Dicen que el padre que ama a sus hijos es el hombre que se ha convertido en papá.”*

*Anónimo*

*“Una madre tiene algo de Dios y mucho de ángel.”*

*Jose Fernández del Cacho*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A Dios,** doy gracias por todas las bendiciones que me brinda: vida, salud, inteligencia, familia, amistades, por darme la fuerza y la fe para seguir por un futuro incierto que va a ser la historia de mi vida, le agradezco por cada etapa superada en ella.

*“Enhorabuena por este otro peldaño que has alcanzado con la ayuda de Dios, Dios te guarde y te de la sabiduría para tomar las mejores decisiones de tu vida”*

*Anónimo*

«» «» «» † † † «» «» «»

# Dedicatorias

Le dedico con todo mi amor y cariño el fruto del esfuerzo y perseverancia, reflejado en mi documento terminado:

**A ti Dios** que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia tan maravillosa como la mía, por permitirme llegar a este momento de mi vida, por los triunfos y las dificultades en el camino que me han enseñado a valorarte.

*“Las grandes obras son hechas no con la fuerza, sino con la perseverancia.”*

*Samuel Johnson*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A mis padres**, que son las personas más maravillosas que me han acompañado durante toda mi trayectoria estudiantil y de mi vida. Este es el reflejo del sacrificio que han hecho. De cada uno de mis triunfos se los dedico a mi mamá y a mi papá. Si he logrado ser la persona que soy es gracias a ustedes. Los quiero mucho.

*“Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar.”*

*Nelson Mandela*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A mis hermanos Leonel, Joshua, y Karla**, que son esa parte divertida que requiere esta vida para no tomarse todo con seriedad. Sepan que los estimo y los quiero mucho.

*La felicidad es una bendición, pero generalmente es también una conquista.*

*Paulo Coelho*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A Fernanda, Fabiola y Mariana**, son mis tres solecitos, las conozco desde que nacieron y les he tomado un gran cariño a cada una. Tal vez no nos veamos muy seguido pero pienso en ustedes y les deseo que lleguen tan lejos como se lo propongan.

*“El 80% del éxito se basa simplemente en insistir”.*

*Woody Allen*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A todos mis familiares**, quisiera nombrarlos a cada uno de ustedes pero son varios. Les estoy completamente agradecido por formar parte de esta familia pequeña.

*“El honor más grande aún no se ha otorgado, la carrera más dura aún no ha comenzado. No basta con soñarlo, hay que echarle manos a la obra, luchar hasta conseguir el éxito de nuestro presente. Nunca es tarde... Enhorabuena”*

*G.M. Quirós*

«» «» «» † † † «» «» «»

**A mis amigos Francisco y Miguel,** que son como una segunda familia que se tiene la oportunidad de elegir. Hemos llegado hasta donde nos lo hemos propuesto, el camino es largo y con senderos apartados, pero no por eso dejaremos de ser como hermanos. Los estimo mucho.

*“Un hombre tiene que escoger. En esto reside su fuerza: en el poder de sus decisiones.”*

Paulo Coelho

«» «» «» † † † «» «» «»

**A Laura Hernández,** eres una persona maravillosa, qué más puedo decirte que no sepas, sé que estamos lejos uno del otro pero no quiere decir que estemos distanciados. Te adoro mucho.

*“Una persona predestinada es la que construye un sólido edificio, con los ladrillos que le van tirando los que quieren voltearlo”*

David Brinkley

«» «» «» † † † «» «» «»

Dejo otras frases de reflexión sencillas pero que son un hecho aunque a veces no nos demos cuenta.

*Un proyecto mal planeado se lleva tres veces el tiempo estimado para terminarse, uno bien planeado tomará solamente el doble.*

*Cuando encuentres la solución, el problema ya no existirá.*

*Robar una idea a una persona es plagio; robárselas a muchas es investigación.*

*Ningún experimento es nunca un completo fracaso, puede servir como un mal ejemplo.*

Leyes de Murphy

«» «» «» † † † «» «» «»

*Si algo tiene la posibilidad de salir mal, saldrá mal.*

Edward A. Murphy Jr.

«» «» «» † † † «» «» «»

# Contenido

SÍNTESIS	1
<hr/>	
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	2
<hr/>	
<b>1.1 ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>6</b>
<b>1.5 APORTACIÓN TECNOLÓGICA</b>	<b>7</b>
<b>1.6 ALCANCE</b>	<b>7</b>
<hr/>	
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
<hr/>	
<b>2.1 PROCESOS DE UNIÓN</b>	<b>8</b>
2.1.1 SUJETADORES MECÁNICOS	9
2.1.1.1 Sujetadores roscados	9
2.1.1.2 Remaches	10
2.1.2 CRITERIO DE EVALUACIÓN, FUNCIONES Y REQUISITOS DE DISEÑO DE UNIÓN DE MATERIALES	12
<b>2.2 ACEROS HSLA</b>	<b>13</b>
2.2.1 DEFINICIÓN	14
2.2.2 PROPIEDADES	15
2.2.3 METALURGIA DE LOS ACEROS HSLA	18
2.2.3.1 Tamaño de grano en las propiedades	19
2.2.3.2 Mecanismos de endurecimiento	22
2.2.4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN ACEROS HSLA	25
<b>2.3 MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA (EDM)</b>	<b>27</b>
2.3.1 INTRODUCCIÓN	27
2.3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	29

2.3.3 VARIACIONES DEL PROCESO	32
2.3.3.1 Maquinado por electrodescargas por hilo.	32
2.3.3.2 Maquinado por electrodescargas por estampado	33
2.3.3.3 Micro-maquinado por electrodescargas	34
2.3.3.4 Comparación entre el electromaquinado por estampado y micro-maquinado por electrodescargas	34
2.3.4 PARÁMETROS DEL PROCESO EDM	38
2.3.4.1 Efectos de los parámetros de los procesos EDM	39
2.3.4.2 Zona afectada térmicamente (ZAT), y material fundido	45
2.3.4.3 Razón de desgaste del electrodo	51
2.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO EDM	56
2.3.6 COMPONENTES FÍSICOS DE LA MÁQUINA DE EDM	57
<b>2.4. MAQUINADO ELECTROQUÍMICO (ECM)</b>	<b>59</b>
2.4.1 INTRODUCCIÓN	59
2.4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	60
2.4.3 VARIACIONES DEL PROCESO	62
2.4.3.1 Maquinado electroquímico pulsado (PECM)	62
2.4.3.2 Micro maquinado electroquímico (EMM)	62
2.4.4 PARÁMETROS DEL PROCESO DEL ECM	62
2.4.4.1 Efectos de los parámetros del proceso ECM y PECM	64
2.4.5 VENTAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO ECM	71
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE LA BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>72</b>
<b>3.1 PROCESO DE ELECTROEROSIÓN Y MAQUINADO ELECTROQUÍMICO.</b>	<b>72</b>
<b>3.2 EFECTOS DEL EDM Y ECM EN EL MATERIAL MAQUINADO</b>	<b>74</b>
<b>3.3 FACTIBILIDAD DE HIBRIDACIÓN</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO</b>	<b>77</b>
<b>4.1 METODOLOGÍA</b>	<b>77</b>
4.1.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES, EQUIPO Y CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	79
4.1.1.1 Material	79

4.1.1.2 Equipo	79
4.1.1.3 Caracterización de las muestras antes del corte con el W-EDM	80
4.1.2 PROCESO DE CORTE POR EDM	81
4.1.3 EVALUACIÓN DE LAS ZONAS DE CORTE	82
4.1.3.1 Caracterización de las muestras después del corte	82
4.1.3.2 Ensayo de microdureza	83
4.1.3.3 Microscopia óptica y de barrido electrónico	83
<b>4.2 RESULTADOS Y DISCUSIONES DEL CASO DE ESTUDIO</b>	<b>83</b>
4.2.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DEL CORTE CON EL W-EDM	84
4.2.2 RESULTADOS DE PERFILES DE RUGOSIDAD Y MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LOS ACEROS HSLA, TRIP Y DP-600	87
4.2.3 DESCRIPCIÓN DEL EFECTO DEL CORTE POR ALAMBRE DE ACEROS: HSLA, TRIP Y DP-600.	90
4.2.4 PERFIL DE MICRODUREZAS SOBRE SUPERFICIES DE ACEROS HSLA, TRIP Y DP-600 CORTADOS POR EL PROCESO W-EDM.	96
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>5.1 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE DEL EDM Y ECM</b>	<b>98</b>
<b>5.2 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>100</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>104</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>105</b>
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	<b>108</b>

# SÍNTESIS

En la actualidad existen muchas maneras de realizar cortes o perforaciones sobre los materiales, los cuales se pueden clasificar en dos grupos: 1) los convencionales y 2) los no convencionales. Dentro de este último se encuentran los procesos de corte con láser, electroerosión, electroquímico y haz de alta energía, los cuales son empleados para dar forma a dados herramientales, piezas con alto grado de complejidad y a materiales con alta dureza.

En el presente trabajo monográfico se muestra una recopilación de información acerca de los procesos de corte no convencionales de electroerosión y electroquímico, así como su principio de funcionamiento y los efectos que tienen sobre el material.

Además se presenta un caso de estudio en el capítulo 4, en el cual se compara tres tipos de aceros al ser cortados con el proceso de electroerosión por hilo, se evalúa la superficie de corte de cada uno de los aceros con microscopía óptica y de barrido electrónico.

El final del trabajo se presentan los resultados del caso de estudio y conclusiones del estudio del arte de los procesos de corte por electroerosión y electroquímico.

# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Hoy en día la industria automotriz desarrolla vehículos de alto desempeño, empleando materiales de última generación, como los aceros de alta resistencia y aceros tratados térmicamente. Al utilizar este tipo de materiales se reduce el peso del vehículo, de esa manera se logra consumir menos combustible y ser más eficientes con este.

Al emplear aceros que tienen altas propiedades mecánicas se torna difícil maquinarlos, debido a que algunos procesos de maquinado logran alterar las propiedades mecánicas del material y no siempre se busca tal objetivo.

La mayoría de los procesos convencionales de maquinado quitan material produciendo virutas u otros lo hacen mediante abrasión. En ocasiones existen casos en que estos procesos y los acabados no pueden satisfacer los requerimientos o simplemente no son posibles por alguna de las siguientes causas:

- El material tiene una elevada dureza o resistencia, convirtiéndolo en un material demasiado frágil
- La pieza es demasiado flexible o resulta difícil sujetar las partes
- Por la forma compleja de la pieza
- La exigencia del acabado superficial y la tolerancia dimensional es muy cerrada
- Las distorsiones no deseadas se producen debido al incremento de la temperatura y los esfuerzos residuales en la pieza.

Dada la necesidad de cubrir los puntos antes mencionados con procesos de manufactura, se desarrollaron formas de maquinados no convencionales que ofrecen mayores ventajas técnicas y económicas que los convencionales, satisfaciendo con ello los requerimientos de la industria con el desarrollo y uso de nuevos materiales.

Los procesos no convencionales ya no se basan en el arranque de virutas, sino en la remoción del material por medio de disolución química, descargas eléctricas anódicas controladas o por la fusión o evaporación del material; estos principios no son nuevos pero tienen gran importancia en la industria debido a que se caracterizan por ser independientes de la dureza del material y, no afectan en gran medida las propiedades mecánicas de las piezas a maquinar.

Es así que se emplean los procesos no convencionales para maquinar piezas tratadas térmicamente o con una alta dureza, evitando así los problemas de distorsión y de cambios dimensionales que son parte de los efectos de los tratamientos térmicos. Las piezas manufacturadas por estos medios no convencionales suelen ser trabajadas a temperatura ambiente sin afectar la microestructura.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Analizar el estado del arte de las técnicas de remoción de material de alta precisión encontrado en la bibliografía acerca de los sistemas de maquinado electro-químico pulsado (PECM por sus siglas en inglés), maquinado por electro-descarga (EDM por sus siglas en inglés) y sistemas híbridos de maquinado con estos dos principios como base del proceso.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Recopilar información sobre el corte de aceros microaleados de alta resistencia previo a los procesos de unión.

Buscar información que describa los principios del funcionamiento de los procesos PECM, EDM, así como la factibilidad de hibridar ambos procesos.

Analizar los parámetros de corte del material y velocidad de los procesos PECM y EDM.

Comparar la información del comportamiento de desgaste del electrodo y la pieza de trabajo dentro de la bibliografía

Realizar un caso de estudio de análisis comparativo de corte por EDM en aceros de baja aleación y alta resistencia, aceros de doble fase y aceros de transformación inducida mediante plasticidad (HSLA, DP y TRIP por siglas en inglés respectivamente).

### **1.3 Justificación**

En el documento pretende identificar los efectos en los materiales cortados con los procesos de electromaquinado, además de los parámetros que permitan hibridar un sistema de corte. La implementación de la tecnología de hibridación de electro-erosionado es factible para algunos procesos de soldadura dentro del ramo automotriz, minimizando los costos de remoción de material para la unión de componentes de aceros sin afectar las propiedades mecánicas. Además, implica reducir el tiempo de perforación o remoción de soldadura de aceros micro-aleados: HSLA. Así mismo, optimizando los recursos energéticos para disminuir gastos por operación.

Comparativamente, el corte por rayo láser en los aceros que cuentan con tratamientos térmicos, involucra cambios microestructurales adyacentes al corte. La alta concentración de energía logra evaporar y remover el material, alterando su microestructura, por ende es susceptible a un tratamiento térmico en la zona afectada por el corte para restablecer las propiedades mecánicas. En contraste, la tecnología del maquinado por electro-erosión, la remoción del material se lleva a cabo sin afectar considerablemente al material térmicamente en los alrededores durante la remoción; de esta manera no se ven afectadas las propiedades mecánicas de la pieza. En consecuencia, esta tecnología ofrece y se convierte en una opción viable.

## 1.4 Planteamiento del problema

En la industria automotriz se requiere un sistema de remoción de alta precisión y alta velocidad, capaz de realizar perforaciones mediante una máquina de corte, sin afectar las propiedades mecánicas del material.

Antes del proceso de corte, los largueros de acero de alta resistencia (HSLA) son tratados térmicamente, es por eso que se evitan cortarlos con métodos que generen calentamiento local alrededor de la perforación del acero. Esto implica revisar el estado del arte sobre un proceso de electromaquinado con el objetivo de considerar dos aspectos:

1) evitar cambios microestructurales que disminuyan las propiedades mecánicas en la perforación del acero.

2) realizar operaciones de remoción de material con mayor rapidez. A fin de unirlos con ensambles mecánicos (tornillos, remaches, etc.).

En base a lo anterior, dado el problema de maquinar aceros HSLA con un bajo costo de operación. Se analiza la factibilidad de hibridar un equipo que logre combinar los principios de voltaje pulsado (PECM) y el electro-erosionado (EDM). Considerando la generación de un ciclo de maquinado de disolución anódica para acelerar la velocidad de remoción de material y combinar una alta precisión. Es relevante mencionar, que la remoción de material por medio de ataques electroquímicos no involucra cambios significativos en la microestructura, por lo tanto, las propiedades mecánicas del material no son afectadas.

## 1.5 Aportación tecnológica

Mediante el análisis de la bibliografía se **establece** la viabilidad de la hibridación de los procesos PECM con EDM. **Estableciendo** sistemas que combinen alta velocidad de remoción del material en aceros de alta resistencia y baja aleación.

## 1.6 Alcance

Revisión sobre el estado del arte en artículos científicos y técnicos de los sistemas de remoción de material. Tomando en cuenta la energía eléctrica y química como herramientas de corte. Así, determinar la factibilidad de hibridar los procesos del EDM y PECM. Finalmente, realizar un caso de estudio que permita evaluar la técnica EDM en aceros HSLA, DP y TRIP.

# **CAPÍTULO 2:**

## **MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Procesos de unión**

En los procesos de manufactura se elaboran productos que son empleados principalmente en la ingeniería civil, automotriz, marítima y aeroespacial. Algunos de estos son ensamblados en un producto final: estructuras, suspensiones, carcasas, fuselajes, etc. Esto establece, que el tipo de servicio del componente define el proceso de ensamble permanente o desmontable. En base a lo anterior, los procesos de unión se clasifican de la siguiente manera. (1):

- Sujetadores mecánicos
- Enlace con adhesivos
- Soldadura blanda
- Soldadura fuerte y con metal de aporte.

Por otro lado, la unión es un término genérico que cubre los procesos antes mencionados. Estos son partes importantes en las operaciones de manufactura, debido a que sería difícil y costoso un producto de una sola pieza muy intrincada en su forma.

En contraste, es más económico elaborar productos en secciones y unirlos, además, la producción de componentes en secciones permite facilitar el traslado de éstos al cliente, evitando enviar el conjunto completo (2).

### **2.1.1 Sujetadores mecánicos**

Existen muchos sistemas y componentes de sujeción mecánica para unir diferentes piezas y materiales. Entre estos se incluyen los sistemas de sujetadores: roscados, clavos y grapas, remaches, chavetas y seguros, prensado, engarce y otras formas de sujeción especial.

#### **2.1.1.1 Sujetadores roscados**

Los sujetadores roscados: tornillos, pernos y tuercas se emplean en la mayor parte de los ensambles mecánicos. Todos los sujetadores roscados se basan en el principio mecánico del plano inclinado: Transmitir presión a las partes que se han de ensamblar.

Estos sistemas de unión soportan grandes cargas. Existiendo una amplia variedad de tamaños y materiales diseñados para satisfacer muchas aplicaciones de sujeción especiales.

En el caso de los pernos, se diseñan mediante una conjunción perno-tuerca. Bajo este sistema de unión, el material unido queda comprimido entre la tuerca y la cabeza del perno.

Los pernos que cuentan con todo el vástago roscado, llamados tornillos de tapa. Se diseñan para atornillar en hoyos terrajados y, las partes que se unen quedan entre la cabeza del perno y el material base.

Los tornillos de máquina son similares a los pernos. Usualmente de menor tamaño. Comparativamente, tienen el mismo principio de sujeción y aplicación que los pernos y tuercas. Sin embargo, los tornillos para lámina metálica se fabrican con rosca burda y se diseñan para unir materiales delgados. En este caso, todos los sujetadores roscados tienen características que les permiten asegurarse con herramientas diversas (llaves mecánicas y desarmadores).

#### ***2.1.1.1 Ventajas y desventajas***

Las ventajas de las uniones con sujetadores roscados incluyen la posibilidad de desensamblar. Además, presentan una amplia gama de tamaños y tipos. Esto hace al sistema extremadamente versátil.

Incluyen una labor intensiva de ensamble. En algunas ocasiones las roscas de los pernos y tornillos se dañan con facilidad. Resultando difícil o imposible el ensamble o el desensamble. Los sujetadores roscados requieren perforaciones terrajadas o punzonadas en la pieza de trabajo antes de ensamblar o unir los materiales.

#### ***2.1.1.2 Remaches***

Los remaches son un sistema de unión mecánica común y versátil. El uso de remaches se emplea para unir desde estructuras de acero pesadas hasta hojas metálicas ligeras.

En la industria aeronáutica, las condiciones aerodinámicas sugieren que sobresalga muy poco la cabeza del sujetador por encima de la superficie de las hojas metálicas. Así mismo, se reduce en gran medida la fricción del aire sobre las superficies.

Con respecto a las estructuras remachadas, se unen en la fabricación de armazones para obtener uniones fuertes y de bajo peso. Bajo éstas condiciones, los remaches son muy adecuados para soportar cargas dinámicas. Evitándose el desajuste y debilitamiento en la unión por distorsión.

#### **2.1.1.2.1 Ventajas y desventajas**

El remachado de piezas metálicas ofrece una alta resistencia en la unión. Empleando un sujetador de tamaño mínimo. Por otra parte, tiene la capacidad para unir materiales introduciendo y fijando el sujetador sólo por un lado del ensamble.

Requiere de un trabajo intenso en la instalación debido a la necesidad de tener hoyos punzonados o perforados, previamente. La mayoría de los remaches tienen que taladrarse o esmerilarse para separarlo del ensamble, así como el uso de un remache nuevo en cada operación de remoción. (2)

El agujero es una discontinuidad en la estructura aumentando la susceptibilidad de falla por fatiga. En aplicaciones más críticas de diseño y servicio, se requiere remover las rebabas para eliminar los concentradores de esfuerzos. Debido a lo anterior, el uso del remachado ha estado disminuyendo su aplicación en la ingeniería civil y en la manufactura de bastidores de aviones. No obstante, aún tienen gran importancia en los remachados de los aeroplanos. (3)

## **2.1.2 Criterio de evaluación, funciones y requisitos de diseño de unión de materiales**

Las funciones del componente indican el tipo y diseño de unión. Mediante cálculos ingenieriles se establecen criterios como: cargas, tipos de uniones entre dos elementos (materiales disímiles o no), ambientes (secos, húmedos, ácidos, salinos, etc.) entre otros. De esta manera se evalúa cada parámetro de entrada para satisfacer los requerimientos de servicio, no sólo de la unión sino del componente en su totalidad.

Los criterios de evaluación determinan las características deseables en un diseño de unión. Permitiendo coadyuvar a la selección del método de unión satisfactorio. Considerando que maximice las ventajas y minimice las desventajas.

Lo anterior implica satisfacer los requisitos y funciones de la unión. A partir de la evaluación crítica completa de las propiedades deseables. A continuación se mencionan los factores que se consideran en el proceso de unión:

- a. Aplicación
- b. Diseño de la unión
- c. Materiales que intervienen
- d. Dimensiones y formas de los componentes a unir

La selección de las uniones se debe de adecuar a los componentes empleados para conjuntarlos y lograr una función adecuada y segura. Naturalmente, los componentes de ensamble deben acoplarse bien entre sí y funcionar en forma eficiente. (4)

## 2.2 Aceros HSLA

Los aceros microaleados conocidos como de alta resistencia y baja aleación, proveen un incremento de resistencia contra el factor peso, por un mínimo incremento en el costo de elaboración.

La razón por la cual los aceros HSLA han llegado a tener una gran importancia en la industria automotriz. Debido a su alta resistencia mecánica con respecto a los aceros convencionales. Por lo que éstos pueden ser utilizados en secciones más delgadas realizando el mismo desempeño mecánico requerido, haciéndolos particularmente más atractivos para los equipos de transportación en donde la reducción de peso es importante. Como se muestra en la Figura 2. 1 se muestra que a menor resistencia los aceros cuentan con más maleabilidad y conforme aumenta la resistencia decae la maleabilidad.

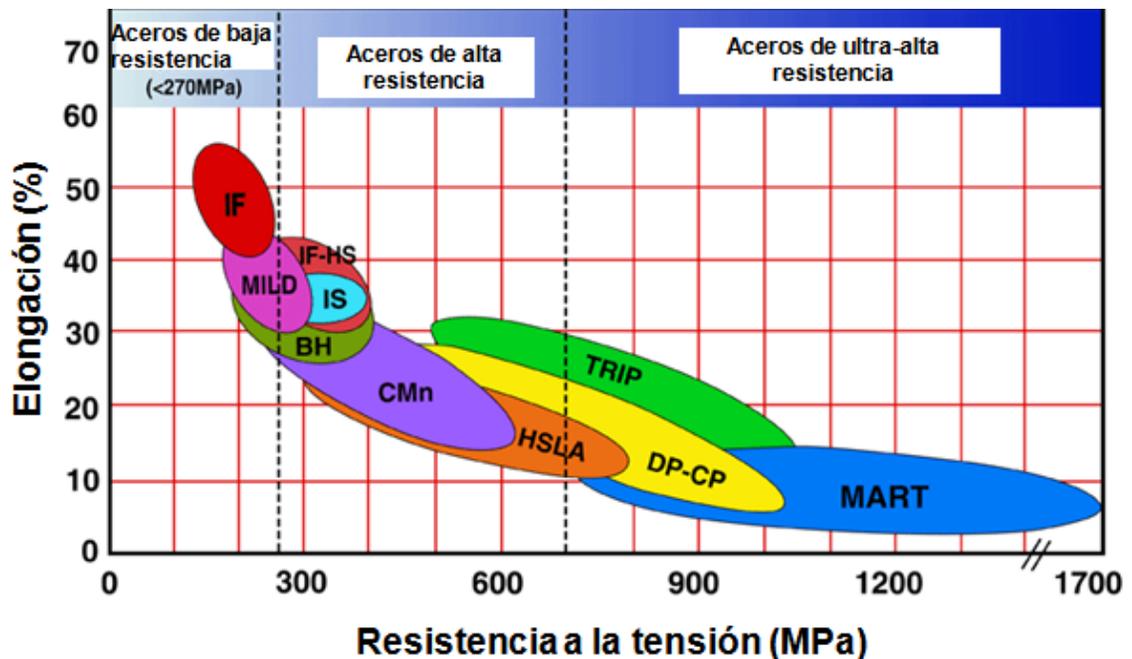


Figura 2. 1 Gráfica de la resistencia a la tracción y de la deformabilidad de diferentes tipos de aceros de baja, alta y ultra alta resistencia (31)

Los aceros HSLA son diseñados para proporcionar mejores propiedades mecánicas que un acero convencional. Estos son designados para cumplir con propiedades mecánicas específicas. La composición química de un acero HSLA puede variar, dependiendo del espesor de la lámina para cumplir con los requerimientos solicitados. (5)

### 2.2.1 Definición

Los aceros HSLA son un grupo de aceros de bajo contenido de carbono (0.05 a 0.2 % e.p) que utilizan pequeñas cantidades de elementos aleantes, también denominados microaleados, con una cantidad menor del 0.1% de aleantes tales como Nb, V, Ti, 0.6 a 1.6 % e.p. de Mn, aunque algunos otros elementos tales como Cu, Ni, Cr, y Mo están presentes en pequeñas cantidades alrededor de 0.1 % (Tabla 2. 1), con los cuales se logran generar unas características de gran resistencia mecánica, para obtener esfuerzos de fluencia mayores que 275 MPa en las condición de laminados o normalizados, y resistencia a la corrosión. (6)

**Tabla 2. 1 Composición química representativa de los aceros HSLA y dos ejemplos (A633 grado E y A656) (7)**

Número ASTM	Límites de Composición ( % )									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	V	OTROS
Composición representativa	0.05-0.25	0.6-1.6	...	...	...	≈ 0.1	≈ 0.1	≈ 0.1	< 0.1	< 0.1 de Nb, Ti
A633 grado E	0.22	1.15-1.50	0.04	0.05	0.15-0.50	...	...	...	0.04	0.01-0.05 Nb, 0.01-0.03 N
A656	0.18	1.65	0.025	0.035	0.6	...	...	...	0.005-0.15	0.02 N, 0.005-0.10 Nb

La función principal de los elementos aleantes en estos aceros, es de contribuir al endurecimiento de la ferrita. Además, el aumento de la tenacidad de estos aceros es por medio del refinamiento de grano austenítico. Debido a la formación de granos finos de ferrita y colonias de perlita durante la transformación de fases por enfriamiento.

Otra forma de endurecimiento es por precipitación y endurecimiento por solución sólida. Este último está ligado ampliamente a los contenidos de aleación. Mientras que los efectos antes mencionados a este, dependen de los efectos del complejo diseño de aleación y de los tratamientos termomecánicos.  
(6) (8)

### **2.2.2 Propiedades**

Los aceros HSLA son diseñados para mejorar las propiedades mecánicas comparada con las de un acero convencional, la composición química de un acero HSLA puede variar, dependiendo del espesor de la lámina para cumplir con los requerimientos mecánicos.

Por otro lado, los aceros HSLA tienen una buena formabilidad y soldabilidad, sin embargo, se requiere mayor energía de deformación para las partes complejas. Debido a que pose un valor de cedencia mayor a los convencionales, requiriendo más energía casi alrededor del 30% para su formabilidad. En la Tabla 2. 2 se muestran las propiedades mecánicas de dos aceros junto con sus aplicaciones.

**Tabla 2. 2 Propiedades mecánicas de límite elástico y resistencia de aceros HSLA y sus aplicaciones (7)**

Número ASTM	Resistencia a la tracción	Límite Elástico	Ductilidad (% Elg. En 2 plg.)	Aplicaciones
A633 grado E	520 Mpa	380 Mpa	23	Estructuras utilizadas a bajas temperaturas
A656	655 Mpa	552MPa	15	Bastidores de camiones y vagones de tren

Los aceros HSLA empleados en la carrocería de vehículos son más resistentes debido a su características microestructurales, aunado con la buena resistencia a la fatiga debido a su alta resistencia a la cedencia, por estas razones los aceros HSLA son buenos candidatos como aceros estructurales, lo que los hace una buena opción para emplearlos en la industria automotriz. (5)

Los aceros HSLA son principalmente laminados en caliente en las formas de productos forjados (chapas, láminas, barras, planchas y secciones estructurales) con microestructura de ferrita y perlita. Las excepciones son aquellos aceros con microestructuras de ferrita acicular y los de doble fase los cuales utilizan la formación de una estructura mixta para su endurecimiento, mientras que los aceros ferríticos perlíticos generalmente requieren del endurecimiento de ferrita. (9)

Los aceros de alta resistencia y baja aleación se clasifican en distintas normas y poseen distintos grados diseñados para proporcionar combinaciones específicas de propiedades tales como esfuerzo, tenacidad, deformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Estos acero se clasifican como categoría separada, la cual es similar al acero de medio carbono laminado con propiedades mecánicas acrecentadas obtenidas mediante la pequeña adición de aleantes y quizás las técnicas especiales de procesos tales como la laminación con enfriamiento controlado, enfriamiento acelerado, etc.

Las propiedades mecánicas pueden incrementarse y mejorar la microestructura mediante la adición de manganeso y silicio, de igual forma usando pequeñas cantidades de elementos aleantes como el niobio y el vanadio se puede incrementar el esfuerzo del acero laminado en caliente sin aumentar el contenido de carbono y/o manganeso. Estos aleantes en cantidades menores al 0.10% fortalecen los aceros estándar al carbono-manganeso sin interferir en sus procesos. Entonces el contenido de carbono puede ser reducido para mejorar la soldabilidad y la tenacidad debido a los efectos fortalecedores del niobio y vanadio compensados por la reducción en el esfuerzo debido a la reducción del contenido de carbono. Reportes en la literatura (8), establecen métodos de endurecimiento que se describen a continuación:

**Laminación controlada:** De endurecimiento por precipitación de los aceros HSLA para obtener un grano austenítico fino y grano austenítico altamente deformado. Esto produce que el enfriamiento se transforme en granos ferríticos finos que mejora la tenacidad y el esfuerzo de fluencia.

**Enfriamiento acelerado:** En los aceros HSLA de laminación controlada para producir un grano ferrítico fino durante la transformación de la austenita, con este método de laminado con enfriamiento controlado resulta en una mejora en la tenacidad y en los esfuerzos de fluencia, de 345 a 600 MPa. (10)

En resumen el alto esfuerzo de fluencia se alcanza a través del efecto combinado del tamaño de grano fino desarrollado durante el laminado en caliente controlado y el endurecimiento por precipitación debida a la presencia del vanadio, niobio y titanio. (10)

### **2.2.3 Metalurgia de los aceros HSLA**

Antes de iniciar con la descripción de los procesos de corte. Es indispensable conocer los aspectos metalúrgicos de los aceros HSLA. Con el fin de conceptualizar apropiadamente el problema de corte de acero o remoción de soldadura por procesos de sublimación de material.

La mayoría de los aceros HSLA son conformados en caliente como subproductos laminados con microestructuras de ferrita y perlita. Sin embargo, existen excepciones microestructurales: ferrita acicular y los de doble fase. El control microestructural de ambas tienen efecto endurecedor en los aceros. En el caso de los aceros ferrítico-perlíticos generalmente requieren de endurecimiento de ferrita. La perlita es una fase de endurecimiento indeseable debido a que reduce la tenacidad y requiere altos contenidos de carbono. (9)

La clasificación de los aceros HSLA más usados son los siguientes:

Aceros aplicados a condiciones de temperatura ambiente: están diseñados para resistencia superior a la corrosión atmosférica.

Aceros de laminación controlada: se laminan en caliente para desarrollar una estructura altamente deformable de austenita. Transformando dinámicamente a una estructura muy fina de ferrita equiaxial durante el enfriamiento.

Aceros de perlita reducida: presenta un grano muy fino de ferrita y endurecido por precipitación en aceros de bajo carbono. Adyacente con un poco contenido de perlita.

Aceros micro-aleados: Contienen pequeñas cantidades de elementos como Niobio, Vanadio, Titanio como elementos de precipitados para endurecer y como refinadores de granos.

Aceros de ferrita acicular: aceros de bajo carbono con suficiente endurecimiento para transformar en el enfriamiento a una estructura muy fina y de alta resistencia de ferrita acicular en lugar de la estructura habitual de ferrita poligonal.

Aceros doble fase: microestructura de ferrita que contiene pequeñas regiones distribuidas uniformemente de alto carbono.

Los aceros HSLA son producidos bajos dos condiciones microestructurales: 1) ferrita-perlita ó 2) ferrita acicular. Esta última se forma debido a la supresión del producto de la transformación perlítica por adición de 0.10% de Mo. La adición de Ti incrementa la tenacidad.

Por otro lado, los aceros micro-aleados contienen pequeñas cantidades de elementos aleantes formadores de carburos, nitruros y carbonitruros. Proporcionando directamente o indirectamente la resistencia mecánica. Básicamente, el control de tamaño de grano incrementa notablemente las propiedades mecánicas de resistencia. (11)

### ***2.2.3.1 Tamaño de grano en las propiedades***

Los métodos de procesamiento utilizados en las diferentes etapas del laminado en caliente presentan los siguientes cambios microestructurales:

- La adición de titanio o aluminio retardan el crecimiento de grano austenítico en las etapas: pre-calentamiento antes de deformarlo en caliente o por tratamiento térmico.
- El laminado controlado de aceros microaleados para retener la austenita y transforme a ferrita con tamaño de grano fino.
- El uso de aleantes o rápidas velocidades de enfriamiento para reducir la temperatura de transformación de austenita a ferrita.

Teniendo en cuenta el uso de altas velocidades de enfriamiento para refinamiento del grano, puede requerir consideraciones de un efecto en el endurecimiento por precipitación y la posibilidad de productos indeseables de transformación (9)

Usualmente la presencia de partículas de segunda fase presenta una serie de fenómenos como se describen a continuación:

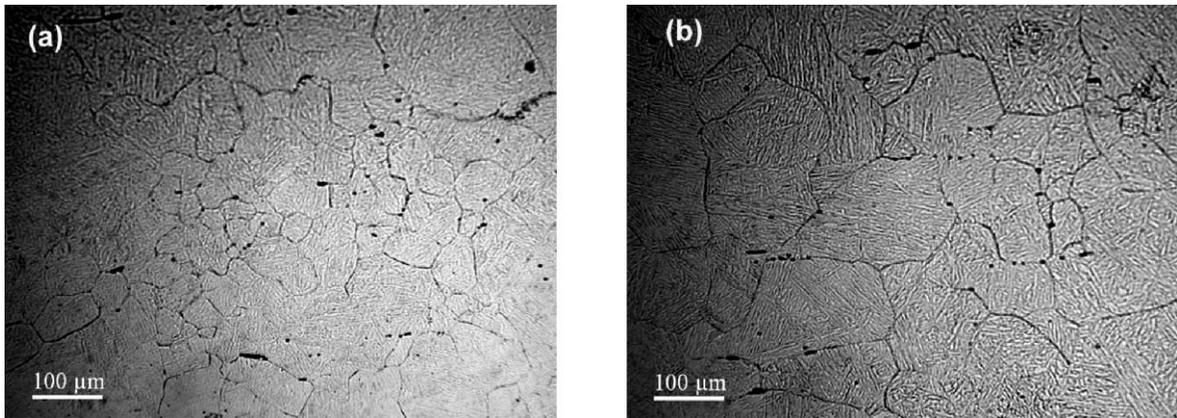
- a) Afinamiento de grano: el material se calienta por debajo de la temperatura de disolución de precipitados. El grano crece hasta un valor máximo a partir del cual se mantiene controlado de manera constante. Este tamaño de grano máximo aumenta con la temperatura de calentamiento o con cantidades decrecientes de fase dispersa. Los granos obtenidos en tales condiciones son de menor tamaño que los del material sin precipitados.
- b) Crecimiento anormal de grano: Ocurre cuando el material se calienta a temperaturas justo por debajo de la temperatura de disolución de los precipitados, donde parte de ellos están disueltos y parte de ellos coalescen. Su característica fundamental es la heterogeneidad de su topología, puesto que se desarrollan distribuciones no uniformes de formas o tamaños de grano, de manera que algunos de ellos crecen más rápidamente que el resto de la matriz en que se engloban.
- c) Crecimiento normal de grano: el material se calienta a temperatura tales que la fase dispersa se disuelve totalmente. Se caracteriza por el mantenimiento de una estructura de grano uniforme; la distribución de formas o tamaños permanece constante en todo el material. (12)

Illesca S. et al (13) sugieren un tratamiento térmico de austenización con temperaturas y tiempos de permanencia considerables para asegurar la fase  $\gamma$ . Por el contrario, si la temperatura o el tiempo son excesivos se producen diversos efectos: quemado del acero, crecimiento de grano anormal por disminución de elementos de Nb, disminución de la templabilidad, etc. Este hecho se confirma en el siguiente caso: un acero 16Mn4 laminado en caliente clasificado como un acero microaleado y bajo contenido de carbono es austenizado a diferentes tiempos y temperaturas. Enfriados en agua a temperatura ambiente. La composición química inicial del acero se muestra en la. Tabla 2. 3

**Tabla 2. 3 Composición nominal del acero 16Mn4 (% en peso) (13)**

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	P	S	N
0.166	1.24	0.16	0.02	0.02	0.001	0.051	0.030	0.186	0.015	0.015	0.003

A temperaturas de 1000 a 1300 °C el grano incrementó de tamaño en función del tiempo. En los primeros tres incrementos de intervalos de 50 °C. El tamaño de grano creció de manera anormal en los primeros 5 minutos para después estabilizarse y seguir con un crecimiento anormal después de un periodo entre 60 y 90 minutos. A partir de 1200 °C no se presentaron crecimientos de granos anormales (Figura 2. 2 (a) y (b)).



**Figura 2. 2 Micrografías que muestran el tamaño de grano (a) crecimiento heterogéneo (1000°C, 5 min) y (b) crecimiento Homogéneo (1050°C, 60 min) (13)**

Este crecimiento es debido a la disminución de los precipitados de carburos y nitruros de niobio en el límite de grano. Además, están en función de la dispersión que tengan los precipitados y la temperatura de solubilidad de estos. Por lo tanto, un tamaño de grano más pequeño mejoran las propiedades mecánicas. (13)

### ***2.2.3.2 Mecanismos de endurecimiento***

La ferrita en aceros HSLA es normalmente endurecida por refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y en menor medida por solución sólida. El refinamiento de grano es el mecanismo de endurecimiento más deseable.

Ocurre en la formación de partículas finas dispersas desarrolladas durante el calentamiento y enfriamiento. Debido a que el endurecimiento por precipitación es generalmente asociado con una reducción en tenacidad. El refinamiento de grano es utilizado en conjunto con el endurecimiento por precipitación para mejorar la tenacidad.

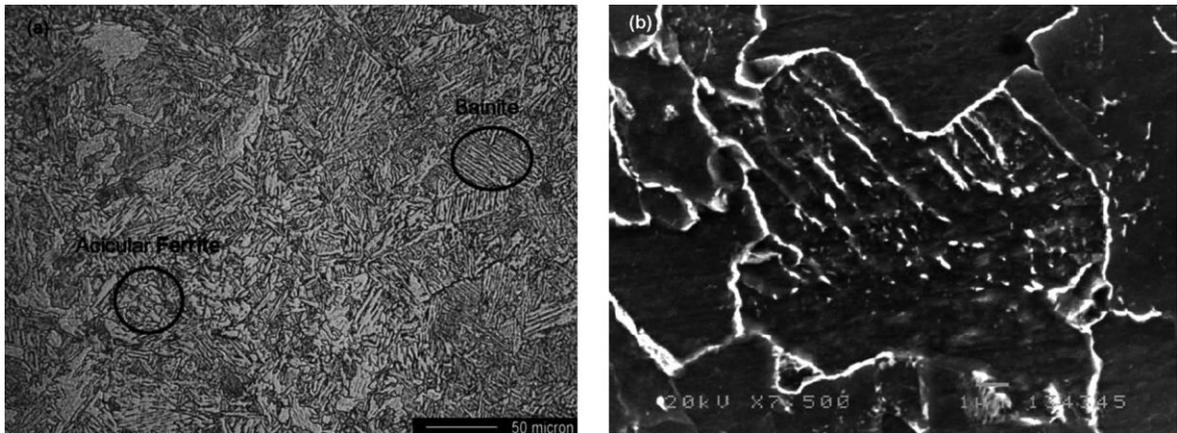
El endurecimiento por precipitación está influenciado por el tipo de carbonitruro, tamaño de grano y la cantidad de carbonituros. La formación de carburos (MC) resulta ser más efectivo en el endurecimiento por precipitación de los aceros microaleados con niobio o titanio. Para mantener la resistencia se adiciona mayor cantidad de titanio (0.09 %e.p.) comparado con el niobio (0.05 %e.p). El número de partículas finas de MC formadas durante el calentamiento y enfriamiento está determinado por la solubilidad de los aceros en la austenita (9)

Fernández J. (14), evaluó las propiedades mecánicas de los aceros HSLA de bajo contenido de carbono con dos aceros similares en la composición química. A excepción del contenido del elemento microaleante de vanadio (ver Tabla 2. 4). Determinó el efecto de la variación del %e.p. de V sometido a un tratamiento térmico. Considerando la inspección microestructural y las propiedades mecánicas (dureza, resistencia y tenacidad).

**Tabla 2. 4 Composición química de los aceros estudiados (% en peso) (14)**

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	Ti	Cu	P	S	N
16Mn4 (V)	0.166	1.24	0.16	0.02	0.02	0.001	0.051	0	0.03	0	0.186	0.015	0.015	0.003
16MnNi4(V+Nb)	0.165	1.11	0.23	0.02	0.34	0.001	0.026	0.014	0.024	0.001	0.184	0.015	0.002	0.006

Los aceros 16MnNi4 (V+Nb) y 16Mn4 (V) se trataron térmicamente a 1050 y 1000 °C por 30 y 15 min, respectivamente. Posteriormente, se enfriaron en baño de sales de KNO<sub>3</sub> / NaNO<sub>3</sub> entre 350 y 500 °C por 30 y 60 minutos, respectivamente. Con el fin de obtener una estructura bainítica. Los resultados microestructurales muestran bainita superior e inferior con estructuras de ferrita acicular (Figura 2. 3 (a) y (b))



**Figura 2. 3 Aceros tratados térmicamente: a) Micrografía de acero V-Nb a 450 °C por 30 min y (b) MEB del acero V+Nb a 450 °C por 30min (14)**

El acero conteniendo V presenta una alta cantidad de ferrita acicular con respecto al acero V+Nb. Debido a que el V promueve la formación de ferrita acicular. Asimismo, el acero con V+Nb presenta un tamaño de grano mayor. Favoreciendo el desarrollo de una alta fracción de volumen de bainita inferior por el alto número de sitios de nucleación.

En la Figura 2. 4 muestra la variación de la microdureza en función de la temperatura. Se aprecia que el acero con V+Nb presentan mayor microdureza con respecto al acero sólo con V. La baja microdureza es debido al mayor contenido de ferrita acicular. Comparativamente, esta fase es más suave que la bainita que predomina en el acero V+Nb. Es notorio, que los valores obtenidos en el acero V+Nb es independiente al tiempo de duración del tratamiento térmico. Mientras, el acero sólo con V muestra diferentes incrementos de dureza con tiempos de 30 y 60 minutos. (14)

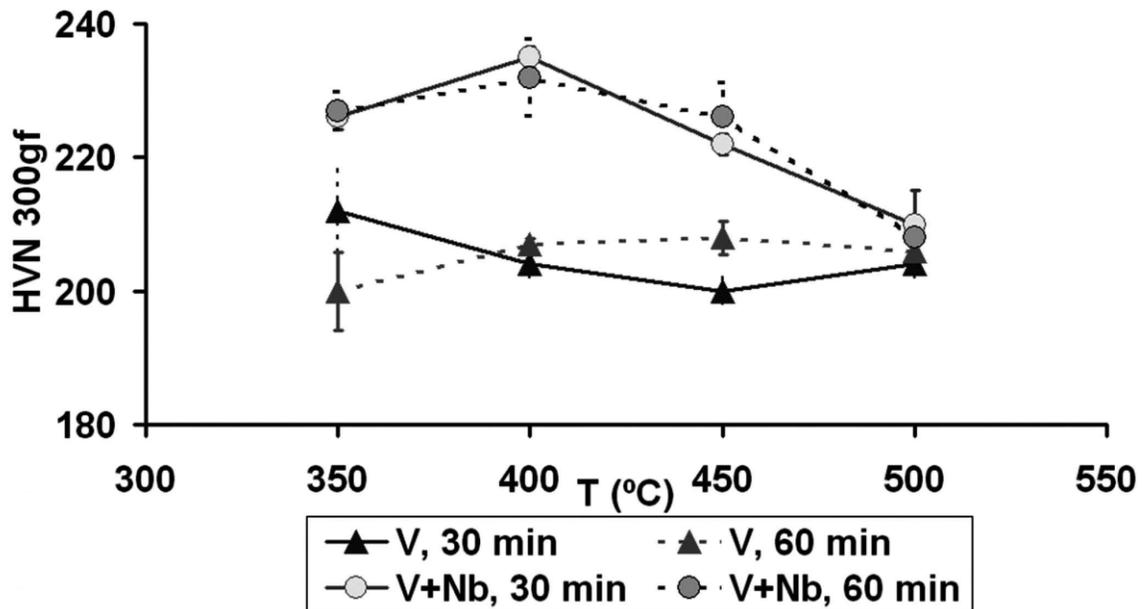


Figura 2. 4 Variación de las microdureza de los aceros con V+Nb y V en función de la temperatura. Considerando una masa de 300gf y tiempos de tratamiento térmico por 30 y 60 min. (14)

## 2.2.4 Tratamientos térmicos en aceros HSLA

Los aceros de baja aleación son usualmente laminados en caliente y obtenidos en diversas formas (incluso como secciones de estructuras). Sin embargo, algunos aceros HSLA son posteriormente tratados térmicamente.

El tratamiento termomecánico es usado ampliamente para obtener la óptima combinación de resistencia y tenacidad en un acero. Esto implica la aplicación simultánea de calor y un proceso de deformación de una aleación. Con el objetivo de cambiar su forma y refinar la microestructura. Los métodos de procesado usualmente incluyen:

#### A. Laminación controlada.

El mecanismo de refinamiento de grano primario por laminación controlada. Es la recrystalización de la austenita durante la deformación en caliente. Obteniéndose granos de austenita pequeños y finos por enfriamiento. Incrementando la tenacidad y el límite elástico. Este proceso es controlado por la temperatura y el grado de deformación por pasada a través de los rodillos. En la etapa de la recrystalización dinámica, la austenita es provista de partículas de segunda fase. A altas temperaturas de laminación en caliente conducen al crecimiento de grano. Con el resultado de que el refinamiento del grano durante el trabajo posterior es limitado.

B. Obtención de microestructura de doble fase (islas de martensita dentro de una matriz de ferrita).

Aunque tienen bajos límites elásticos debido al endurecimiento por trabajo, hay una buena combinación de ductilidad y resistencia a la tensión. Los aceros de doble fase consisten de una matriz ferrítica con martensita dura. Incrementando la fracción de volumen de segundas fases duras aumenta la resistencia.

Se producen por enfriamiento controlado desde la fase austenítica (en productos laminados en caliente) o en la zona de ferrita más austenita. Posteriormente, se realiza un enfriamiento rápido para transformar la austenita en martensita. (15)

## **2.3 Maquinado por electrodescarga (EDM)**

En esta sección se describe el funcionamiento del proceso de electrodescargas, su importancia, las limitaciones, ventajas y los efectos que tienen en los materiales. Es importante conocer la operación del proceso con el fin de predecir el comportamiento de remoción de material en los aceros HSLA.

### **2.3.1 Introducción**

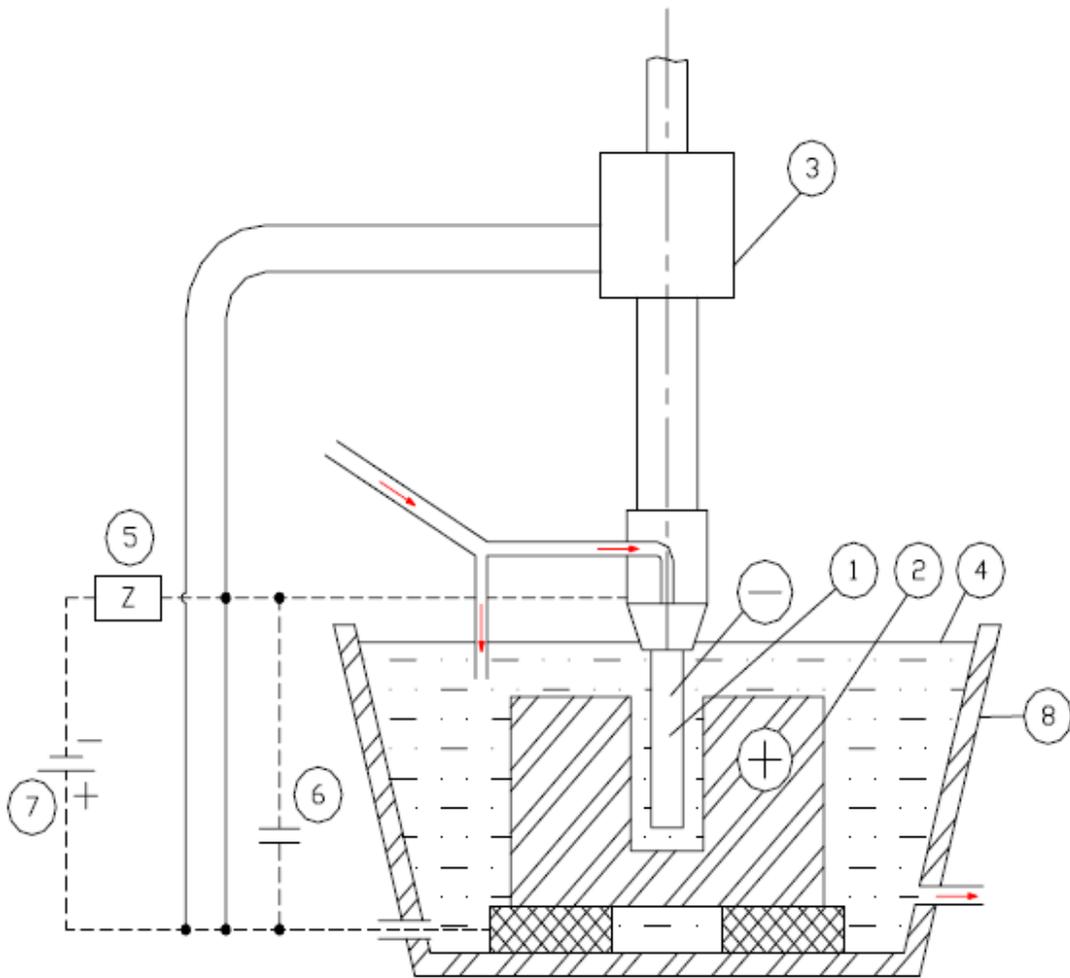
El proceso que opera semejante a un torno, fresadora, limadora, etc. están limitados por la complejidad de la geometría de las piezas. Así como de la combinación de movimientos rotativos y alternados, característicos de los métodos de trabajo por arranque de viruta. Generalmente, el control del tipo de arranque de viruta es un problema. Esta remoción se complica en materiales de alta dureza: aceros refractarios, de alta velocidad (con precipitados de WC o TiN) o compuestos. Aunado a la forma o dimensiones complicadas: agujeros con directrices no rectilíneas ni circulares. En ocasiones en estos procesos se deben templar. Conllevando a la deformación y, posterior tratamiento térmico para liberar esfuerzos residuales.

Actualmente para hacer frente a estas dificultades se propone el maquinado por efectos electroerosivos. En este caso la eliminación del material se realiza por “descargas eléctricas”.

Entre los métodos utilizados para conformar piezas con desprendimiento de material se encuentra el procesos del EDM (Electrical Discharge Machine por sus siglas en inglés). Consiste en maquinar metales duros y formar agujeros profundos de formas complejas mediante erosión por saltos de chispas. El mecanismo de remoción de material es por electroerosión. Básicamente, consiste en el arranque de material por descargas eléctricas controladas que se distribuyen a lo largo del área de remoción. En un medio dieléctrico, entre un electrodo y una pieza, el metal se remueve a través del calor generado por las colisiones de electrones y iones en las descargas de chispas. (3)

Con base en lo anterior, el proceso de remoción de material por EDM ha tomado importancia en la elaboración de matrices, moldes para estampado, forjado, inyección de plásticos y metales no ferrosos.

El proceso de electroerosión no está sujeto a los esfuerzos de un movimiento de corte convencional. Esto se debe a que la herramienta (el electrodo) no está haciendo contacto con la pieza de trabajo. Siendo de esta manera posible darle cualquier forma sin problemas de distorsión. (16)



**Figura 2. 5 (1) Electrodo (cátodo) negativo; (2) Pieza (ánodo) positivo; (3) Sistema de control; (4) Dieléctrico; (5) Impedancia total del circuito; (6) Capacitor; (7) Fuente de CC; (8) Cuba. (16)**

### **2.3.2 Descripción del proceso**

El mecanizado por electroerosión se efectúa mediante las descargas de chispas eléctricas entre dos electrodos suministrado por una tensión eléctrica y, sumergidos ambos en un medio aislante (Figura 2. 6 A).

El principio de descarga eléctrica entre dos electrodos presenta diferentes características según la naturaleza del medio en la cual se sumerge, en el caso de la electroerosión, el medio de ionización es un fluido líquido que se opone al paso de corriente eléctrica, bajo la influencia de un diferencial de potencial eléctrico aplicado entre los electrodos, los iones se desplazan hacia sus polos opuestos estableciendo la conductividad eléctrica entre los electrodos por medio del fluido dieléctrico.

Una descarga eléctrica entre los electrodos se produce cuando se aplican un diferencial de potencial mayor a la tensión de ruptura eléctrica del medio, considerando también la distancia de separación de los electrodos (GAP). Es así que, los iones positivos y electrones se aceleran para crear un canal ionizado, que actúa como conductor de la corriente eléctrica en el sitio de mayor campo eléctrico. En consecuencia, se produce un salto de chispa o en otras palabras, se forma un canal ionizado de transferencia de carga-masiva (Figura 2. 6B).

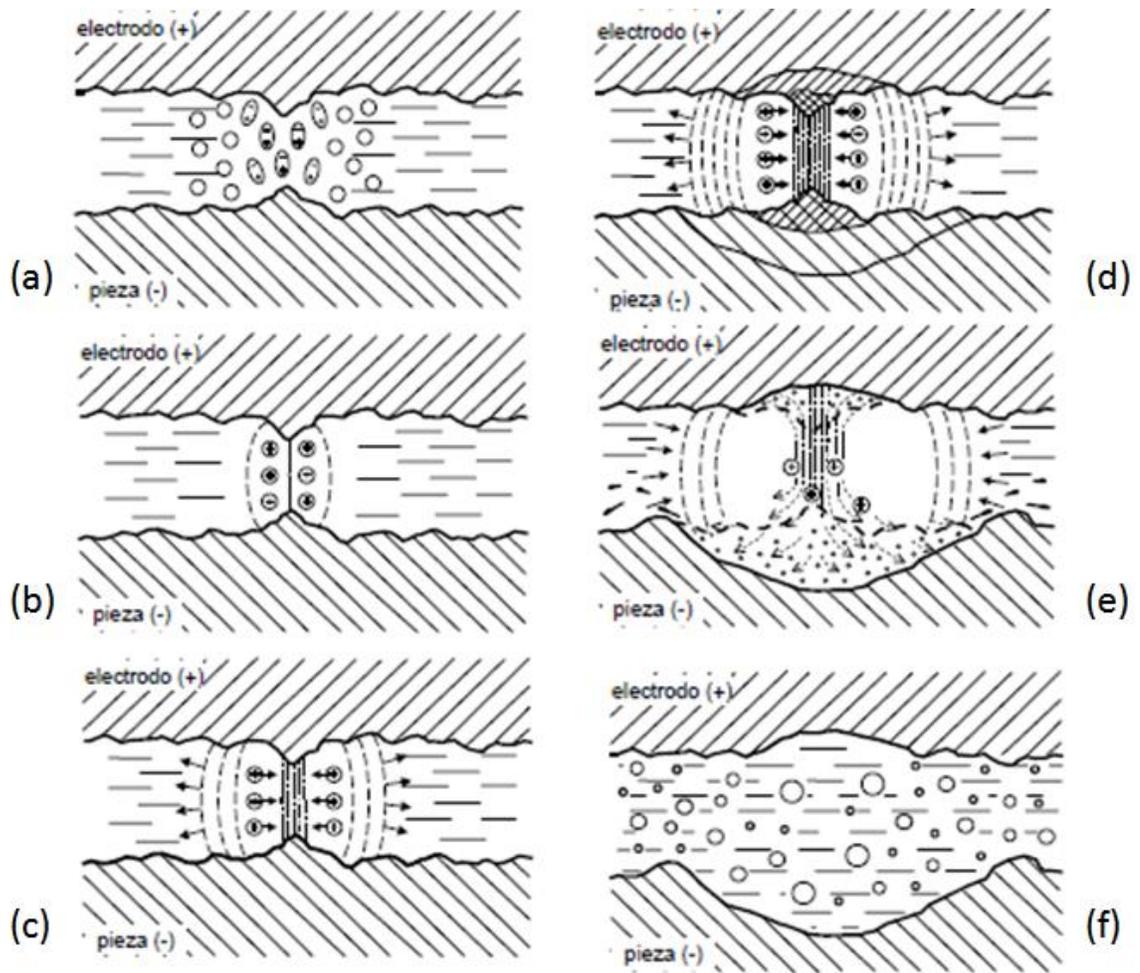


Figura 2. 6 Etapas en las que se lleva a cabo la remoción del material en el proceso EDM (17)

El fenómeno del comienzo de la descarga es complejo. Durante las primeras centésimas o décimas de microsegundo de la descarga, se producen fenómenos correlacionados entre sí. Provocando colisiones entre los iones (+) y los electrones (-). De esta manera se forma un canal ionizado constituido por un plasma (Figura 2. 6C).

La formación del plasma está bajo el efecto del campo eléctrico que se forma entre los dos electrodos, los iones y electrones se desplazan hacia los electrodos de polaridad opuesta almacenando energía cinética en su trayectoria, a lo largo de su recorrido empiezan a colisionar entre sí y con los átomos del material de los electrodos, en el transcurso de sucesivas colisiones transmiten su energía cinética al medio circundante, ocasionando el incremento de la temperatura del plasma por transformación de energía cinética en térmica (17).

De acuerdo a lo anterior, se incrementa la temperatura en las superficies de contacto del plasma en ambos electrodos para fundir y vaporizar el material. Este fenómeno provoca la formación de una burbuja de vapor de elevada presión que recubre al canal ionizado y, se extiende rápidamente desplazando el líquido dieléctrico. La presión en la burbuja, proviene de la resistencia que opone el dieléctrico a su expansión. Inclusive la presión de la burbuja es varias veces mayor a la presión atmosférica debido a la descarga (Figura 2. 6D).

La erosión en los dos electrodos es debido a los átomos neutros del plasma. En esta etapa, liberan su energía por agitación térmica al colisionarse contra los electrodos. Ocasionando la formación de un pequeño cráter. La erosión sobre los electrodos es asimétrica, dependiendo primordialmente de la polaridad, conductividad térmica y temperatura de fusión de los materiales. Lo anterior está en función de la duración e intensidad de las descargas. Esta naturaleza plasmática entre el electrodo-pieza desgasta por erosión un 99.5% y 0.5% entre el electrodo-herramienta (Figura 2. 6E) (17).

En el momento de la interrupción de la corriente, el canal de plasma disminuye y no se forma la chispa. La burbuja de gas se colapsa por el líquido dieléctrico. Provocando una dilatación explosiva que hace emanar material fundido para formar el cráter. Este material solidifica en el líquido dieléctrico que es arrastrado en forma de esferas. Quedando en suspensión, este es comúnmente llamado “viruta del proceso de electroerosión” (Figura 2. 6F) (16), (17).

### **2.3.3 Variaciones del proceso**

Existen tres métodos de maquinado por electroerosión empleados en la actualidad, los cuales trabajan con el mismo principio de erosionado de la pieza de trabajo, mediante descargas eléctricas.

#### ***2.3.3.1 Maquinado por electrodescargas por hilo.***

El proceso por electrodescargas (WEDM por sus siglas en inglés) consta de un hilo metálico que cumple la función del electrodo. Este erosiona la pieza de trabajo que va desenrollándose de un carrete para enrollarse nuevamente al haber pasado por la pieza de trabajo erosionada. El uso principal de este modo de proceso es cortar metal a través de una perforación previamente hecha. Por lo tanto, se debe que enhebrar el hilo de corte, como se observa en la Figura 2. 7 (18)

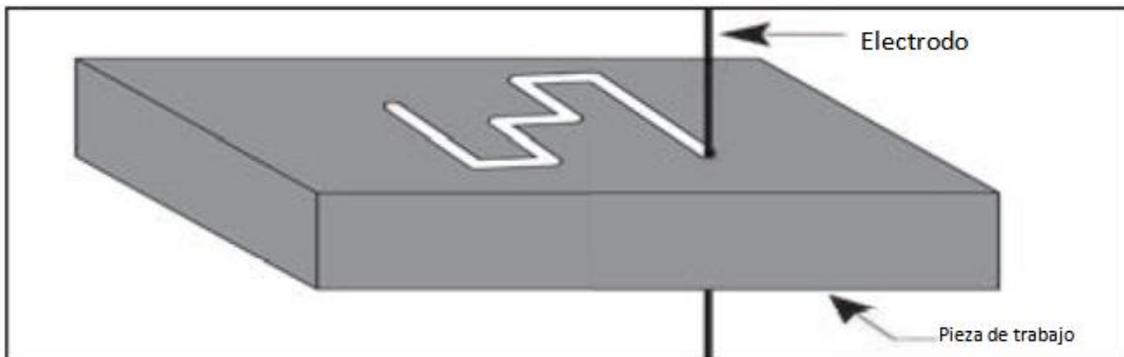


Figura 2. 7 Maquinado por electrodescarga por hilo (18)

### 2.3.3.2 Maquinado por electrodescargas por estampado

El proceso de electrodescarga por estampado (Ram EDM por sus siglas en inglés), se caracteriza por tener el electrodo con la forma negativa. Asimismo, por las propiedades de fácil copiado, se emplea para moldes metálicos de inyección de plástico y fundiciones no ferrosas. Este proceso por estampado se emplea en materiales de alta dureza y configuración intrincada. Ver Figura 2. 8

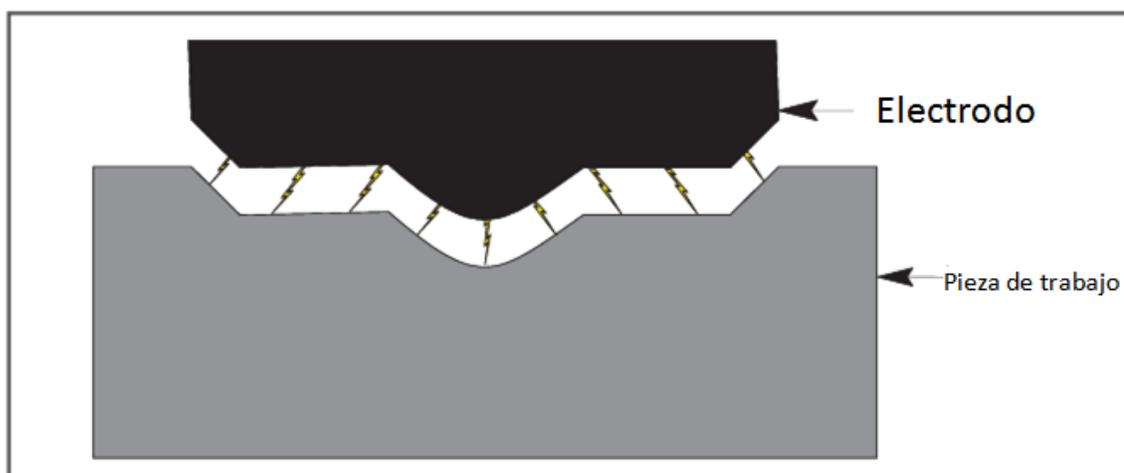
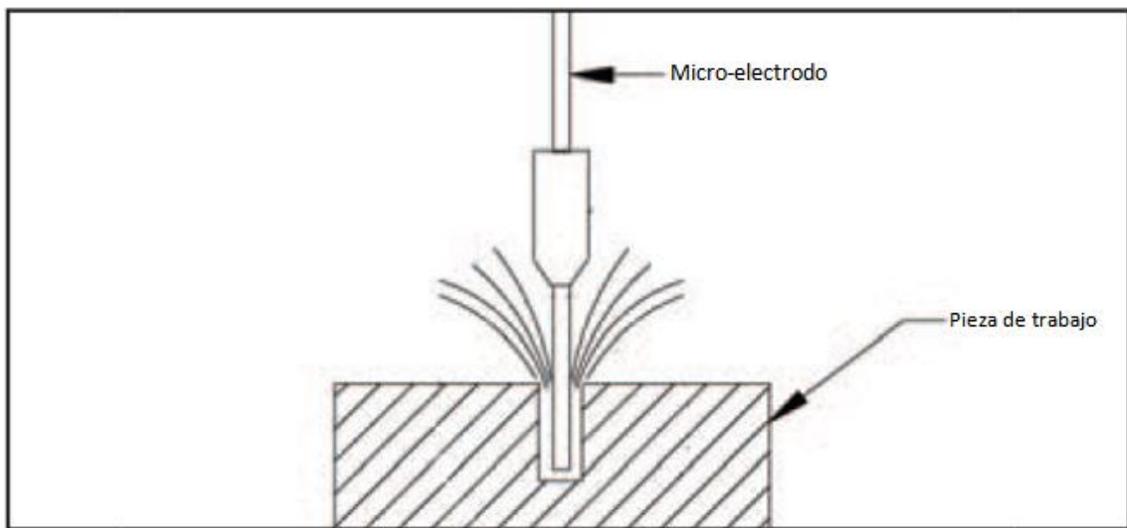


Figura 2. 8 Maquinado por electrodescargas por estampado (18)

### **2.3.3.3 Micro-maquinado por electrodescargas**

El micro-maquinado o Micro-EDM, consta de un electrodo en forma de cilindro para realizar perforaciones de tamaños del orden de milésimas de pulgada. Generalmente, los electrodos son de tungsteno y usados en la perforación de alabes de turbina, inyectores de combustible y para dar forma a piezas muy pequeñas entre otras aplicaciones. En la Figura 2. 9 se muestra el esquema del micromaquinado.



**Figura 2. 9 Micro-maquinado por electrodescargas (18)**

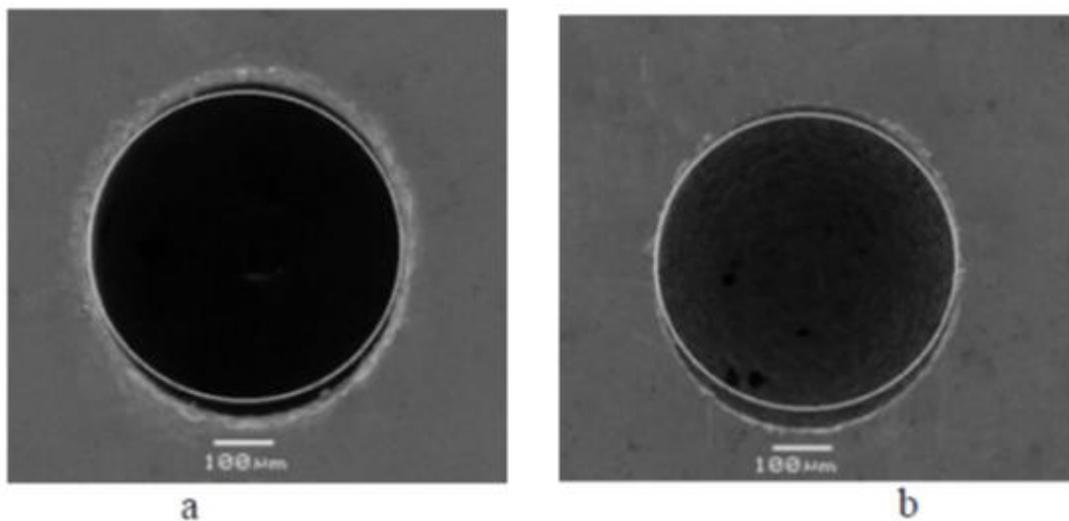
### **2.3.3.4 Comparación entre el electromaquinado por estampado y micro-maquinado por electrodescargas**

Ali, M. Y. et al. (19) comparó dos variantes del electromaquinado, el EDM convencional (FX-K 4.1, Mitsubishi) y el micro EDM (DT110, Mikro Tools Singapoe). Empleando una placa pulida de una aleación de cobre-berilio de dimensiones: 20mm x 10mm x 5mm y, un electrodo de carburo de tungsteno de 500 $\mu$ m de diámetro. Estos materiales son empleados en ambos procesos y en cada nueva perforación usan un nuevo electrodo. Los parámetros empleados en el experimento se enlistan en la Tabla 2. 5

**Tabla 2. 5 Parámetros del electromaquinado por el proceso convencional y micro EDM (19)**

<b>EDM Convencional</b>	<b>Valores</b>	<b>Micro-EDM</b>	<b>Valores</b>
Voltaje (V)	10	Voltaje (V)	100
Corriente (A)	1.1	Nivel de potencia (%)	30
Polaridad	Pieza positiva	Polaridad	Pieza positiva
Pulso encendido ( $\mu$ s)	2	Capacitancia ( $\mu$ F)	0.1
Pulso Apagado ( $\mu$ s)	10	Velocidad de avance ( $\mu$ m/s)	2

Los resultados obtenidos en las perforaciones presentaron un diámetro mayor que el tamaño del electrodo. Comparativamente, siendo significativamente mayor en el EDM convencional. El alargamiento del diámetro por el micro EDM es menor en un rango de 10 a 20  $\mu$ m (Figura 2. 10 (a), (b)). Este efecto es causado por un alto nivel de energía de descarga en el EDM convencional comparado con el micro EDM.



**Figura 2. 10 Microscopia SEM de la microperforación usando un electrodo de carburo de Tungsteno: (a) EDM convencional y (b) micro EDM (19)**

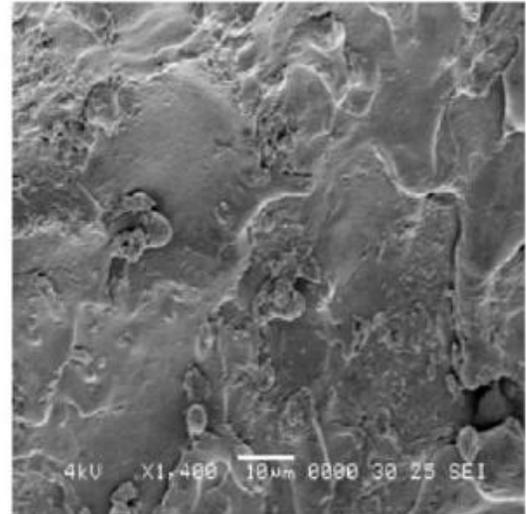
En la investigación se midió la rugosidad de la perforación y el diámetro. En el proceso de micro EDM se obtuvo un mejor acabado superficial (1  $\mu\text{m Ra}$ ). Comparado con el proceso convencional de EDM resultó de 1.7  $\mu\text{m Ra}$  (Tabla 2. 6). Por otro lado, por microscopía de electrones reveló que el proceso convencional EDM forma una mayor capa de metal fundido. Resultando en una superficie con mayor rugosidad (ver Figura 2. 11 (a,b,c,d))

**Tabla 2. 6 Comparación de la geometría de las perforaciones con micro EDM y EDM convencional (19)**

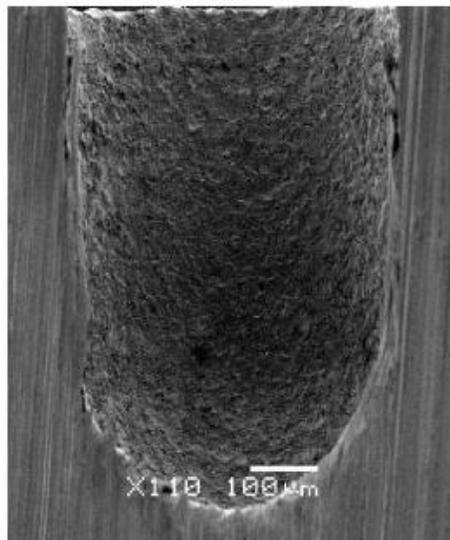
EDM Convencional		Micro EDM	
Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	Alargamiento del diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	Alargamiento del diámetro ( $\mu\text{m}$ )
20	26	3	4
26	35	5	11
37	43	6.5	13
43	51	8	17
58	65	12	23
64	75	17	31



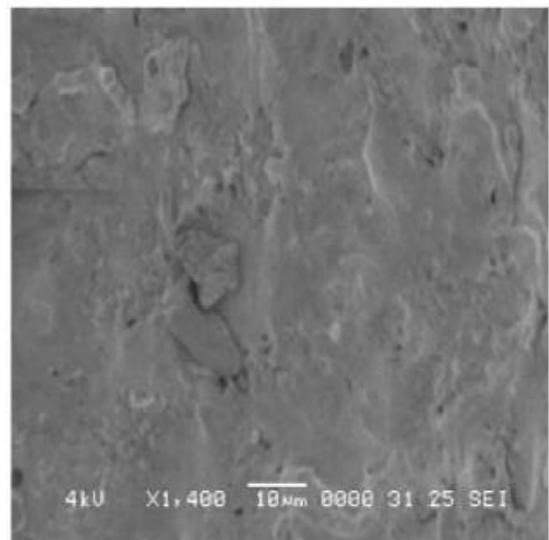
a



b



c



d

**Figura 2. 11 Imágenes de electrones secundarios de la perforación usando un electrodo de carburo de tungsteno: (a) Perforación por EDM convencional. (b) superficie de la perforación por EDM convencional. (c) Perforación por Micro EDM. (d) superficie de la perforación por Micro EDM**

### 2.3.4 Parámetros del proceso EDM

Para producir las descargas que se emplean en el proceso de electroerosión, se definen por parámetros físicos dentro de los cuales se dividen en parámetros variables y constantes. Tomando en cuenta las variables del proceso que tienen mayor influencia en la remoción de material son (20):

*Tiempo de encendido del pulso:* Es la duración de tiempo del orden de microsegundos en el cual la corriente eléctrica se hace circular por el electrodo y la pieza de trabajo.

*Tiempo de apagado del pulso:* Es la duración de tiempo del orden de los microsegundos del flujo de la corriente eléctrica a través del circuito eléctrico del electrodo y de la pieza da trabajo.

*Distancia de arco (GAP):* Es la distancia de separación que existe entre la pieza de trabajo y del electrodo. Considerando el flujo dieléctrico y los saltos de chispas.

*Ciclo de trabajo:* Es la fracción porcentual de tiempo de encendido relativo de la maquina durante el ciclo total. Este parámetro se calcula dividiendo el tiempo de encendido del pulso entre el tiempo total del ciclo (tiempo de encendido del pulso más el tiempo de apagado del pulso). Con el fin de medir el nivel de eficiencia.

*Intensidad de corriente:* Es la cantidad de energía suministrada al proceso medida en amperios.

*Frecuencia de las pulsaciones:* Es la cantidad de veces de encendido y apagado del pulso en una determinada unidad de tiempo.

*Voltaje:* Es la cantidad de tensión eléctrica con la cual opera la máquina.

*Polaridad:* Es la configuración del sentido del flujo de corriente de la pieza de trabajo al electrodo.

### **2.3.4.1 Efectos de los parámetros de los procesos EDM**

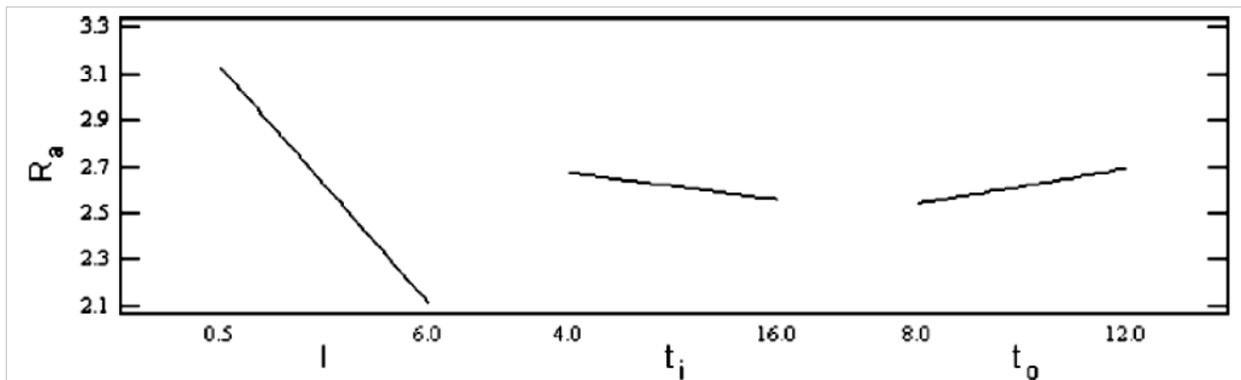
Reportes en la literatura. (20) relacionan la rugosidad de la superficie de un acero suave F-1110 maquinado con los parámetros del proceso EDM. Expone que los valores de la rugosidad de la superficie son dependientes de las condiciones de maquinado. En un modelo experimental variando los tiempos de apagado: 8,10 y 12  $\mu$ s) y, encendido del pulso: 4, 10 y 16  $\mu$ s, así como la cantidad de corriente empleada: 0.5, 2 y 6 A (ver Tabla 2. 7)

**Tabla 2. 7 Resultados obtenidos en el estudio (20)**

No. De experimento	I (A)	ti ( $\mu$ s)	to ( $\mu$ s)	Ra ( $\mu$ m)
1	0.5	4	8	3.69
2	6	4	8	1.78
3	0.5	16	8	2.95
4	6	16	8	2.49
5	0.5	4	12	3.9
6	6	4	12	2.07
7	0.5	16	12	3.06
8	6	16	12	2.48
9	2	10	10	2.27
10	2	10	10	2.77
11	2	10	10	2.47
12	2	10	10	2.37

I: Intensidad de corriente, ti: Tiempo de encendido del pulso, to: tiempo de apagado del pulso, Ra: Rugosidad

Se observa que los parámetros de encendido y apagado tienen poca influencia en la variación de la rugosidad. En contraste, la corriente tiene una gran influencia en la rugosidad. Por otra parte, la rugosidad disminuye en función del incremento de la corriente. Asimismo, en menor cantidad cuando se incrementa el tiempo de encendido. Esta tendencia es opuesta a lo esperado al considerar el rango de variación de la rugosidad que es estrecha. Bajo este esquema de estudio, se considera que es debido a una mejor estabilidad del arco que causa pulsos más uniformes (ver Figura 2. 12)



**Figura 2. 12 Gráfica de los efectos de la rugosidad en función de la corriente (I), del tiempo de encendido ( $t_i$ ), y tiempo de apagado ( $t_o$ ). (20)**

En otro estudio de investigación (21) se plantea mediante un modelo matemático la estimación de la cantidad de material removido y la calidad superficial. El modelo establece ecuaciones para la razón de remoción de material (MRR por sus siglas en inglés) y el tamaño del cráter en la superficie. Variando la intensidad de corriente, voltaje y tiempos de encendido y apagado de los pulsos.

El modelo matemático considera que una chispa generada por un pulso forma una esfera de un radio (Rdc). Esta a su vez deja un cráter de media esfera en la superficie del material del mismo radio. En consecuencia, la remoción de material es proporcional a la energía descargada, que está dada por un factor (Fc), el cual es independiente de la corriente eléctrica y de la duración del pulso. Está en función del material base, del electrodo y el dieléctrico empleado. Se establece la relación del volumen de metal removido en función de la energía de la chispa y el tiempo de permanencia.

$$V_s = F_c \int_0^{t_s} I_e(t) U_e(t) dt \quad (1)$$

$V_s =$  volumen de material removido

$I_e =$  Corriente en función del tiempo

$U_e =$  voltaje de descarga en función del tiempo

$t_s =$  tiempo de encendido del pulso

El volumen del modelo es para una chispa, el volumen total ( $V_{tot}$ ) es la sumatoria de todas las chispas en un intervalo de tiempo determinado, dando como resultado que la razón de remoción del material (M) sea:

$$M = F_c \frac{I_e U_e t_s}{t_s + t_i} \quad (2)$$

$t_i =$  tiempo de apagado del pulso

La ecuación (2) es graficada y muestra una tendencia lineal de incremento en la remoción de material. Aumentando los niveles de corriente y con intervalos de tiempo mayores del pulso (ver Figura 2. 13)

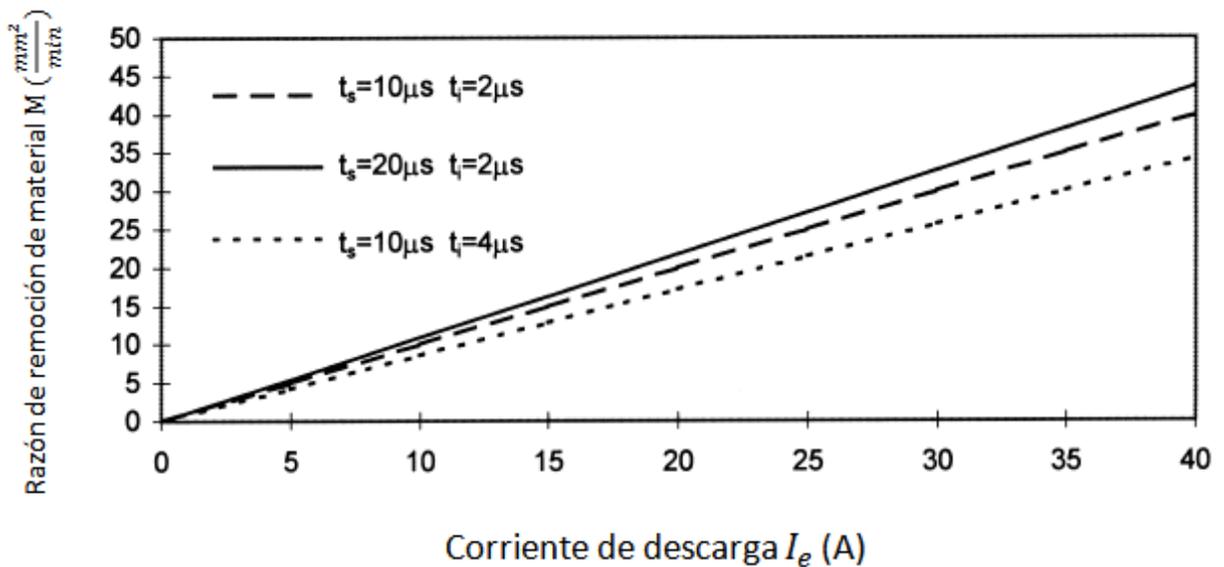


Figura 2. 13 Variación de la razón de remoción de material  $M$  en función de las descargas de corrientes en tres intervalos de tiempo distintos. (21)

Como se estableció que el cráter es la mitad de la esfera y la altura más baja es el radio ( $R_{m\acute{a}x}$ ), se determina con la ecuación (3):

$$R_{m\acute{a}x} = \left( \frac{3}{2\pi} F_c I_e U_e t_s \right)^{1/3} \quad (3)$$

El valor de  $R_{m\acute{a}x}$  varía con la corriente de descarga y el tiempo de duración del pulso, graficando la ecuación (3) (ver Figura 2. 14) muestra que el incremento de corriente es seguido de un incremento progresivo en el valor  $R_{m\acute{a}x}$  de la calidad de la superficie.

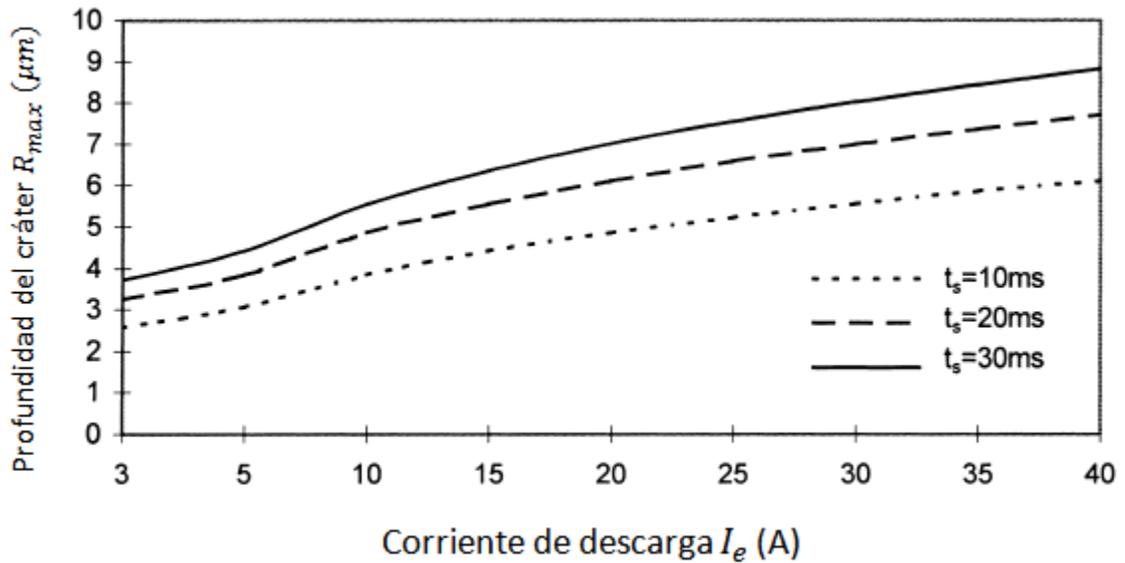


Figura 2. 14 Gráfico de la variación de la profundidad del cráter en función de la corriente (21)

Para comparar este modelo se empleó una pieza de acero dulce con una densidad de  $7800 \text{ kg/m}^3$  para determinar el proceso de erosión. Además usando un electrodo de cobre con una densidad de  $8500 \text{ kg/m}^3$  con la polaridad negativa. El medio dieléctrico es aceite marca CASTROL SE-185.

Los resultados obtenidos son similares al modelo matemático. Los valores del experimento son inferiores a los del modelo. En la Figura 2. 15 se muestra la tendencia de un incremento de la remoción del material en función del aumento de la corriente de descarga. Considerando los valores de  $F_c=2.02 \text{ mm}^3/\text{w} \times \text{min}$ . Los intervalos de tiempo de encendido y apagado de 10ms y 2 ms respectivamente.

En la Figura 2. 16 se muestra la misma tendencia del modelo y del experimento con el aumento de la profundidad del cráter al incrementar la intensidad de corriente y la duración del tiempo.

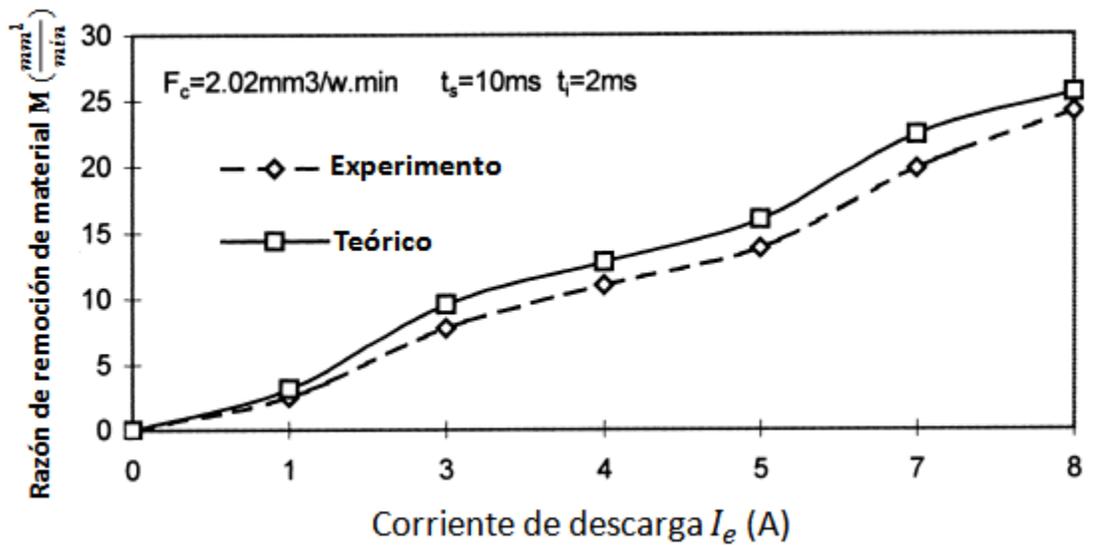


Figura 2. 15 Comparación de la razón de remoción de material variando la corriente (21)

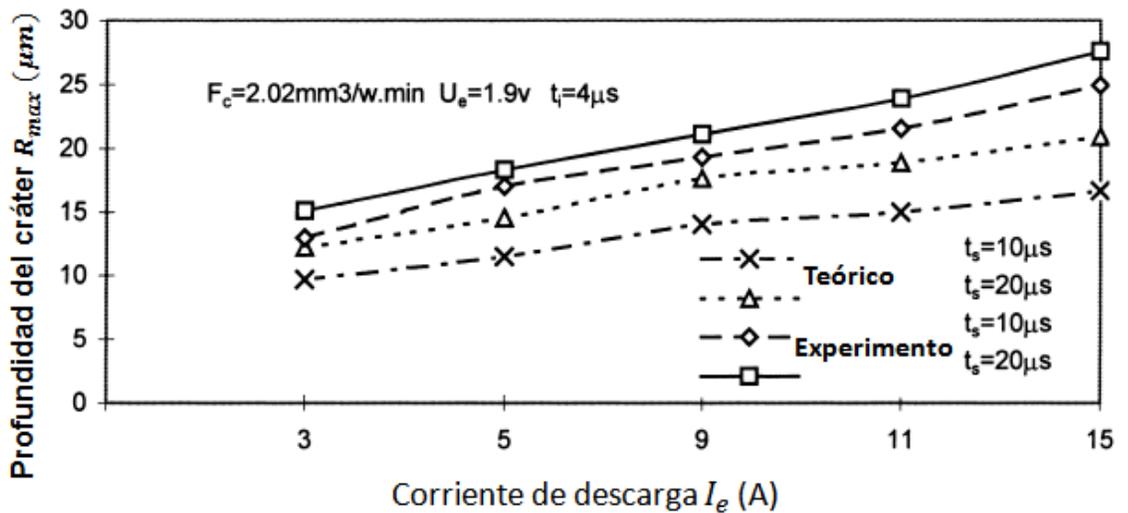


Figura 2. 16 Comparación de la corriente de descarga en la profundidad del cráter (21)

### 2.3.4.2 Zona afectada térmicamente (ZAT), y material fundido

El proceso EDM crea tres tipos de zonas en la superficie (ver Figura 2. 17). La primera, es una delgada capa de material que ha sido salpicada por el material fundido que no ha sido capturado por el fluido dieléctrico, además contiene una pequeña cantidad del material fundido del electrodo. Esta capa de salpicadura es fácil de remover.

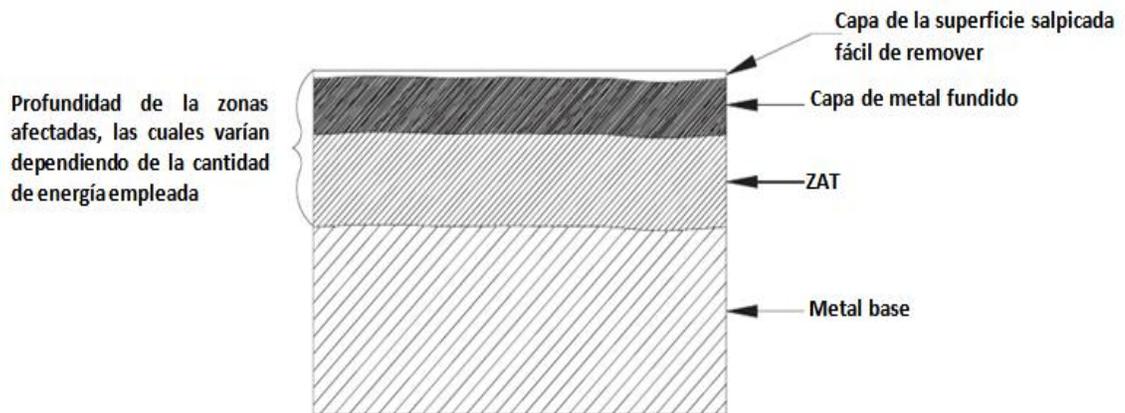


Figura 2. 17 Zonas afectadas por el proceso EDM (18)

Debajo de la capa de salpicadura se encuentra la segunda zona, que se considera una capa de metal que ha sido fundido en la descarga, pero no se desprendió del metal base. Debido al calentamiento de la zona adyacente se altera la microestructura de los materiales.

La zona de metal fundido se formada debido a que cierta cantidad del metal no fue expedido y en lugar de eso se solidifica rápidamente por el fluido dieléctrico. Dependiendo del material, la capa de metal fundido es alterada convirtiéndola en una zona de alta dureza y frágil. De ese modo, las microgrietas suelen presentarse. Esta capa disminuye con operaciones de acabado superficial.

La tercera zona es la que ha sido afectada térmicamente debido a la cantidad de corriente aplicada en las operaciones de remoción de material. En esta parte el metal ha sido calentado sin alcanzar el punto de fusión. Comparado con la capa de metal fundido, debido al calentamiento las propiedades del material cambian

Las zonas afectadas térmicamente varían de espesor en cada proceso, el EDM por estampado es el que más energía aporta de las tres variables del EDM, el aumento de aporte de energía incrementa la ZAT. En delgadas láminas es un serio problema, a causa del calentamiento del metal recibe un tratamiento térmico de templado con el fluido dieléctrico, causando fragilidad del metal.

Cuando el dieléctrico es calentado por las descargas, las moléculas de los hidrocarburos se descomponen creando una zona enriquecida de carbono en el área de corte, además provoca la difusión del carbono en la superficie alterando la composición química del metal, incrementando la dureza y haciéndola susceptible a agrietamientos. Para evitar este problema en láminas delgadas se debe de dar un premaquinado con valores bajos en los parámetros (18).

El estudio de Pervej Jahan M. et al. (22) Pretende determinar las capacidades del maquinado por el proceso micro-EDM, entre un carburo de tungsteno (WC-Co) y un acero inoxidable ferrítico (SUS 304), el punto de comparación está basado en la calidad y la precisión de las micro-perforaciones, la estabilidad del proceso durante la perforación profunda y los efectos de la energía de descarga.

Las láminas empleadas en el experimento son de un espesor de 1mm, se emplea un electrodo de tungsteno de 200 $\mu$ m de diámetro, se emplea un fluido dieléctrico especial para el proceso del EDM, sus características son que tienen un alto punto de ignición y una alta resistencia dieléctrica. En la Tabla 2. 8 se muestran los parámetros con los que se realizó la experimentación.

**Tabla 2. 8 Condiciones de las microperforaciones con el micro EDM (22)**

Material de trabajo	WC-Co, SUS 304
Electrodo	W: $\varphi$ 200 $\mu$ m
Fluido dieléctrico	Total EDM 3 oil
Tipo de generador de pulso	RC
Descarga de energía por pulso ( $\mu$ J)	7.04 a 98
Voltaje (V)	80, 100, 120, 140
Capacitancia (nF)	2.2, 10
Resistencia (k $\Omega$ )	1

El estudio reveló que las micro perforaciones hechas en el WC-Co y el SUS 304 en baja y alta energía de descarga de parámetros. Se encontraron que las micro-perforaciones hechas en el WC-Co tienen una buena calidad superficial en el borde de la perforación. Todas las perforaciones realizadas con niveles de parámetros bajos y altos están libres de virutas y de rebabas.

Por otro lado, las perforaciones realizadas en el acero SUS 304 en el borde presenta una capa de metal solidificado en la superficie de los cráteres, el cual es un efecto que se observa más marcado con valores alto de energía de descarga, es atribuido a las propiedades térmicas del material. Debido a la baja conductividad térmica del SUS 304, el calor generado durante el maquinado no es disipado rápidamente, es así, que la superficie maquinada no tiene un aspecto liso cuando se enfría.

En la Figura 2. 18 (a), (b), (c), (d), (e) y (f) se muestra que a la misma energía de descarga para los dos materiales, los cráteres generados en la superficie del acero SUS 304 son más grandes comparados con los del WC-Co. Los bordes de las micro perforaciones son mayormente afectadas en el acero SUS 304, lo cual causa una expansión de la perforación y reduce la circularidad.

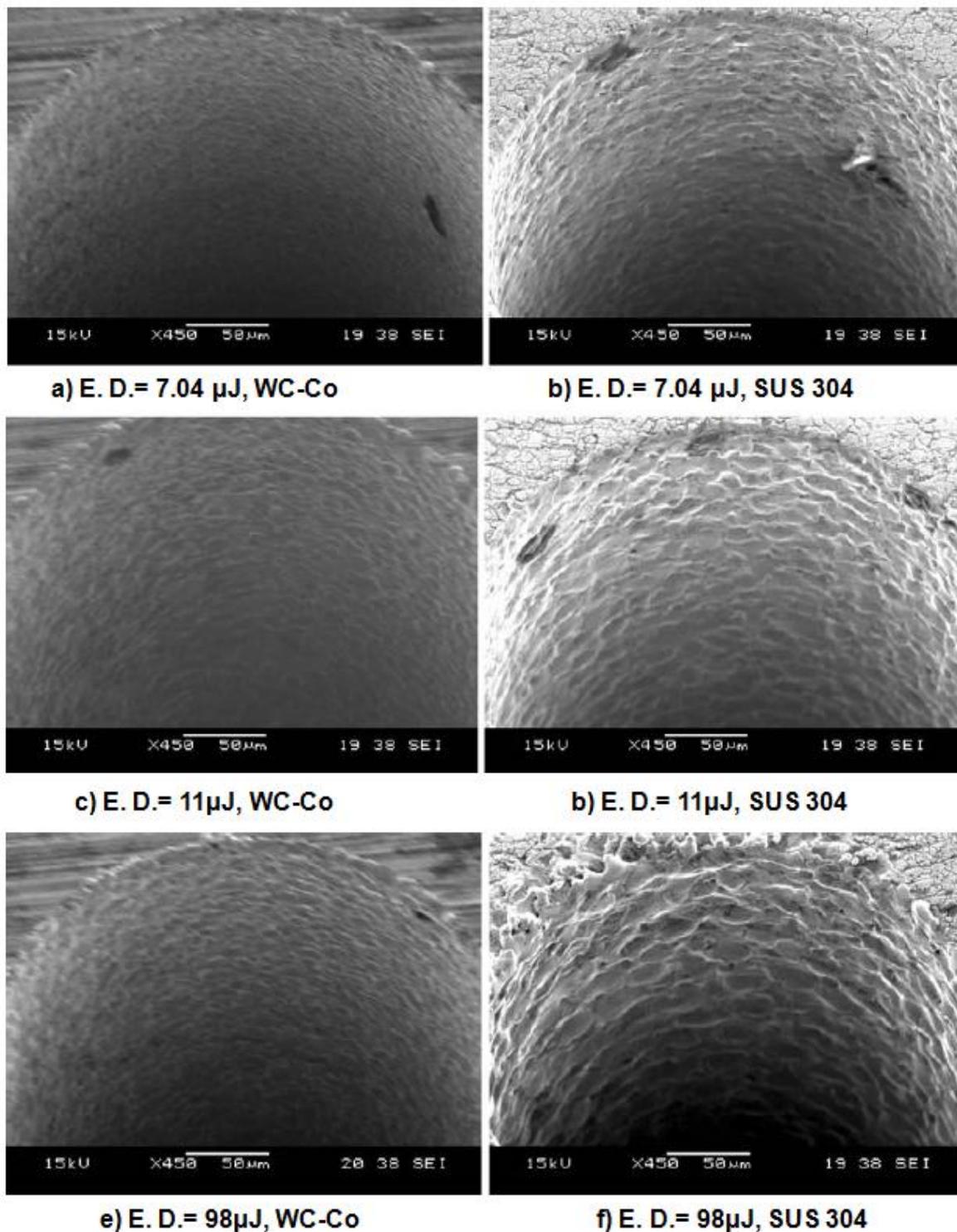


Figura 2. 18 Micrografías de barrido electrónico del borde de las micro perforaciones con distintos niveles de energía: a) WC-Co con 7.04 μJ; b) SUS 304 con 7.04 μJ; c) WC-Co con 11 μJ; d) SUS 304 con 11 μJ; e) WC-Co con 98 μJ; f) SUS 304 con 98 μJ;

En la Figura 2. 19 (a), (b), (c) y (d) muestran las microscopías de las entradas de las microperforaciones en el carburo cementado WC-Co y en el acero inoxidable SUS 304. Con niveles bajos de energía de descarga, se aprecia que las perforaciones en el SUS 304 presentan una mayor expansión en el diámetro de la entrada (ver Figura 2. 20). El sobre corte en el SUS 304 produce una disminución, en comparación con el WC-Co que tiene menor expansión del diámetro. Además, tiene menor ZAT, libre de rebabas y mayor calidad superficial en los bordes.

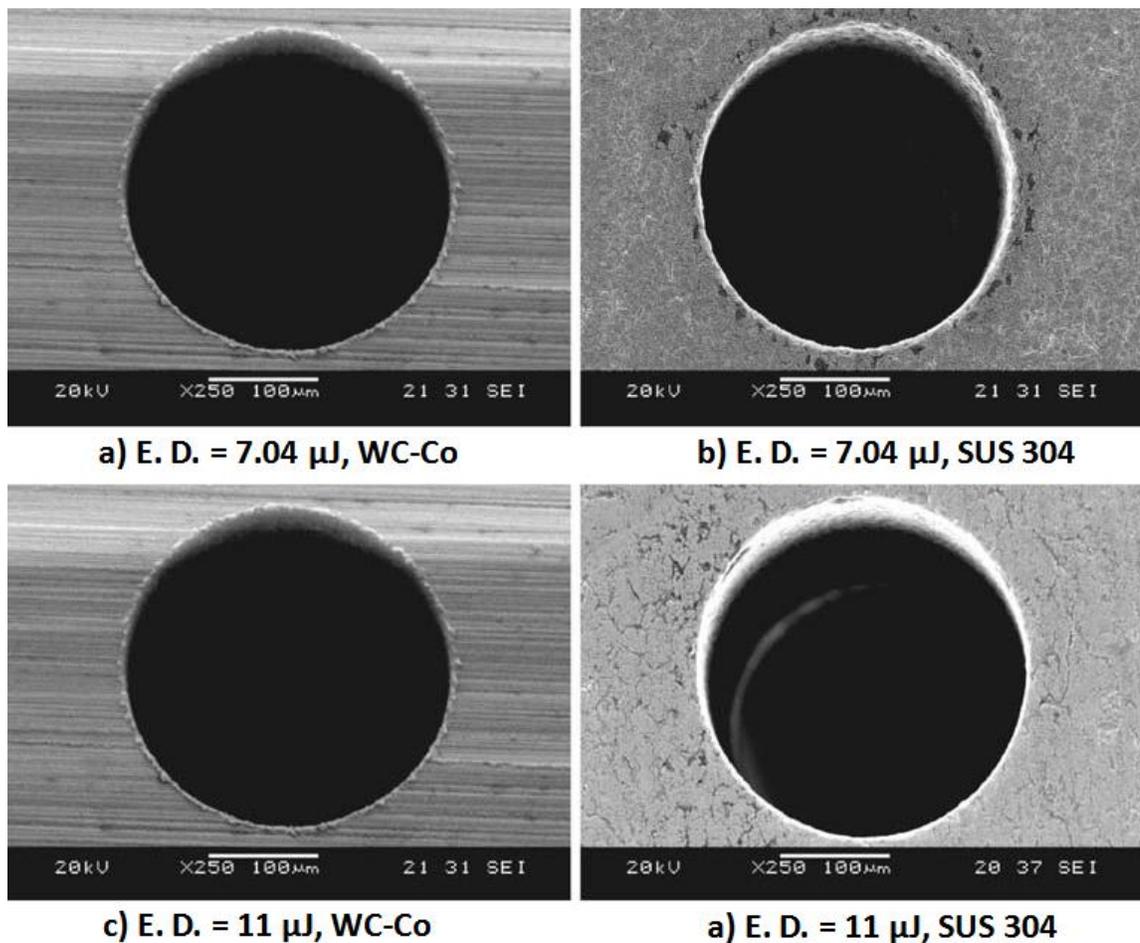


Figura 2. 19 Micrografías de la entrada en el WC-Co y SUS 304 con parámetros bajos de energía de descarga: a) WC-Co con 7.04  $\mu\text{J}$ ; b) SUS 304 con 7.04  $\mu\text{J}$ ; c) WC-Co con 11  $\mu\text{J}$ ; d) SUS 304 con 11  $\mu\text{J}$ ;

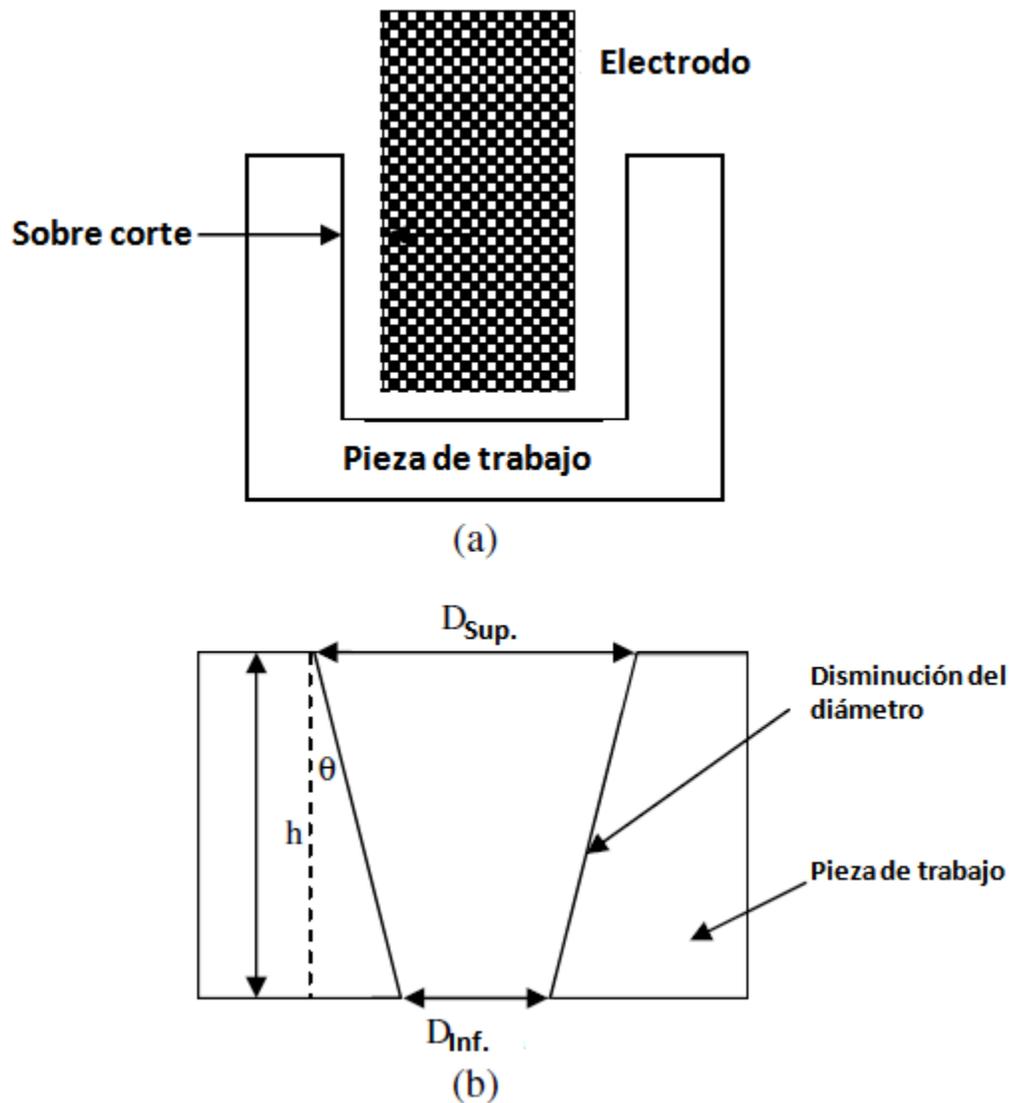


Figura 2. 20 Esquema de la sección transversal de las microperforaciones

En un análisis de la superficie después de las perforaciones se observa que en el acero SUS 304 hay un cambio significativo en la composición química de la superficie. El porcentaje de hierro disminuye significativamente y el carbono aumenta. Debido al fluido dieléctrico y del carbono del material fundido. Por otro lado, en el WC-Co se aprecia muy poca variación en la composición de la superficie después de las perforaciones.

En resumen, en el proceso de micro-EDM las propiedades térmicas del material tienen una gran influencia en la calidad y precisión de las perforaciones. En el caso del WC-Co presento mejor maquinabilidad que el acero SUS 304

#### ***2.3.4.3 Razón de desgaste del electrodo***

Como se ha estado mencionando, el proceso de remoción del material es causado por una serie de chispas eléctricas controladas entre la herramienta y la pieza de trabajo. La chispa eléctrica causa un aumento de la temperatura en la pieza de trabajo logrando la evaporación del material. Debido a la alta temperatura de la chispa, no solo la pieza de trabajo evapora material sino también del electrodo se evapora material. Este fenómeno se le conoce como razón de desgaste del electrodo (EWR por sus siglas en inglés).

La razón de remoción de material del electrodo es menor que de la pieza de trabajo. El desgaste del electrodo es un proceso similar al mecanismo de remoción de material como del que se produce en la pieza de trabajo, el cual se explicó anteriormente.

El desgaste del electrodo resulta de la pérdida del material de la superficie, lo cual causa la disminución de las medidas originales del electrodo, resultando en el decremento de la precisión en la forma de la cavidad. Durante el proceso de electroerosión se busca la máxima razón de remoción de material (MRR) con un mínimo de desgaste del electrodo (EWR).

Los materiales más usados para la elaboración de electrodos para el sistema EDM son: grafito, latón, cobre y aleaciones, tungsteno y aleaciones. Cada material presenta un desgaste diferente, inclusive tratándose del mismo material del electro al maquinar diferentes materiales de las piezas de trabajo. (23).

En el estudio realizado por Khan A. A. (23) determina la tendencia de desgaste de electrodos comunes de cobre y latón en el aluminio y acero dulce empleado el proceso de EDM. El análisis se realizó con el fin de comparar el comportamiento de electrodos de cobre y latón (Tabla 2. 9).

**Tabla 2. 9 Propiedades de los materiales (23)**

Electrodo	Conductividad térmica (W/m-°K)	Punto de fusión (°C)	Resistividad (ohm-cm)	Calor específico (J/g-°C)
Cobre	391	1083	1.69	0.385
Latón	159	990	4.7	0.38
Aluminio	227	660	2.9	0.9
Acero dulce	51.9	1523	1.74	0.472

Los experimentos se realizaron con un electrodo de 15 x 15 x 70 mm de cobre y latón en una máquina EDM Mitsubishi EX 22 modelo C11E FP60E, el fluido dieléctrico usado es queroseno, la composición de química de las piezas de trabajo se resume en la Tabla 2. 10. Los valores del experimento se muestran en la Tabla 2. 11

**Tabla 2. 11 Composición química del aluminio y acero dulce (23)**

Piezas de trabajo	Composición química
Aluminio	Al: 99.9%, Cu: 0.05%, Fe: 0.4%, Mg: 0.005%, Mn: 0.05%, Si: 0.25%, Zn: 0.05%
Acero dulce	Fe: 98.81 - 99.26 %, C: 0.14 - 0.2 %, Mn: 0.6 - 09 %, P: 0.04%, S: 0.05%

**Tabla 2. 10 Valores de los parámetros del experimento (23)**

Parámetros	Valores
Corriente (A)	2.5, 3.5, 6.5
Voltaje (V)	10, 5
Tiempo de encendido (µs)	3
Ciclo de trabajo	62.50%

Adicionalmente, el material se perforó de forma cuadrada con dimensiones de 15 x 15 mm y una profundidad de 3 mm. El desgaste del electrodo se presentó en la sección transversal y en los bordes de las esquinas, como se muestra en la Figura 2. 21

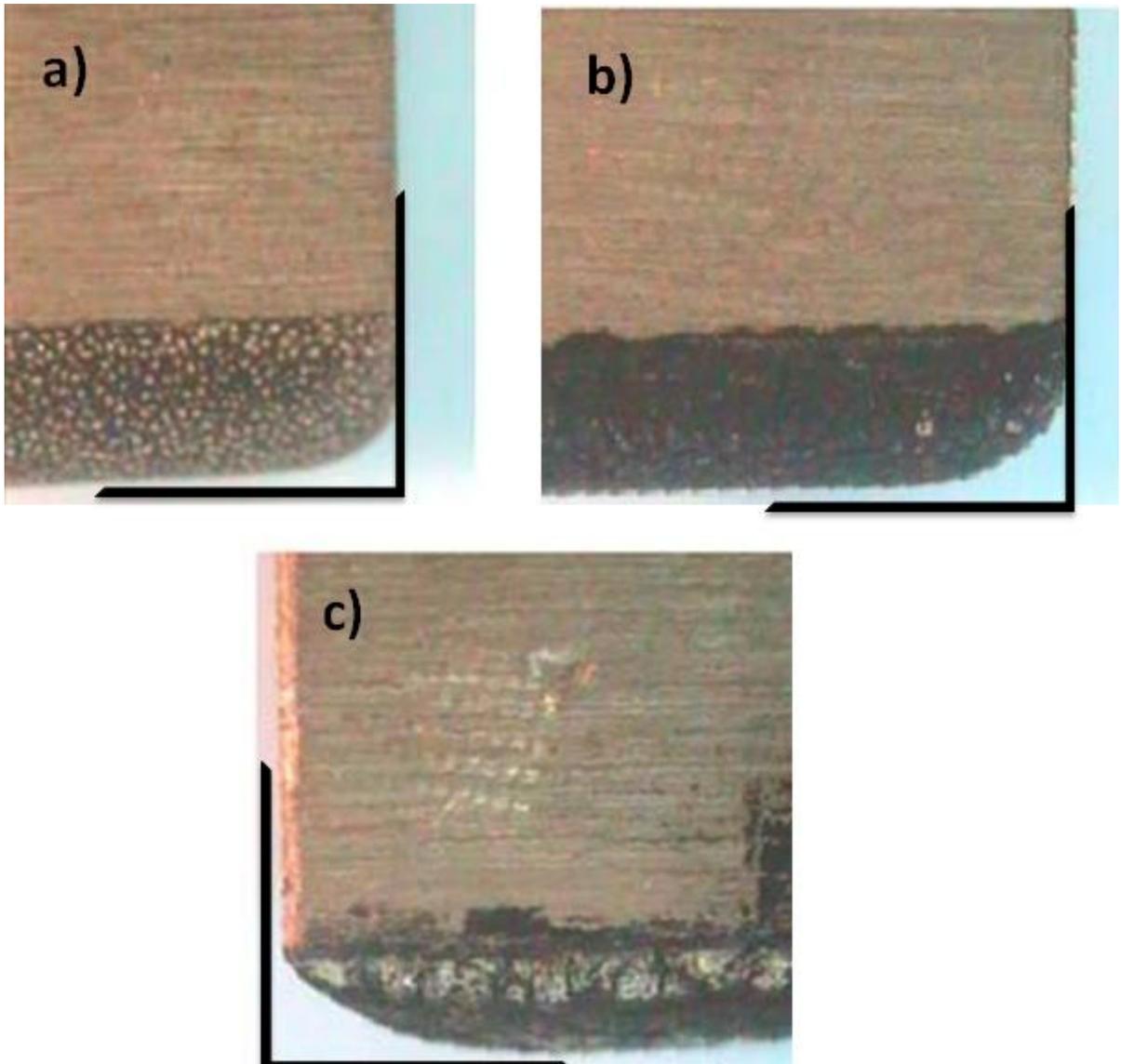


Figura 2. 21 Microscopia óptica del desgaste del electrodo de latón con la pieza de aluminio:  
a) corriente de 2.5 A; b) corriente de 3.5 A; c) Corriente de 6.5 A (23)

Se determinó que el aumento de la corriente acelera el desgaste de los electrodos. Esto es producido por una chispa con mayor calor y produce mayor cantidad de material removido del electrodo. También se observó que al aumentar el voltaje se incrementa el desgaste del electrodo, como se observa en a la Figura 2. 22. El mayor desgaste se llevó a cabo en la sección transversal que en la dirección longitudinal. Debido a que el calor producido en la dirección transversal no se logra disipar rápidamente como en que se disipa a lo largo del electrodo

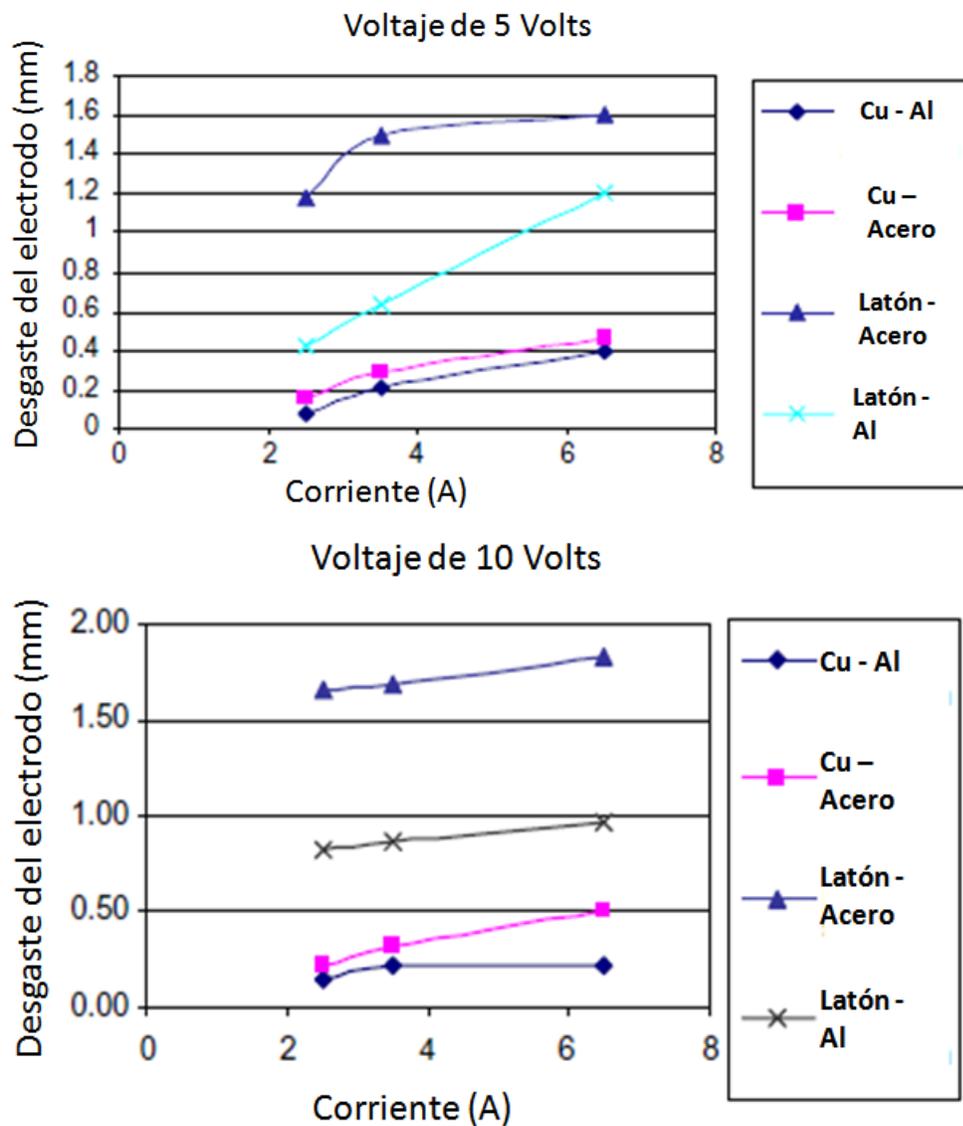


Figura 2. 22 Razón de desgaste de los electrodos de Cu y latón en función de la corriente y del voltaje

Comparativamente, el desgaste del electrodo de cobre es menor con respecto al de latón debido a la conductividad térmica del cobre (391 W/m-K). Este valor es dos veces mayor que la del latón (159 W/m-K). Por otra parte, esto es lo que facilita la transferencia de calor y, se disipa a través del electrodo. Adicionalmente, el punto de fusión del cobre (1083°C) es mayor que el punto de fusión del latón (990°C), lo que causa menor fusión y desgaste en el electrodo de cobre.

En la Figura 2. 22 se observa el acero maquinado con electrodos de cobre y latón. Khan A. A (23) sugiere que el desgaste de los electrodos se incrementa al usarlo sobre aluminio. Cabe mencionar que este fenómeno es causado por la conducción térmica del acero (51.9 W/m-K) que es cuatro veces menor que la del aluminio (227 W/m-K). Provocando que el calor generado durante el ciclo de trabajo no se disipe rápido en el acero. Este efecto causa que se incremente el desgaste de los electrodos de cobre y sobretodo en los de latón.

### **2.3.5 Ventajas y desventajas del proceso EDM**

Las ventajas que presenta el proceso de maquinado por electrodescargas, es la facilidad de maquinar materiales blandos y duros: carburos de tungsteno, aceros inoxidable, aceros dulces, aleaciones de cobre, de aluminio, entre otros. Se realizan maquinados muy complejos con el EDM que con otros procesos debido a que representan un alto costo y alto tiempo invertido. La velocidad de remoción de material está en función de la energía de descarga que se aplique y de igual manera el acabado superficial.

Otra ventaja que presenta es la simplicidad del equipo de EDM, no requiere de una fuerte sujeción de la pieza de trabajo durante el maquinado. Debido a que no se produce un esfuerzo de corte entre la herramienta y la pieza. Tiene además la facilidad de producir orificios cuadrados a comparación con los procesos convencionales.

El proceso de EDM presenta una serie de desventajas en el proceso de maquinado. Una de las cuales está relacionada a los efectos térmicos que deja en la superficie debido a las descargas de energía. Además, forma una capa de metal fundido y solidificado. Es importante mencionar que el dieléctrico al estar en contacto con el plasma, sus moléculas se rompen y el carbono de estas se deposita en la superficie del material. Las superficies hechas por el EDM tienden a aumentar su dureza, pero se vuelven frágiles y susceptibles al agrietamiento.

El acabado superficial como esta en función de la energía de descarga es inversamente proporcional, es decir, tiene mayor rugosidad al aumentar la energía. Resultando en menor tiempo de remoción. No obstante, al disminuir la energía, la superficie presenta menor rugosidad con el incremento del tiempo de maquinado.

El proceso está limitado al maquinado de materiales conductores debido a la polaridad de la pieza. Esto implica un alto desgaste del electrodo. Conllevando un costo por el cambio y puesta del mismo.

### **2.3.6 Componentes físicos de la máquina de EDM**

Una máquina típica EDM se asemeja a una máquina fresadora vertical del tipo de columna y ménsula con la bancada, el porta-electrodos en lugar de una flecha de cortador y con un tanque en la mesa para el fluido dieléctrico. Muchas máquinas EDM se han hecho por la conversión de máquinas de fresado verticales como se muestra en la Figura 2. 23. Se proporcionan ajustes de precisión en la dirección de los ejes de coordenadas. Generalmente, se usa el control CNC con retroalimentación y, es factible acoplarlo con cambiadores automáticos de plataformas y electrodos. De esta manera, el proceso se automatiza. Con la ayuda del CNC, a la pieza de trabajo se le da un movimiento lateral controlado (movimiento planetario con una amplitud de 10 a 100  $\mu\text{m}$ ). En las máquinas muy grandes la herramienta, se coloca en una platina en postes. Se proporcionan medios para circular y filtrar el fluido. (3)

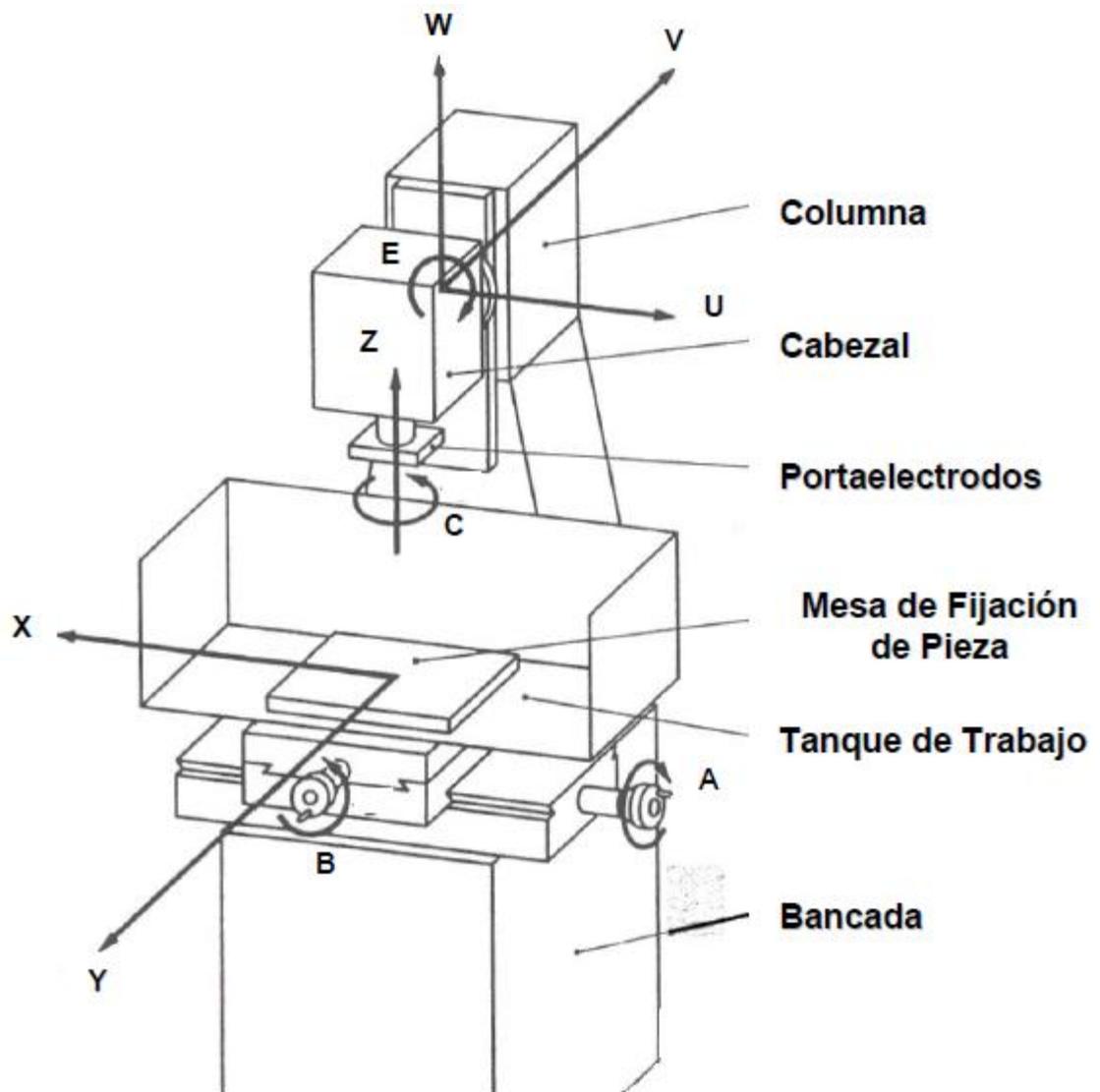


Figura 2. 23 Diagrama de una máquina de EDM y sus constituyentes (17)

## **2.4. Maquinado electroquímico (ECM)**

En este apartado se menciona el principio de funcionamiento del maquinado electroquímico, las investigaciones en torno a este proceso, limitaciones y ventajas y los efectos que tienen en los materiales. Con el fin de conocer la operación del proceso y determinar el comportamiento de remoción de material.

### **2.4.1 Introducción**

El maquinado electroquímico (ECM) es un proceso de desprendimiento de material no convencional para cortes de metales, en el cual se emplea energía eléctrica y química como herramientas de corte. Al igual que el EDM es un proceso independiente de la dureza del material y libre de virutas.

El ECM es implementado en la industria aeroespacial debido a que logra formas muy complejas de materiales con alta dureza. Adicionalmente, ofrece un mejor acabado superficial con respecto a aquellos componentes críticos que dependen de la integridad de la superficie. El proceso ECM ha sido reconocido como un proceso de alta precisión con un alto acabado superficial. (24)

En comparación con el proceso EDM, la remoción del material se realiza fundiendo y evaporando el material por la generación de energía calorífica. En contraste, con el maquinado electroquímico que remueve el material por la disolución química y por medio de un líquido electrolítico. Este mecanismo de remoción está basado en la reacción iónica de la superficie del material. (25)

La herramienta de corte es un electrodo fijo con una forma definida de la cavidad negativa de la pieza de trabajo. En este caso, el desgaste de la herramienta es poco debido a que no realiza esfuerzo de corte sobre la pieza de trabajo.

## 2.4.2 Descripción del proceso

El proceso de maquinado electroquímico está basado en el principio de la electrólisis. El circuito eléctrico es conectado a una fuente de corriente directa (CD), para polarizar la pieza de forma positiva (ánodo) y la herramienta en forma negativa (cátodo), una corriente circula a través del cátodo y ánodo que se encuentran separados a una distancia, comúnmente llamada GAP, un electrolito de nitrato sódico o cloruro de sodio es bombeado a través del GAP.

Al hacer circular la corriente eléctrica, se liberan iones metálicos de la pieza de trabajo. El metal desprendido se combina con la solución electrolítica formando lodos de hidróxidos o cloruros metálicos. Durante el maquinado electroquímico ocurren reacciones entre el ánodo, el cátodo y el electrolito.

Generalmente en perforaciones sobre sustratos de acero, se emplea un electrolito de solución de sal neutra: cloruro de sodio (NaCl). El agua y el electrolito se ionizan cuando se aplica un diferencial de potencial. Las siguientes reacciones químicas resumen las etapas de disociación química de los reactantes:



Al aplicar una corriente a la pieza de trabajo (ánodo) y a la herramienta (cátodo), los iones positivos se mueven hacia la herramienta y los iones negativos hacia la pieza de trabajo.

Los iones de hidrógeno retiran electrones del cátodo (herramienta) y se forma gas de hidrógeno:



Similarmente, los átomos de hierro se desprenden del ánodo (pieza de trabajo):



En el electrolito los iones de hierro se combinan con los iones de cloro para formar cloruros de hierro (II) (cloruro ferroso), similarmente los iones de sodio se combinan con los iones hidroxilos para formar hidróxido de sodio.



Los productos de reacción que precipitan son  $FeCl_2$  y  $Fe(OH)_2$ . Este fenómeno electroquímico opera conforme la pieza de trabajo es erosionada gradualmente. Es importante mencionar que el electrodo no se desgasta, sólo el gas de hidrógeno cubre la superficie del electrodo. En la Figura 2. 24 representa esquemáticamente las reacciones que ocurren durante el proceso electroquímico. El material es removido por la disolución a nivel atómico, por esa razón la superficie tiene un acabado libre de esfuerzos residuales del maquinado. (26)

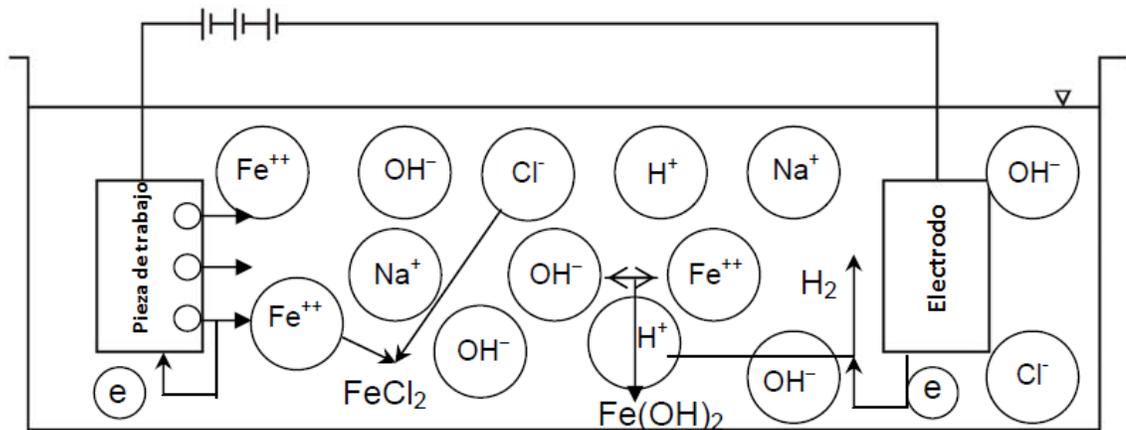


Figura 2. 24 Representación esquemática de las reacciones dentro del electrolito (26)

### **2.4.3 Variaciones del proceso**

Para el proceso del maquinado electroquímico existe un tipo de variación del proceso.

#### ***2.4.3.1 Maquinado electroquímico pulsado (PECM)***

Se denomina maquinado electroquímico pulsado por sus siglas en inglés (PECM). Es una máquina clásica de maquinado electroquímico, el material se desprende mediante la electrólisis. Sin embargo, el generador suministra corriente pulsada. Empleando corrientes intermitentes se logran acabados superficiales con menor rugosidad que si se empleará la corriente de forma continua.

#### ***2.4.3.2 Micro maquinado electroquímico (EMM)***

El micro maquinado electroquímico (EMM por sus siglas en inglés) es un proceso de disolución anódica de metales maquinados de formas complejas y a una escala del orden de los micrómetros. Los EMM presentan buenos acabados superficiales menores a 1  $\mu\text{m}$  Ra de rugosidad, no presentan desgastes de las herramientas, y es un proceso libre de virutas.

### **2.4.4 Parámetros del proceso del ECM**

Para llevar a cabo el efecto de remoción de material el proceso está en función de los valores de los parámetros que se mencionan a continuación:

*Tipo de corriente:* en el maquinado electroquímico se emplea una corriente directa, con el objeto de ionizar la pieza de trabajo y el fluido electrolítico. De esa manera se realiza el desprendimiento de material de la pieza de trabajo.

*Voltaje:* La cantidad de tensión eléctrica con la cual opera la máquina

*Corriente:* Es el flujo de la carga eléctrica a través del tiempo que se suministra al sistema electroquímico.

*Densidad de Corriente:* Es la cantidad de corriente eléctrica suministrada en una determinada área de contacto.

*Separación de la pieza de trabajo (GAP):* Espaciamiento entre el electrodo y la pieza de trabajo, en el cual se hace fluir el electrolito.

*Electrolito:* El fluido que contiene iones libres, los cuales se comportan como un medio conductor eléctrico. Provee los compuestos que se combinan con el material de trabajo removido.

*Concentración del electrolito:* Se le conoce como la porción o relación que hay entre la cantidad de soluto dentro de la cantidad de un solvente

*Flujo de alimentación del electrolito:* Se define como la cantidad de fluido que es inyectado al proceso electroquímico. (26)

*Tiempo de encendido del pulso:* Es la duración de tiempo del orden de microsegundos en el cual la corriente eléctrica se hace circular por el electrodo y la pieza de trabajo. Únicamente para maquinado electroquímico pulsado "PECM".

*Tiempo de apagado del pulso:* Es la duración de tiempo del orden de los microsegundos del flujo de la corriente eléctrica a través del circuito eléctrico del electrodo y de la pieza da trabajo. Únicamente para maquinado electroquímico pulsado "PECM".

#### **2.4.4.1 Efectos de los parámetros del proceso ECM y PECM**

Dentro de la literatura (27) se hace mención que los parámetros del proceso tienen gran influencia en el acabado de las piezas. Sugieren que el principal elemento y de gran importancia para el proceso es el electrolito debido a que permite la reacción de corrosión y desintegración del material. El electrolito cumple otras dos funciones: 1) es la disipación de calor generado en el proceso y 2) se evitan los productos de las reacciones. Este último punto es importante debido a que evita la formación de una capa anódica en la superficie, causando que el sistema entre en corto circuito. En consecuencia, deteriora la herramienta.

La selección del electrolito está en función de la composición química del material. En este caso, este debe ser capaz de combinarse con los iones del metal y formar precipitados de óxidos e hidróxidos. Lo que conlleva a conocer las reacciones químicas del metal base con las del electrolito. Existen dos categorías para clasificar: 1) *El electrolito pasivo*. Son los que contienen generalmente sales como nitrato de sodio, clorato de sodio, etc. Conteniendo aniones oxidantes que proporcionan mayor precisión del maquinado, además aseguran la disolución de la pieza de trabajo y no afecta a la herramienta. 2) *El electrolito no pasivo*. Se caracterizan por tener aniones relativamente agresivos como lo es el cloruro de sodio. Se eligen electrolitos ácidos, debido a que no producen productos insolubles en la reacción de disolución.

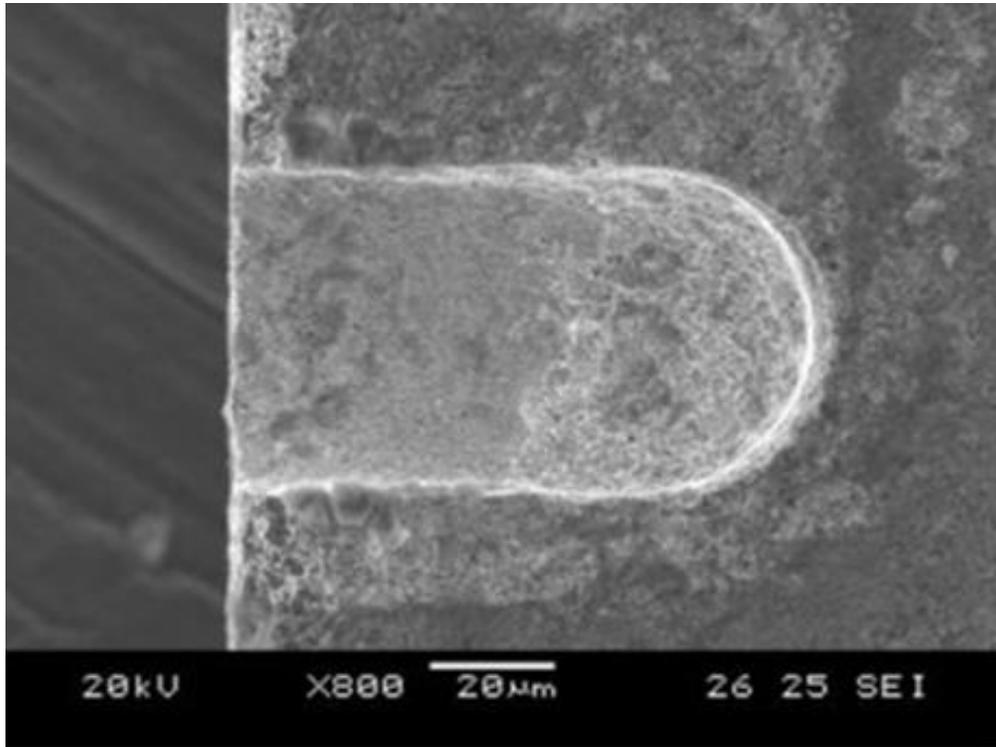
De esto mismo deriva la concentración del electrolito en caso de que se tenga que hacer una mezcla. Se emplean mezclas cuando se utiliza una pieza de trabajo de un material aleado, y que una de las fases presentes sea insoluble. Con una mezcla con la concentración adecuada se consigue mayor eficiencia en la disolución del material y mejor acabado superficial.

La corriente y el voltaje tienen una influencia directa con la disolución del material, es decir, al aumentar la corriente en el sistema se incrementa la MRR, y de igual forma al aumentar el voltaje se incrementa la MRR. Para cada tipo de material se requiere que se ajusten estos parámetros teniendo en cuenta la geometría del electrodo y el área de contacto, resultando en una mejor distribución de la corriente en el área de contacto.

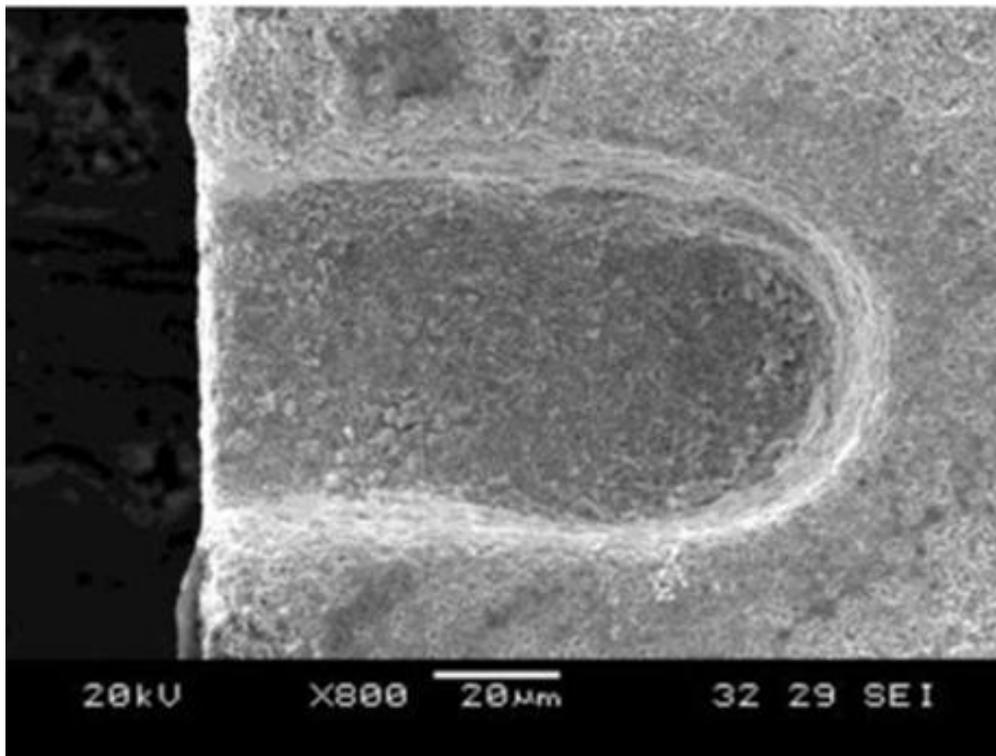
Para obtener superficies con un acabado suave, se requiere una cantidad de densidad de corriente adecuada. Si la corriente es muy elevada, causa la formación de la zona afectada térmicamente, resultando una superficie con baja precisión y con mayor rugosidad. En investigaciones (24), (26), (28) se determina un rango aceptable del voltaje entre 2 y 30 volts obtienen una MRR óptima.

Kim S. H. (28) investigó el maquinado electroquímico pulsado en un carburo de tungsteno con cobalto. El desarrollo de la experimentación empezó con la determinación del electrolito adecuado para el carburo de tungsteno y, en base a investigaciones anteriores, se eligió el de nitrato de sodio para disolver el carburo de tungsteno y el ácido sulfúrico para disolver el cobalto (Figura 2. 26). Se hizo una mezcla del nitrato de sodio y del ácido sulfúrico a una porción de 0.5 M y a 0.2 M respectivamente.

La investigación mostró que al usar únicamente el nitrato de sodio la superficie del área maquinada presentaba la formación de óxidos de cobalto (Figura 2. 25 (a)), deteriorando así la calidad de la superficie, además, se demostró que el nitrato de sodio no es capaz de disolver al cobalto. Usando ácido sulfúrico como electrolito, se forma óxidos de tungsteno en la superficie (Figura 2. 26 (b)). Lo anterior muestra que es incapaz de disolver el tungsteno. Sin embargo, una mezcla de ambas sustancias es capaz de disolver ambos metales con la concentración antes mencionada.

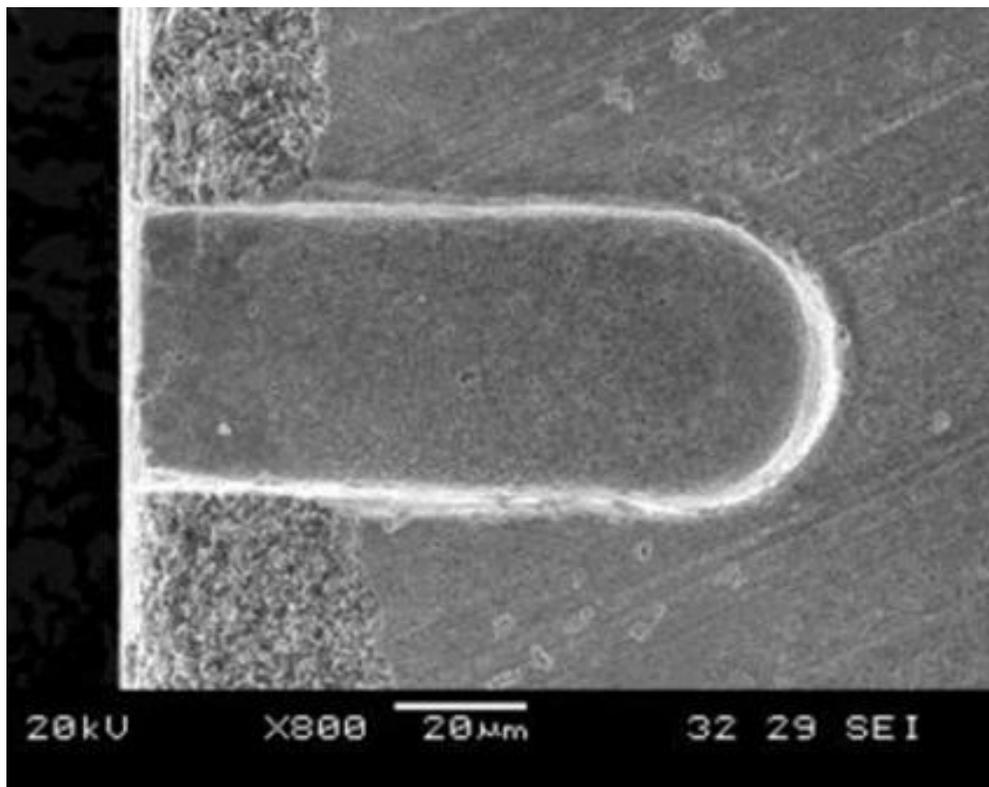


a)

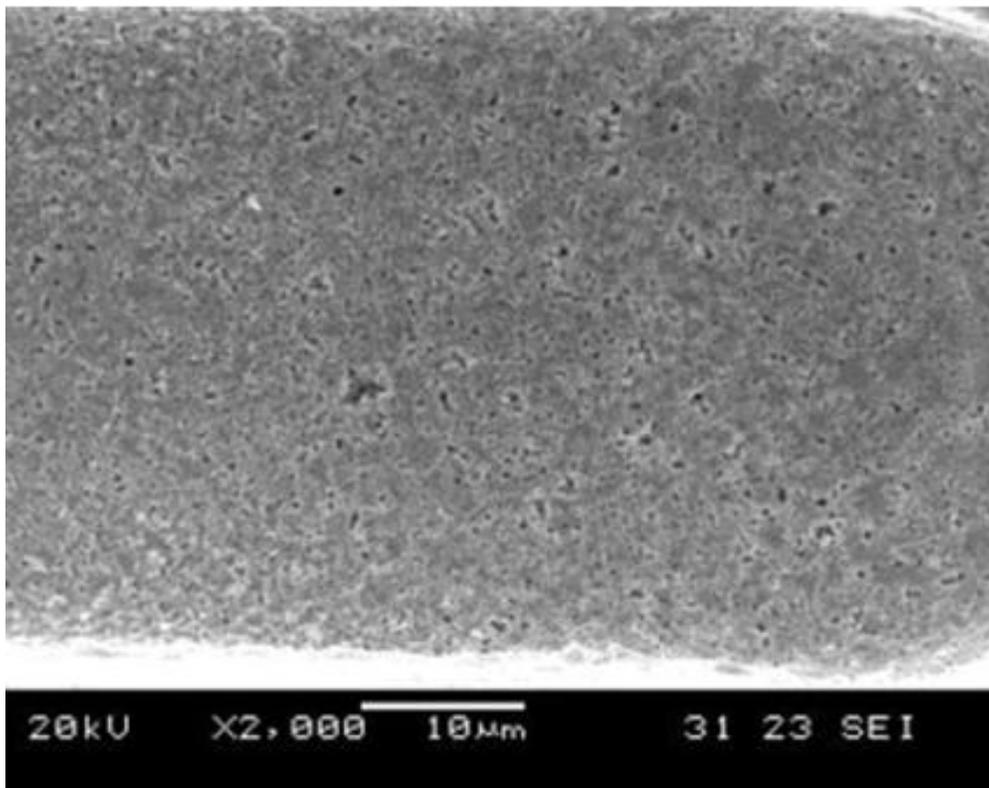


b)

Figura 2. 25 Micrografía de electrones secundarios de la ranura del maquinado electroquímico: Potencial de la pieza de trabajo:  $-0.4\text{ V}$ ; Amplitud del pulso:  $8\text{ V}$ ; Duración del pulso:  $100\text{ ns}$ ; a) Electrolito: nitrato de sodio al  $0.5\text{ M}$ ; b) Electrolito: ácido sulfúrico al  $0.2\text{ M}$  (28)



a)



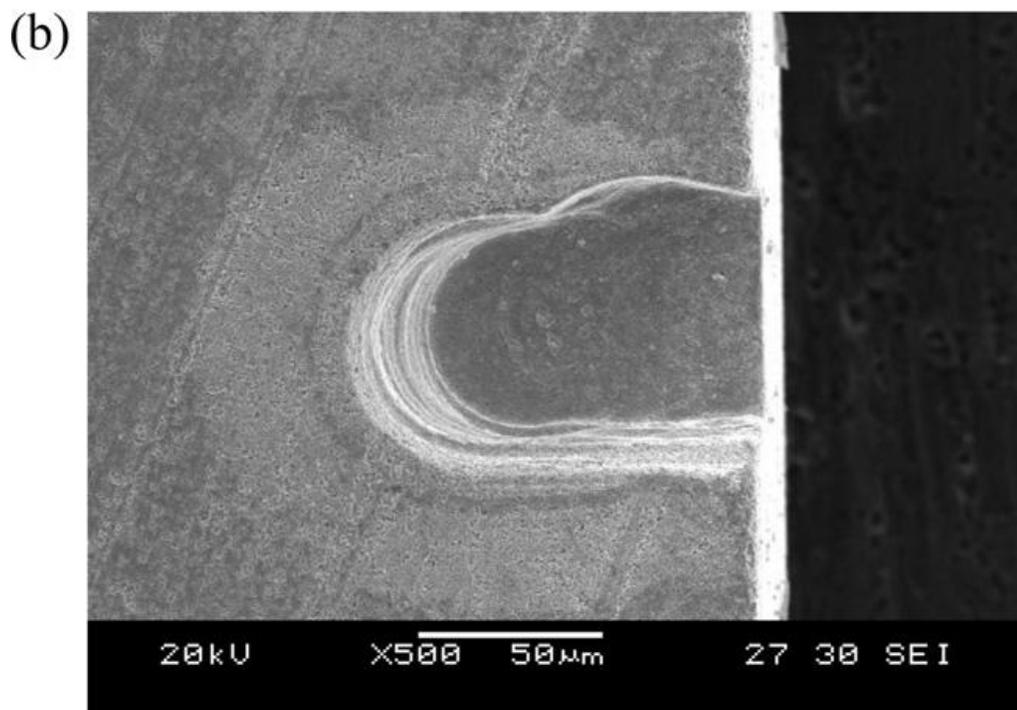
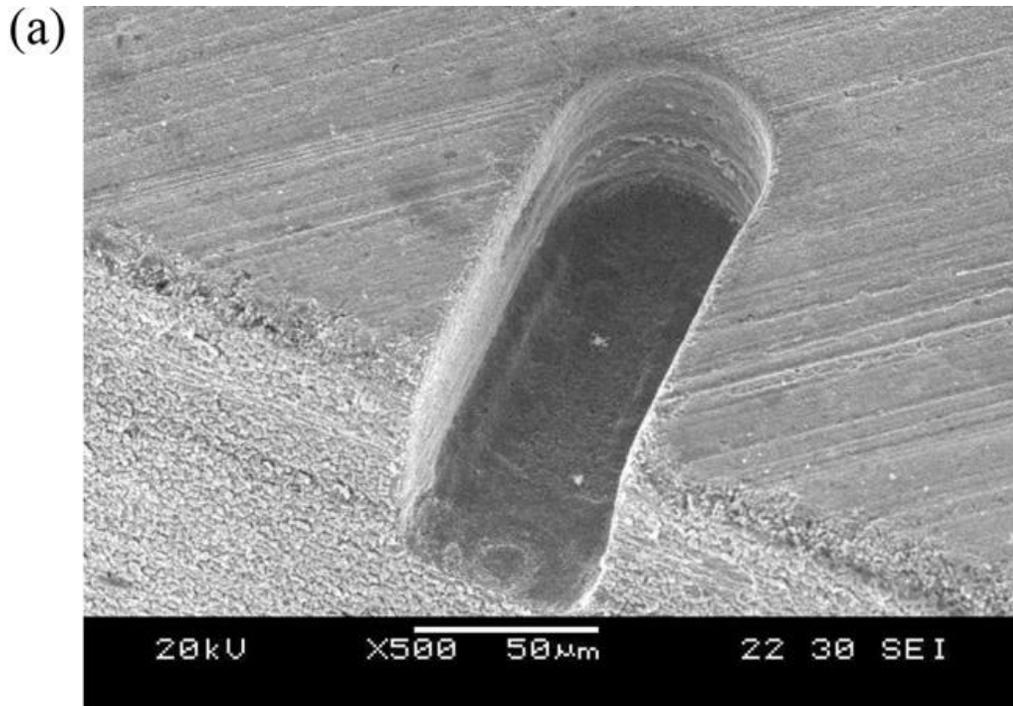
b)

Figura 2. 26 a) Micrografía de electrones secundarios de la ranura del maquinado electroquímico b)acercamiento de la micrografía: Potencial de la pieza de trabajo: -0.4 V; Amplitud del pulso: 8V; Duración del pulso: 100ns; mezcla del electrolito: nitrato de sodio al 0.5 M y ácido sulfúrico al 0.2 M (28)

A una concentración menor de 0.2 M de nitrato de sodio se presenta una baja MRR y baja calidad superficial. Debido a que no previene la formación de óxidos de tungsteno, resultando en un acabado superficial bajo. En contraste, en el maquinado utilizando la concentración del electrolito mayor de 0.5 M de nitrato de sodio, el acabado superficial no varía. Por lo tanto, la concentración adecuada para maquinar el WC-Co es una mezcla del nitrato de sodio y de ácido sulfúrico a una porción de 0.5 M y a 0.2 respectivamente ( Figura 2. 27 a y b).

En un estudio de Hewidy (24) demuestra la influencia que tiene el voltaje y la velocidad de avance de la herramienta con respecto a la remoción de material. Bajo un modelo matemático predice el comportamiento que tendrá en el sistema ECM al maquinar cualquier material. El modelo es comparado con el maquinado de un acero de medio carbono, empleando un electrolito de cloruro de sodio con una concentración de 200 gr/l.

En la Figura 2. 28 se muestran los efectos de remoción de material en función del voltaje y concentraciones molares de los electrolitos de nitrato de sodio. Al incrementar el voltaje aplicado a la pieza de trabajo se aumenta la cantidad de material removido, esto se atribuye al incremento de la densidad de corriente. Las velocidades de avance de la herramienta también tienen un papel importante en la remoción del material, también, se observa en la misma figura que existe mayor remoción con una velocidad lenta que con una velocidad mayor.



**Figura 2. 27** Micrografía de electrones secundarios de la ranura del maquinado electroquímico a) Electrolito de nitrato de sodio al 0.5M y ácido sulfúrico al 0.2M b) Electrolito de nitrato de sodio al 0.2M y ácido sulfúrico al 0.2M: Potencial de la pieza de trabajo: -0.4V; Amplitud del pulso: 8V; Duración del pulso: 100ns; Diámetro del electrodo: 45µm. (28)

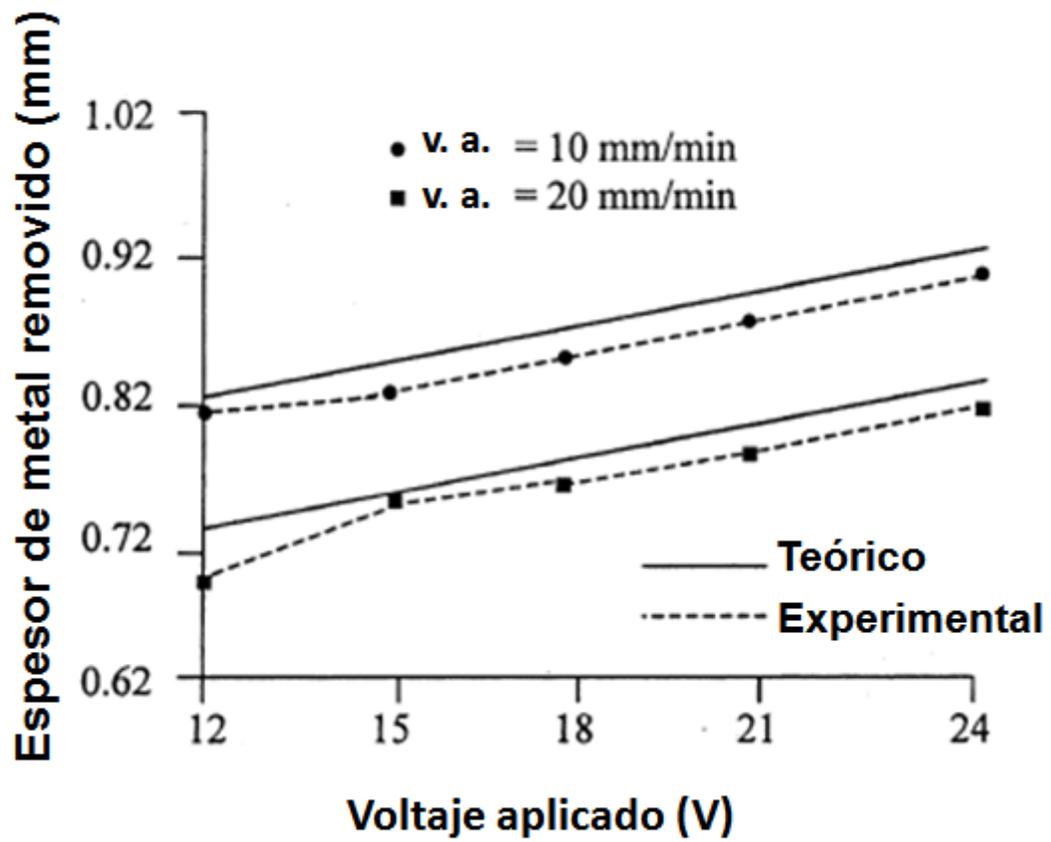


Figura 2. 28 Efectos de la aplicación del voltaje en el espesor de metal removido con diferentes velocidades de avance de la herramienta. (24)

### **2.4.5 Ventas y desventajas del proceso ECM**

El proceso ECM al igual que el EDM se caracterizan por maquinar materiales duros como son: carburos de tungsteno, aceros grado herramienta, aleaciones base níquel, etc. sin importar la complejidad de la forma de maquinado. Por otra parte, el ECM no genera calor durante el maquinado, lo cual es benéfico para las piezas que son susceptibles a distorsiones térmicas.

Otro beneficio del proceso es que la herramienta de trabajo (electrodo) no presenta desgaste significativo durante el proceso de remoción de material. Por ende, se mantienen las dimensiones del electrodo después de varios ciclos de trabajo, además, se obtiene un acabado superficial menor a  $1 \mu\text{m Ra}$  de rugosidad. El proceso ECM es recomendado para maquinar piezas de trabajo delgadas sin que presenten distorsión. Debido a que la herramienta de corte no ejerce presión sobre la superficie de la pieza para realizar el corte.

El inconveniente del proceso ECM, es que se debe de conocer la reacción química que produce la ionización del electrolito. Esto con el fin de de remover eficientemente los elementos de la aleación. El ECM es un proceso lento cuyo avance es de 10 mm/min. El aumento de la energía para acelerar la remoción del material incrementa la rugosidad de la superficie.

Otra desventaja del proceso es que está limitado a materiales conductores, Sin embargo, es factible reducir esta desventaja cerrando el circuito de alguna manera entre el electrodo y la pieza.

# **CAPÍTULO 3:**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE LA**

### **BIBLIOGRAFÍA**

En el presente capítulo se mencionara los puntos más relevantes del capítulo anterior, dividido en dos partes principales; 1) el proceso por el cual se remueve el material en el EDM y ECM y 2) los efectos que tienen lugar en el metal base al ser maquinados con los dos procesos antes mencionados.

#### **3.1 Proceso de electroerosión y maquinado electroquímico.**

Los procesos de electroerosión y maquinado electroquímico están considerados como procesos no convencionales. Estos dos procesos se emplean ampliamente para maquinar los materiales con un alto grado de dureza, como lo son las aleaciones de carburos de tungsteno, aceros grado herramienta, aleaciones de níquel, aleaciones de titanio, etc. debido a que son independientes con la dureza del material.

El maquinado por electroerosión y electroquímico facilita la manufactura de componentes en formas complejas, usando una sola herramienta a comparación de otros procesos de maquinado que requieren más de 2 herramientas para dar forma final.

En la Tabla 3. 1 se muestran las similitudes y diferencias de los dos procesos, en cuanto a su funcionamiento los dos procesos difieren en la remoción del material.

**Tabla 3. 1 Elementos constituyentes de los procesos de electroerosión y electroquímico**

	<b>EDM</b>	<b>ECM</b>
<b>Fuente de poder</b>	<b>Fuente CC</b>	<b>Fuente CC</b>
<b>Herramienta</b>	<b>Electrodo</b>	<b>Electrodo</b>
<b>Material de la herramienta</b>	<b>Grafito, Tungsteno y sus aleaciones, Cobre y sus aleaciones</b>	<b>Grafito, Tungsteno y sus aleaciones, Cobre y sus aleaciones</b>
<b>Fluido de trabajo</b>	<b>Dieléctrico</b>	<b>Electrolito</b>
<b>Sistema de posicionamiento</b>	<b>CNC</b>	<b>CNC</b>
<b>Polaridad de la herramienta</b>	<b>Negativa</b>	<b>Negativa</b>
<b>Polaridad de la pieza de trabajo</b>	<b>Positiva</b>	<b>Positiva</b>
<b>Principio de operación</b>	<b>Erosión por descargas eléctricas</b>	<b>Dilución por agentes químicos</b>
<b>Otros Equipos</b>	<b>Generador de pulsos</b>	<b>Generador de pulsos, Herramienta giratoria</b>

El funcionamiento del EDM en la remoción del material es por medio de pequeñas chispas eléctricas controladas (en tiempo e intensidad de corriente), que funden y evaporan el metal base de la superficie. El fluido de trabajo, en este caso es un dieléctrico, cumple con dos funciones; 1) producir una resistencia al flujo de la corriente eléctrica y de ese modo se formen las chipas eléctricas en la superficie y 2) el dieléctrico atrapa al metal fundido solidificándolo en partículas esféricas, además disipa el calor (16), (17).

En contraste con el proceso ECM, la remoción del material es mediante la desintegración de la superficie, con la ionización de un electrolito y de la pieza de trabajo, estos al estar bajo un diferencial de potencial, las partículas de ambos se separan en forma de iones libres, posteriormente reaccionan los iones positivos con los negativos, para finalmente precipitarse en formas de lodos. (26)

### **3.2 Efectos del EDM y ECM en el material maquinado**

Hablando del proceso EDM, los efectos sobre la superficie de los materiales son varios, entre los que se encuentran la formación de una capa de metal fundido, que no fue capaz de desprenderse del metal base, esta capa es característica de cualquier variación del proceso EDM, el espesor de la capa está en función principalmente de la cantidad de energía y la frecuencia de los pulsos. Otro efecto que va de la mano con la formación de la capa de metal fundido, es la zona alterada térmicamente, la cual se forma al absorber y disipar el calor del metal fundido de la superficie, también el espesor de esta capa depende de la cantidad de energía que se suministre. (18)

Las chispas eléctricas que producen la remoción del material dejan una huella característica en forma de cráter, a lo largo de la superficie de corte varía la profundidad de los cráteres, dando como consecuencia una superficie rugosa, en la literatura (19), (20), la rugosidad varía de 1 a 64  $\mu\text{m}$  Ra, estos valores dependen de los parámetros de maquinado. Otro fenómeno que se aprecia en el proceso de maquinado EDM, es el desgaste del electrodo o herramienta de trabajo, en la literatura (22) se encuentra restos del electrodo en la superficie de la perforación. De igual forma en el mismo artículo se menciona que un dieléctrico en base a aceite se descompone, debido al alto calor generado, el carbono del dieléctrico es atrapado y disuelto en la superficie del metal base aumentando la dureza del área de corte, aumentando la probabilidad de agrietamiento.

En el proceso ECM no se registran el mismo número de efectos que tiene sobre el material, lo más relevante que cabe mencionar es el efecto de la disolución del electrolito en la superficie del material. Se debe conocer la composición química del material que se va a maquinar, con el fin de elegir el tipo de electrolito adecuado que oxide y reduzca la superficie del material, de esa manera se evita que la superficie quede rugosa. Los electrolitos se clasifican en dos grupos (27), 1) los electrolitos pasivos, que usan sales disueltas en un líquido para crear aniones y así remover el material; 2) los electrolitos no pasivos, son sustancias generalmente ácidas cuyos aniones son más reactivos además, disuelven compuestos que con los pasivos no son capaces de disolver. Se combinan ambos tipos de electrolitos con el fin de disolver la matriz del material y los precipitados que se encuentren dentro de esta. (28)

La literatura (26) reporta que la rugosidad del ECM es alrededor de  $1 \mu\text{m}$  Ra, la cual es obtenida por la corriente suministrada y el electrolito empleado, al aumentar la corriente se generan zonas alteradas térmicamente y se ve reflejado en el aumento de la rugosidad (24), (28). Siendo el proceso ECM con menos efectos secundarios sobre el material en comparación con el EDM.

### **3.3 Factibilidad de hibridación**

Ambos procesos son factibles de hibridar al hacerlos operar de forma secuenciada, ya que se componen de los mismos elementos que se mencionan en la Tabla 3.1, pero tienen principios de operación que no son compatibles para hacerlos operar simultáneamente. En la literatura (29) se reporta una maquina que ha hibridado los procesos EDM y ECM.

En la hibridación de los dos sistemas se emplea un generador de tipo resistencia-capacitivo para generar un voltaje pulsado de alta frecuencia, un electrodo de tungsteno como herramienta, y un fluido de trabajo que presenta la dualidad de ser un electrolito y un dieléctrico (agua desionizada), esta dualidad se debe a la baja resistencia que presenta el agua desionizada y a la variación del potencial y GAP que hay entre la pieza y la herramienta, es decir, en el sistema híbrido la herramienta se encuentra a una separación dada y el agua actúa como dieléctrico propiciando los saltos de chispas, la pieza se erosiona y el GAP se va a ir incrementando hasta el punto que no se van a producir saltos de chispas, el diferencial de potencial permanece en el mismo valor lo que hace que el agua desionizada actúe como conductor de corriente produciendo iones libres, es en este momento que el sistema empieza a remover material por el principio electroquímico del ECM, acercando nuevamente la herramienta el ciclo empieza nuevamente con el EDM.

En cuestión de los parámetros el sistema varía solo para la fase del ECM, cuyos valores de potencial eléctrico deben de ser mayores comparados con un ECM convencional, también, el flujo del fluido debe ser disminuido considerablemente para que sea capaz de actuar como electrolito. Los efectos que tiene este proceso híbrido en el material cortado es una mezcla de los efectos antes mencionados del EDM y ECM, la rugosidad producida por el EDM es suavizada por la fase del proceso ECM, la superficie de los materiales presenta incrementos de oxígeno debido a la descomposición del agua durante la fase EDM. Como se ha comprobado existe la factibilidad de la hibridación de los dos sistemas de corte EDM y ECM.

# CAPÍTULO 4:

## CASO DE ESTUDIO

A continuación se describe brevemente el desarrollo experimental del corte de aceros por EDM empleando hilo de alambre: Es importante mencionar que este estudio está enfocado del efecto del corte sobre la rugosidad del acero y la microestructura.

### 4.1 Metodología

El desarrollo experimental en este caso de estudio se llevó a cabo en tres etapas, las cuales son las siguientes:

Etapa 1: *Adquisición de materiales, equipo y caracterización de muestras.* La adquisición de los materiales consisten en el tres clases de aceros de alta resistencia: 1) Acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA), 2) Acero de doble fase (DP), 3) Acero de transformación plástica inducida (TRIP). Se caracteriza una muestra de los tres tipos de aceros antes de cortarlas por W-EDM

Etapa 2: *Procesos de corte por EDM.* Se cortan los aceros bajo los parámetros preestablecidos por el equipo de W-EDM. Posteriormente se

caracterizaron las muestras con el fin de ver los cambios microestructurales y compararlas con las muestras no cortadas por el W-EDM.

Etapa 3: Evaluación de las zonas de corte por perfilometría, microdureza, e inspección de las muestras por técnicas de microscopio óptico y microscopía electrónica de barrido.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se esquematiza el desarrollo experimental del caso de estudio.

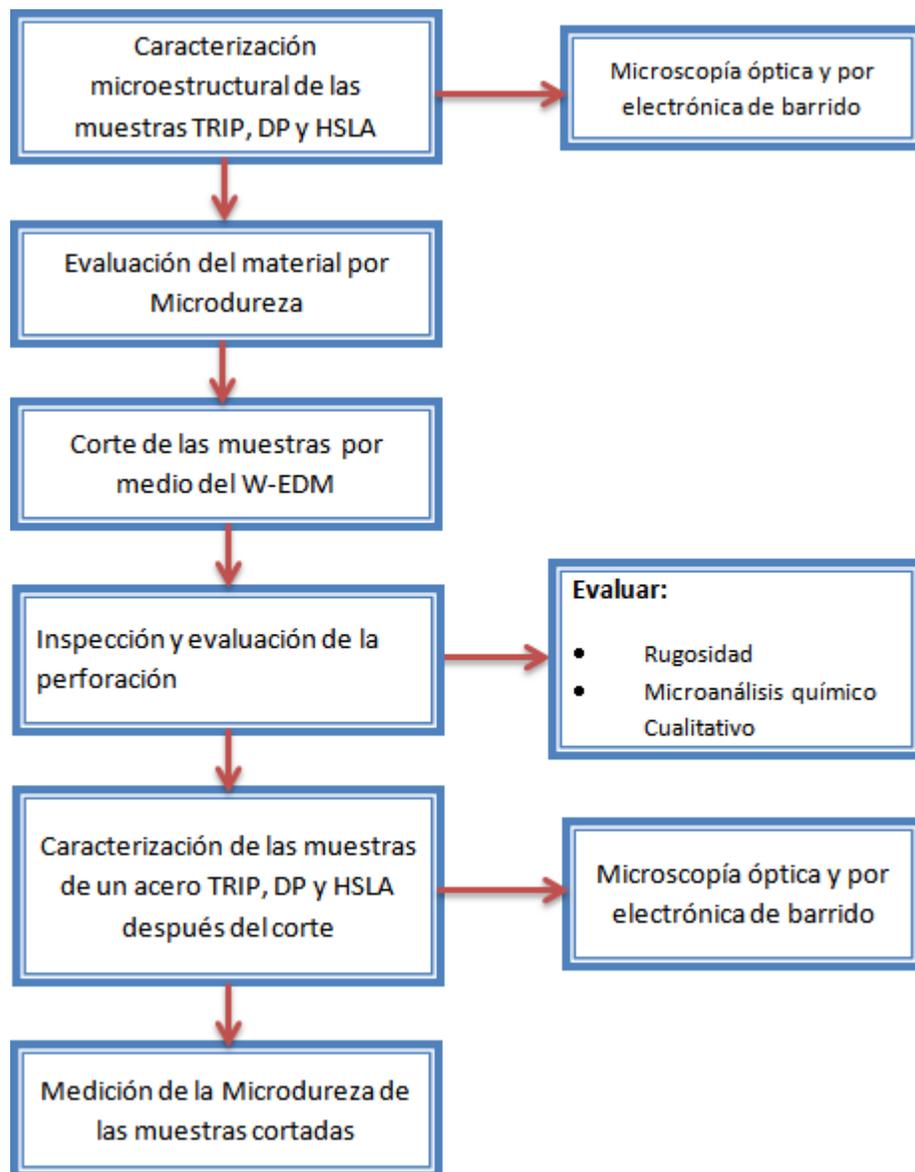


Figura 4. 1 Diagrama de flujo para el caso de estudio.

## 4.1.1 Adquisición de materiales, equipo y caracterización de muestras

### 4.1.1.1 Material

Se emplearon tres tipos de aceros de alta resistencia: 1) Acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA, siendo proveído por la empresa MATELSA), 2) Acero de doble fase (DP), 3) Acero de transformación plástica inducida (TRIP), en la Tabla 4. 1 se muestra la composición química de los aceros.

Tabla 4. 1 Composición química de los aceros DP, HSLA y TRIP

Aceros	C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al	N	Otros
DP 600	0.120	0.500	1.400	0.085	0.008	0.02-0.06	0.001	Cr+Ni+Cu = 1.3
SAE 945X HSLA	0.190	0.900	0.800	0.040	0.050	---	---	---
TRIP	0.175	---	2.000	---	---	---	---	Al+Si = 2.00

Se utilizó un electrodo de latón en forma de alambre como herramienta de corte cuya identificación comercial es AC Brass 500 de un diámetro de 0.25mm. Adicionalmente, se usó agua desionizada por osmosis inversa como fluido dieléctrico.

El material para la preparación metalográfica de muestras, se utilizaron lijas, paños y alúmina de 1  $\mu$ m. baquelita y lucita para montar los especímenes cortados.

### 4.1.1.2 Equipo

Se empleó una máquina de electroerosión por hilo marca Charmilles Technologies Gevene modelo 290 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Empleando un electrodo de corte en forma de hilo de aleación de latón de 0.25 mm de diámetro.

Para la preparación de la metalografía de las muestras cortadas se utilizó una montadora marca Struers, se usó baquelita y lucita para montar las muestras, para desbastar y pulirlas se emplearon lijas y paño con alúmina de  $1\mu\text{m}$  en un equipo Struers Labopro-1 de velocidad fija.

Se empleó el reactivo químico nital 4. La observación de éstas se realizó con un microscopio óptico marca Leica MEF4M con diversos aumentos, y un microscopio electrónico de barrido y microanálisis por EDX marca CARL ZEISS NTS LTD modelo EVO 15-07-79.



Figura 4. 2 Equipo de electroerosión por hilo marca Charmilles Technologies Gevene modelo 290

#### ***4.1.1.3 Caracterización de las muestras antes del corte con el W-EDM***

Se cortaron un fragmento de los tres tipos de aceros y se montaron en frío para evitar cambios microestructurales de fases fuera de equilibrio. Una vez montadas se desbastaron con diversas lijas de carburo de silicio: 120, 240, 600, 800, 1200 grit. Se inspeccionaron en condición de pulido a espejo se llevó a cabo sobre paños y empleando pasta de diamante de  $1\mu\text{m}$  y, alcohol etílico para eliminar residuos de pulido, con el fin de inspeccionar la microestructura de cada uno de ellos.

### 4.1.2 Proceso de corte por EDM

Los aceros cortados con una máquina de electroerosión se utilizó un electrodo en forma de hilo de aleación de latón y agua desionizada con por osmosis inversa, los parámetros de la máquina se muestran en la Tabla 4. 2. Los cortes que se realizaron en el material a lo ancho de las placas se ilustran en la Figura 4. 3.

Tabla 4. 2 Parámetros del proceso de corte del W-EDM usados en los tres tipos de aceros

Aceros	HSLA	DP 600	TRIP
cantidad de cable que se utiliza	7	7	7
número del material utilizado para la pieza	6	6	6
Estrategia (condiciones de procesamiento automático de arranque)	1	1	1
Modo (desbaste, acabado, ....)	21	21	21
Voltaje de funcionamiento (V)	-80	-80	-80
Interruptor de impulso de corriente (1/2A)	8	8	8
Tiempo entre dos impulsos (microsegundos)	14.8	18	18
Duración del pulso (microsegundos)	0.8	0.8	0.8
Tiempo de pulso corto (microsegundos)	0.4	0.4	0.4
Promedio de referencia de voltaje (V)	42	42	42
Velocidad máxima de avance (mm/mim)	73.2	73.2	73.2
Presión de Inyección (bares)	2	2	2
Tensión del alambre (daN)	10	10	10
Velocidad de alimentación de alambrel (m / min)	8	8	8

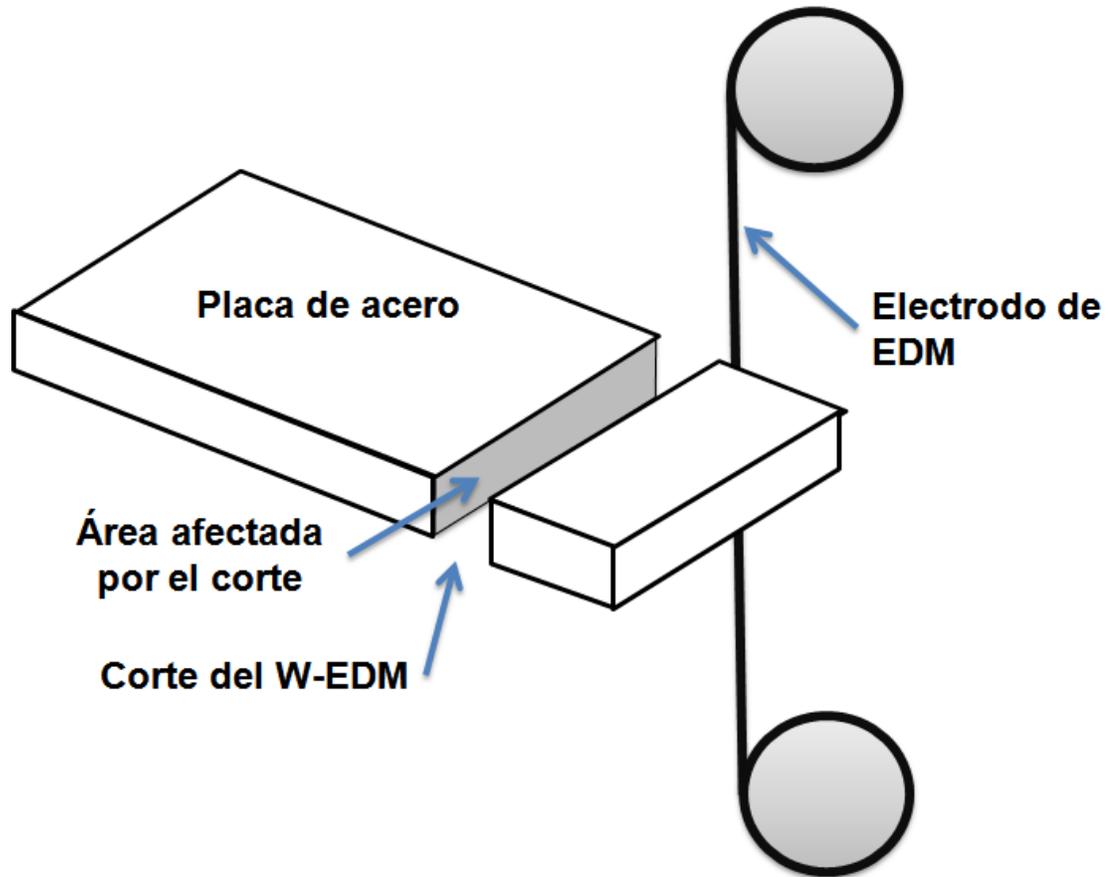


Figura 4. 3 Diagrama del corte por el W-EDM

### 4.1.3 Evaluación de las zonas de corte

#### 4.1.3.1 Caracterización de las muestras después del corte

Una vez montadas se desbastaron con diversas lijas de carburo de silicio: 120, 240, 600, 800, 1200 grit. Se inspeccionaron en condición de pulido a espejo, se llevó a cabo sobre paños y empleando alúmina de 1  $\mu\text{m}$ , alcohol etílico para eliminar residuos de pulido, las muestras fueron atacadas con Nital 4 durante 8 s. Con el fin de revelar microestructura de cada uno de ellos en el borde del corte.

#### **4.1.3.2 Ensayo de microdureza**

Se empleó un microdurómetro marca FUTURE-TECH empleando una carga de 1 Kgf por 15 s. La evaluación se llevó a cabo en los tres tipos de aceros. Las medidas de las microdurezas se tomaron por debajo del área de corte. La medición de las microdureza se realizó por replica.

#### **4.1.3.3 Microscopia óptica y de barrido electrónico**

Las muestras se observaron bajo un microscopio óptico diversas magnificaciones. Además, se empleó un microscopio de barrido electrónico marca en condiciones de vacío del  $15 \times 10^{-6}$  Torr, con el fin de realizar un microanálisis químico lineal a lo largo del corte.

### **4.2 Resultados y discusiones del caso de estudio**

A continuación se presenta los resultados obtenidos durante el caso de estudio, se describirá los datos obtenidos en las diferentes pruebas que se le hicieron al material, se discutirá también los fenómenos que ocurrieron después del proceso de corte.

### 4.2.1 Resultados de la caracterización de las muestras antes del corte con el W-EDM

En la Figura 4. 4 se observa la microestructura de la muestra de un acero de transformación inducida mediante plasticidad (TRIP por sus siglas en inglés), en condiciones de pulido. Se aprecian fases de ferrita (F), martensita (M), bainita (B) y austenita retenida (A). Esta microestructura es una característica de un acero TRIP. La microdureza promedio del material es de 29.2HRC (295.5 HV)

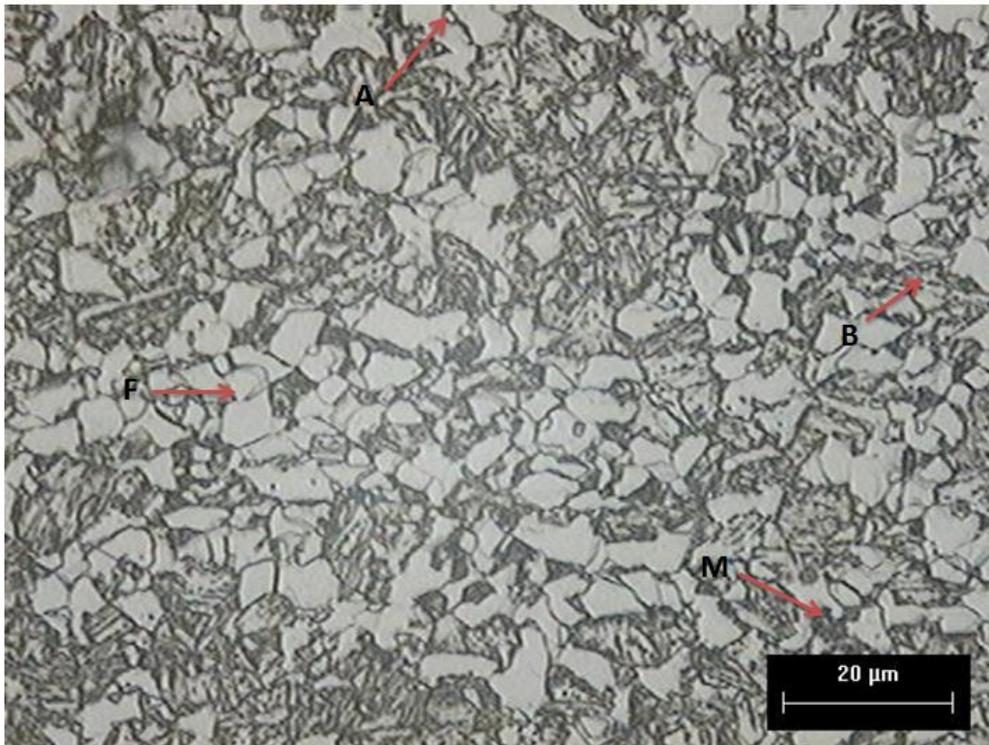
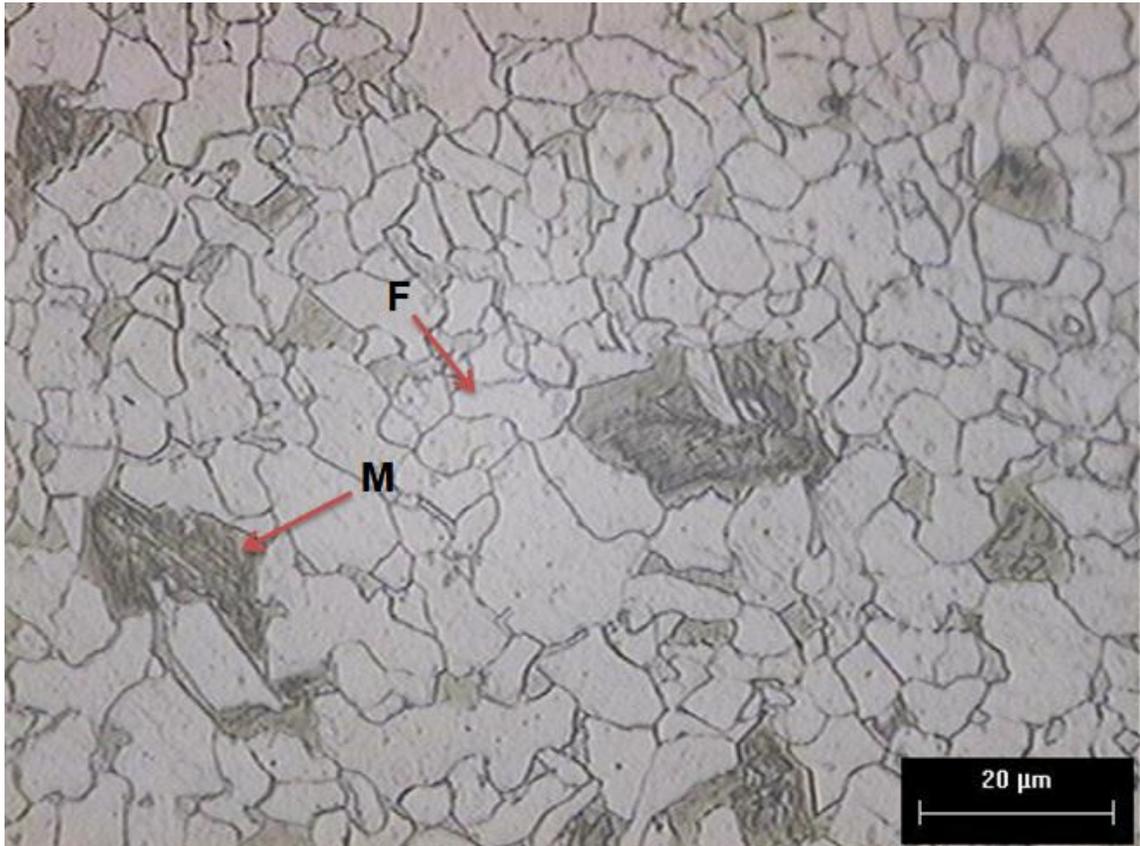


Figura 4. 4 Micrografía del acero TRIP conteniendo fases de: ferrita (F), martensita (M), bainita (B) y austenita retenida (A)

En la Figura 4. 5 se muestra de un acero de doble fase (DP por sus siglas en inglés) atacado químicamente por inmersión. La microestructura está compuesta de granos de ferrita (F) y granos dispersos de martensita (M). La microdureza promedio del material es de 91.8 HRB (194.25 HV)



**Figura 4. 5** Micrografía de un acero DP, presentando de: ferrita (F), martensita (M).

La Figura 4. 6 muestra la microestructura de un acero HSLA antes de ser cortado por el proceso EDM. Se observa bandeamiento microestructural debido a la laminación previa del acero. A altas ampliaciones se aprecian granos de ferrita (F), con granos de perlita (P) Figura 4. 7. La microdureza promedio del material es de 85.7 HRB (167.6 HV)

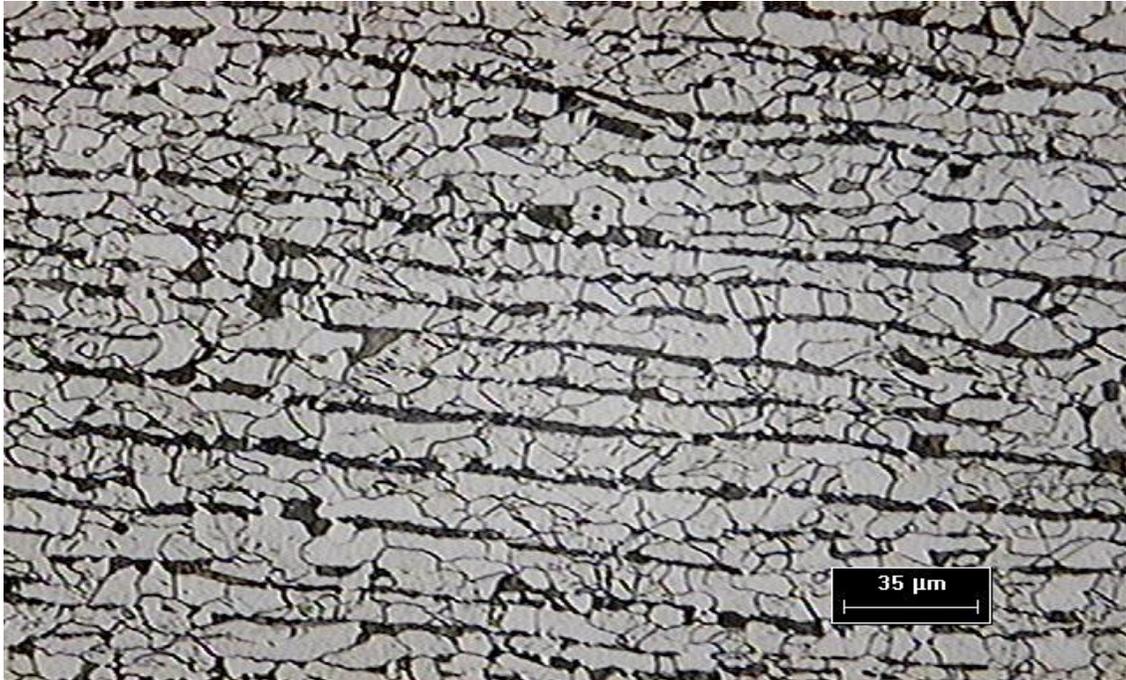


Figura 4. 6 Bandeamiento microestructural del acero HSLA (banda clara, fase rica en ferrita y banda oscura, fase rica en perlita).

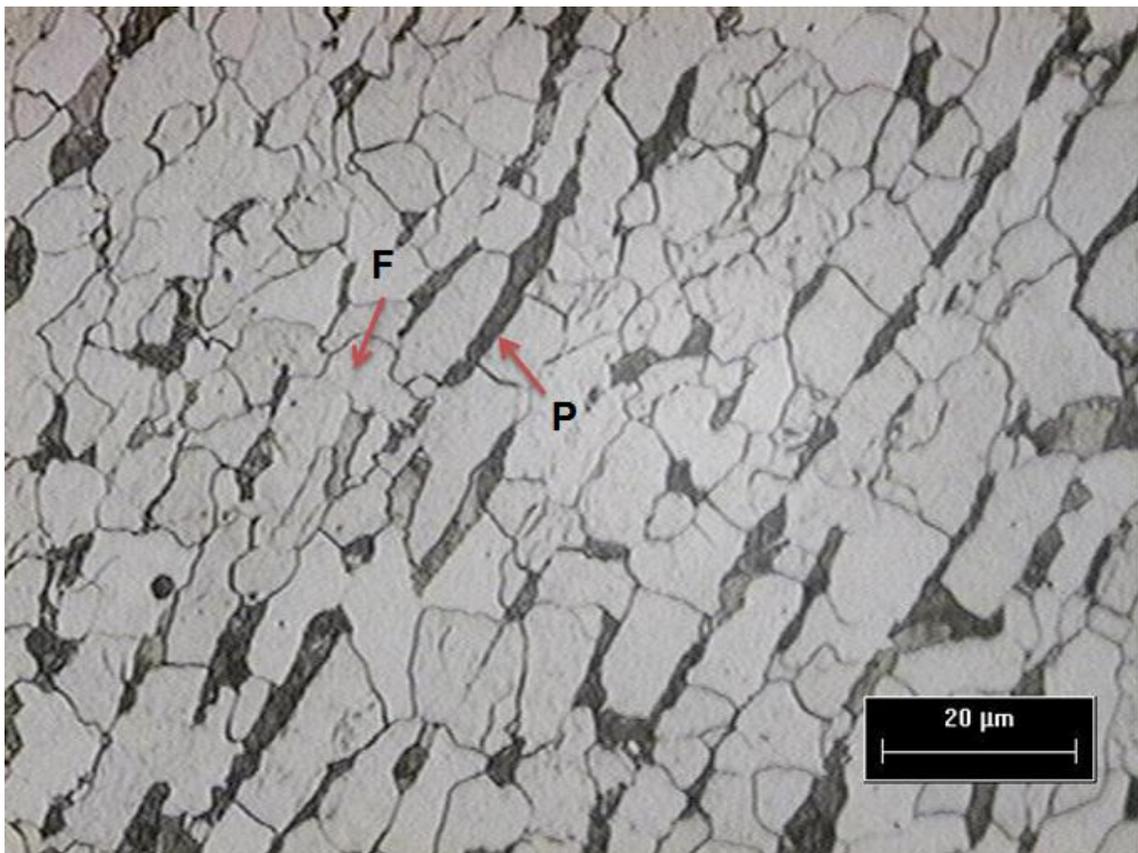


Figura 4. 7 Micrografía del acero HSLA, vista a 1000 aumentos, las fases presentes: ferrita (F), perlita (P).

#### 4.2.2 Resultados de perfiles de rugosidad y microscopía electrónica de barrido de los aceros HSLA, TRIP y DP-600

Los valores de Ra y Rz indican esencialmente el acabado superficial que induce los electrodos en los cortes de los aceros. En este caso de estudio se muestran perfiles de rugosidad de aceros HSLA, TRIP y DP-600 (Figura 4. 8). De acuerdo a la literatura y los valores presentados en la Tabla 4. 3 indican un acabado semifino.

Tabla 4. 3 Valores de rugosidades Ra y Rz de aceros

HSLA		TRIP		DP-600	
Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
3.068	18.906	3.387	23.609	3.638	20.688

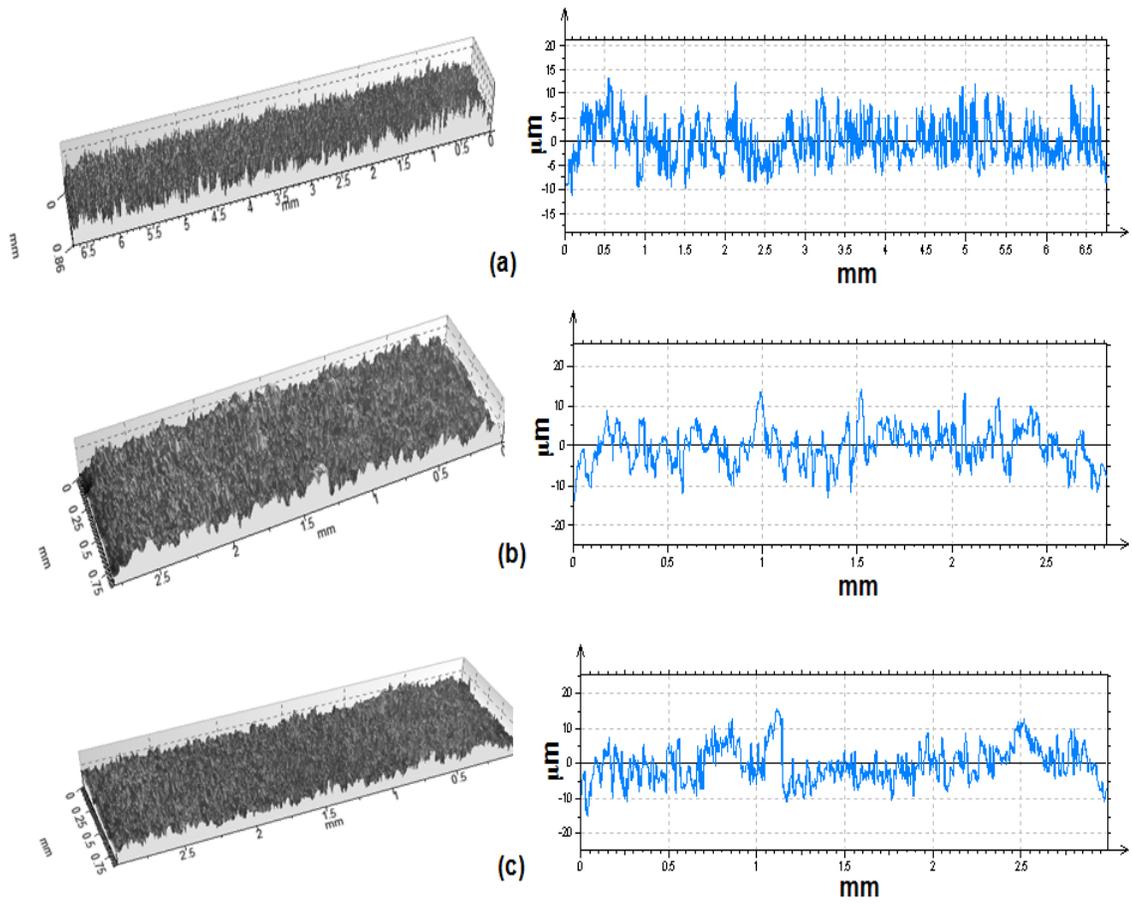


Figura 4. 8 Perfiles de rugosidades de aceros: a) HSLA; b) TRIP y c) DP-600

La Figura 4. 9 (a), (b) y (c) muestra micrografías de aceros que se cortaron transversalmente por el proceso EDM empleando un hilo de latón. Se aprecia en la Figura 4. 9(a) granos de ferrita y perlita de tamaños heterogéneos. En la Figura 4. 9(b) se observa la formación de una capa residual del corte. La composición química de esta capa se describirá más adelante. Adicionalmente, por debajo de la capa se observan fases de martensita, ferrita y pequeños precipitados de carburos. Finalmente, en la Figura 4. 9(c) se aprecian fases de ferrita y martensita, principalmente.

- 1) Martensita
- 2) Ferrita
- 3) Perlita
- 4) Carburos
- 5) Capa

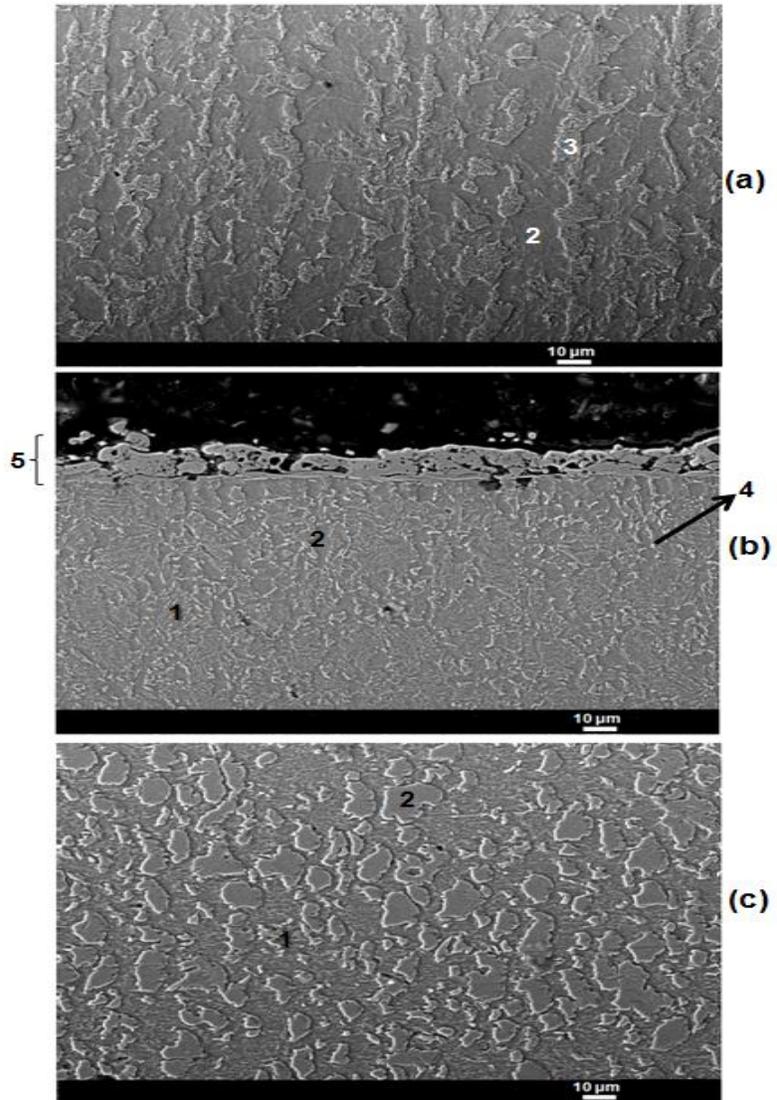


Figura 4. 9 Imágenes de electrones secundarios de aceros: a) HSLA, b) TRIP y c) DP-600

### **4.2.3 Descripción del efecto del corte por alambre de aceros: HSLA, TRIP y DP-600.**

#### *Acero HSLA*

La Figura 4. 10 se muestra el corte transversal de la superficie del acero cortado por el proceso EDM empleando hilo de latón. En la superficie se aprecia fusión local, microporos (flechas blancas) y microgrietas (flechas amarillas). Este último defecto se atribuye a la generación de esfuerzos térmicos que exceden el esfuerzo último a la resistencia del material (30). En el caso de los microporos, se asocian a la evaporación de material y desgaste simultáneo del alambre de corte.

Por otro lado, se observa en la superficie picos intensos de Fe y O debido a la formación de una capa delgada mayor a 10  $\mu\text{m}$  de óxido de hierro. Además, se observa en el patrón picos intensos del Fe que están situados de manera homogénea en tamaños a distancias de 60  $\mu\text{m}$ . En contraste, coincidentemente picos de menor intensidad del C se detectan a estas distancias. Debido probablemente a una ligera descarburización y posteriormente los picos incrementan de manera constante en función de la disminución de los picos del Fe. Los análisis lineales de Zn y Cu muestran picos intensos a distancias mayores de 80 $\mu\text{m}$ . Estos elementos corresponden a los residuos del electrodo de latón. Es interesante observar que las intensidades fluctuantes entre el Fe y C se asocian a la formación de carburos. Estos son consistentes en función de la distancia del análisis lineal por EDX.

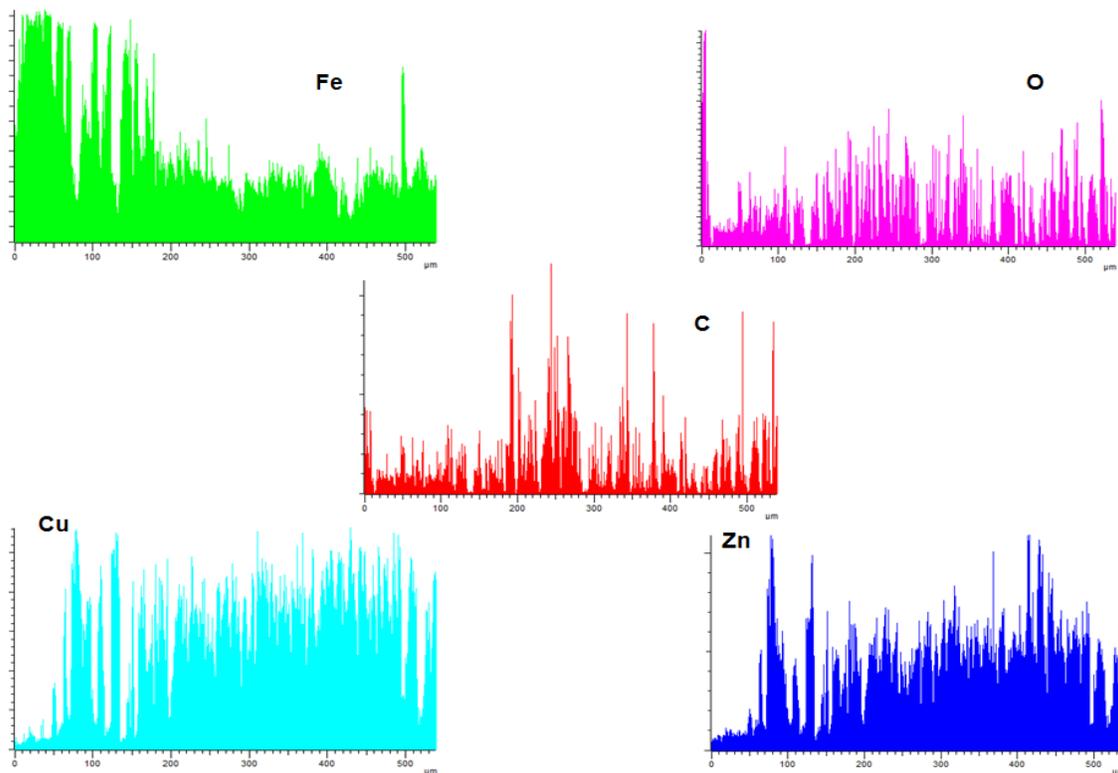
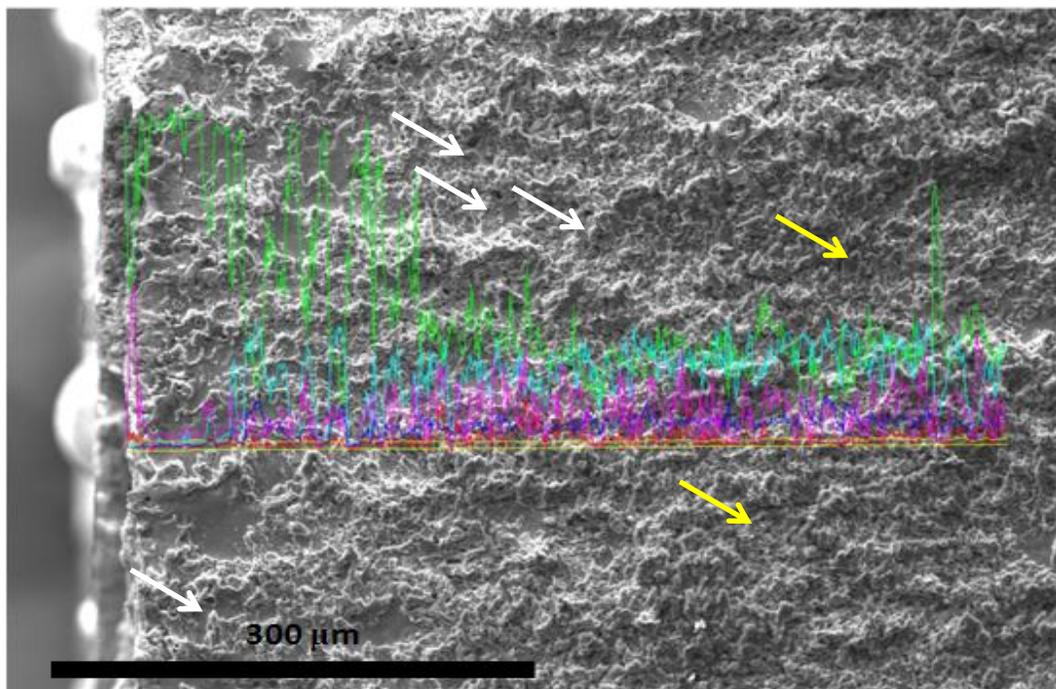


Figura 4. 10 Imagen de electrones secundarios y análisis lineal por EDX de un acero HSLA cortado por el proceso EDM empleando hilo de latón.

### *Acero TRIP*

La Figura 4. 11 muestra la superficie transversal del corte de un acero TRIP por el proceso EDM empleando hilo de alambre de latón. En la superficie de corte se aprecia fusión local sin presencia de microgrietas y microporos. De forma semejante al acero HSLA, se observa un pico intenso de O al inicio del análisis lineal por EDX. Indicando la formación de una capa de óxido de hierro. Las intensidades del pico de Fe se observan constantes aproximadamente a distancias de 400  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, las variaciones de los picos intensos de Zn y Cu son detectados a distancias mayores de 400  $\mu\text{m}$ . Este hecho es relevante, ya que el alambre de latón comienza a depositarse a distancias mayores de 350  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Adicionalmente, en el inicio del corte de este acero no presenta micro-porosidad ni propagación de microgrietas al inicio del corte. Esto indica dos hechos: 1) los parámetros iniciales del proceso en el dieléctrico inducen una amplia zona de fusión en el acero y, conforme avanza el corte, el hilo de alambre comienza a consumirse por cambios de flujo de corriente durante el intercambio iónico en el dieléctrico, es decir, cambios en la concentración de especies químicas que propician el desgaste del alambre. Este resultando en consistente al presentar una zona libre de microporos debido a la evaporación de especies químicas como el Zn del hilo de alambre 2) la microestructura es capaz de contener los efectos térmicos para evitar la formación de microgrietas. Finalmente, los picos intensos del Al corresponden a la composición química del acero.

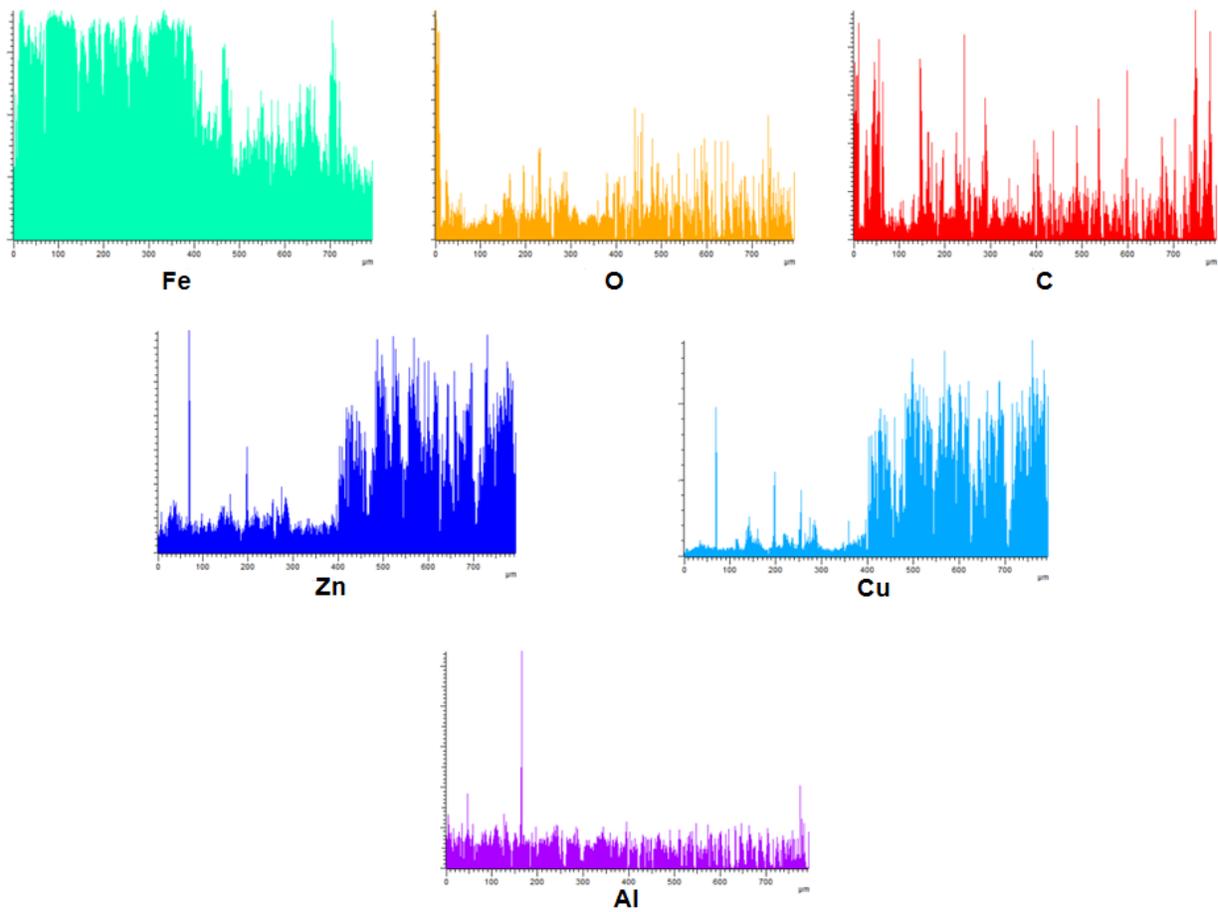
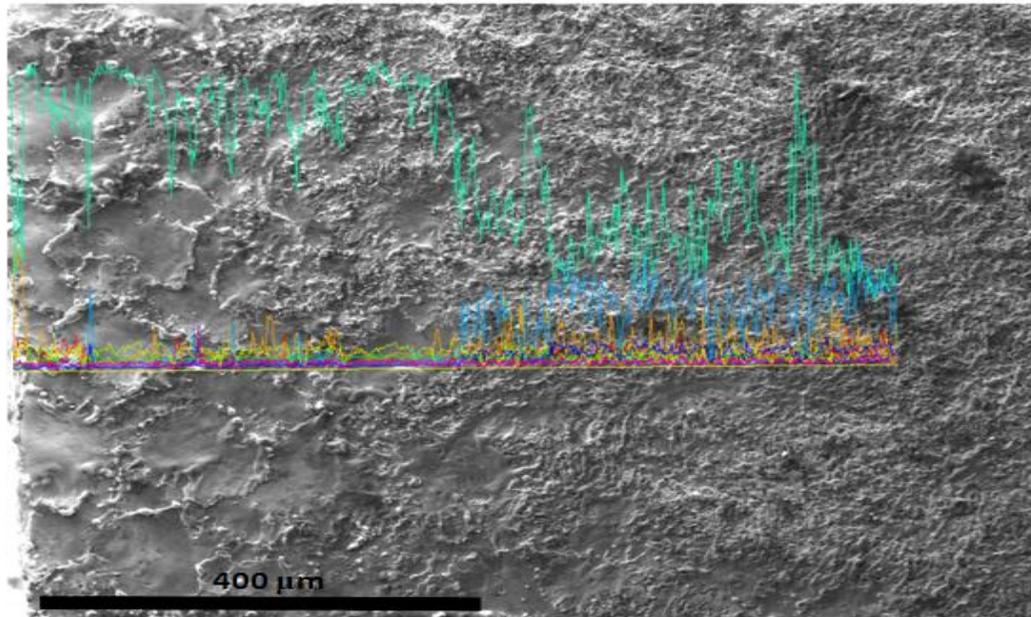


Figura 4. 11 Imagen de electrones secundarios y análisis lineal por EDX de un acero TRIP cortado por el proceso EDM empleando hilo de latón.

### *Acero DP-600*

La Figura 4. 12 muestra la superficie de corte transversal de un acero DP-600 previamente cortado por el proceso EDM empleando un hilo de alambre de latón. La superficie muestra material fundido localizado y una alta concentración de microporos en comparación con los aceros HSLA y TRIP (Figura 4. 10 y Figura 4. 11, respectivamente).

Este resultado es consistente con el depósito inmediato de Zn y Cu de acuerdo a los patrones tomados por EDX. Indicando una alta evaporación y desgaste del alambre de corte. Debido a que el patrón muestra incremento de elemento de Zn y Cu. A su vez, el resultado es consistente con los picos intensos de menor intensidad del patrón del Fe. Casos de este tipo de fenómeno se ha reportado en la literatura, además, sugieren que el 15% o menos pérdida de Fe es causado por el dieléctrico (30). Los picos del patrón de Al es parte misma de la composición química del DP.

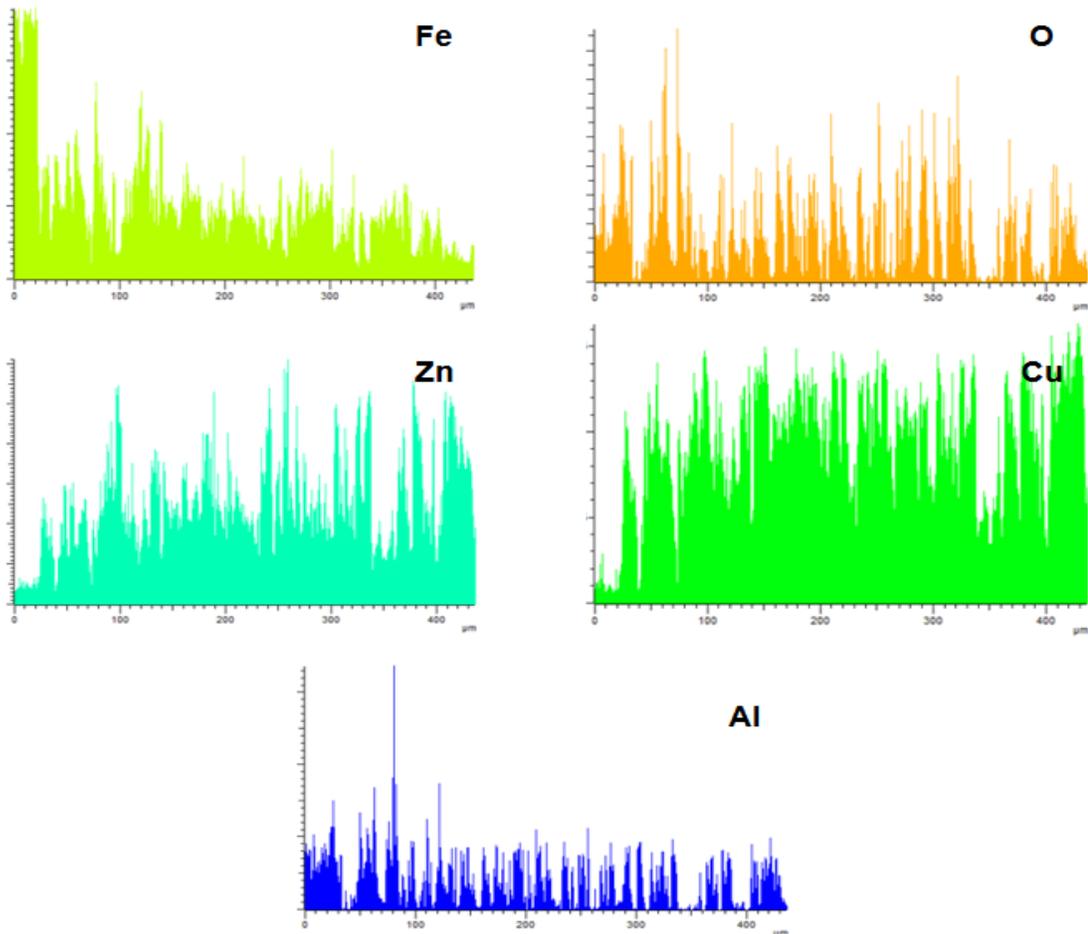
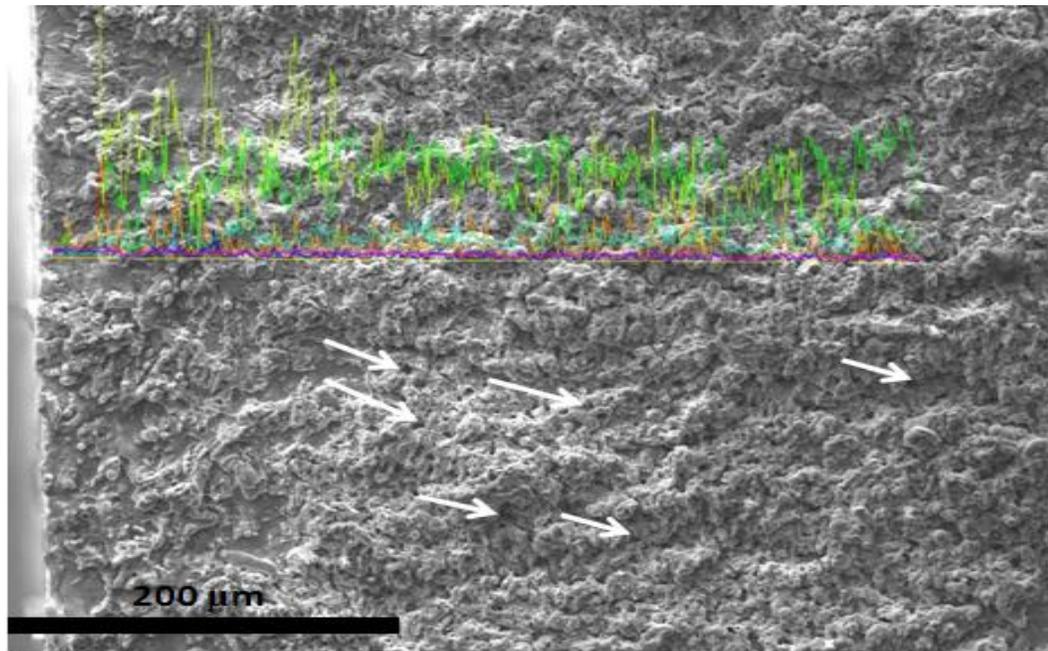
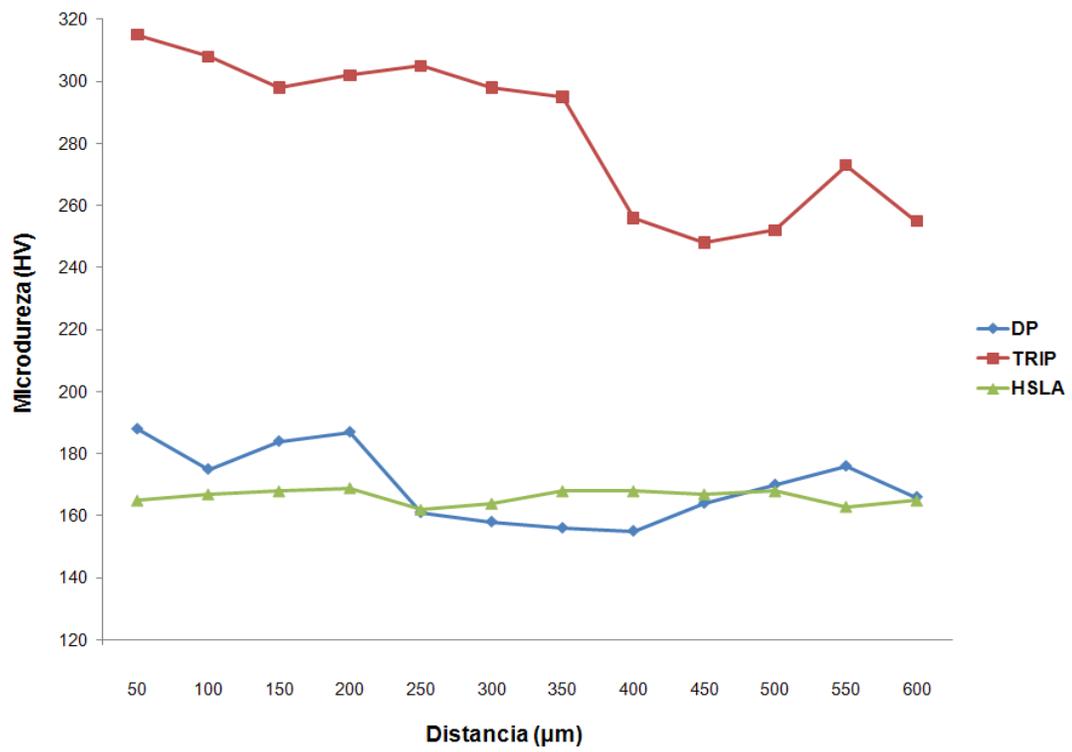


Figura 4. 12 Imagen de electrones secundarios y análisis lineal por EDX de un acero DP-600 cortado por el proceso EDM empleando hilo de latón.

#### **4.2.4 Perfil de microdurezas sobre superficies de aceros HSLA, TRIP y DP-600 cortados por el proceso W-EDM.**

La Figura 4. 13 muestra las microdurezas en función de la distancia del corte en los aceros DP, TRIP y HSLA. Se aprecia que las microdurezas del acero DP tienen una heterogeneidad a los largo del corte de 50 a 600  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, los valores de la microdureza Vickers disminuyen de 250 a 400  $\mu\text{m}$ . Debido a la presencia de microdefectos y material residual del alambre de hilo. En el caso del acero HSLA las mediciones de microdureza son más homogéneas a distancias de 50 a 600  $\mu\text{m}$ , además, conserva la microdureza inicial (antes de cortarlo). En ambos aceros, la disminución de la microdureza se asocia a la formación de microdefectos, así como el efecto de la presencia de impurezas de Zn y Cu en la superficie de corte. Cabe resaltar, que en estos aceros predominan dos fases en forma de bandas de ferrita y perlita (HSLA) y dos fases de ferrita+martensita (DP). De alguna manera influyen en la disminución de la microdureza de acuerdo a los parámetros de corte empleados en el proceso EDM. En el caso contrario, el perfil de microdurezas del acero TRIP presenta un incremento y disminución paulatina de la microdureza que se extiende a distancias de corte de 50 a 350 $\mu\text{m}$ . Posteriormente entre 400 y 450 $\mu\text{m}$  la microdureza disminuye notoriamente. Este efecto se asocia al efecto de las impurezas de Zn y Cu sobre la superficie de corte del acero.



**Figura 4. 13 Perfil de microdurezas medidas a diferentes distancias del corte de aceros empleando el proceso W-EDM.**

# **CAPÍTULO 5:**

## **CONCLUSIONES**

### **5.1 Conclusiones del estado del arte del EDM y ECM**

Los procesos EDM y ECM están siendo utilizados para el maquinado de materiales que presentan alta dureza, piezas que requieren acabados finos, alta precisión y formas complejas.

Las superficies de los materiales hechas por el proceso EDM presentan una capa de metal solidificado con adiciones de contaminantes, dependiendo del dieléctrico; un dieléctrico en bases de aceite presenta aumento de carbono en la superficie, un dieléctrico en base agua presenta superficies oxidadas.

Los electrodos usados en el proceso EDM tienen desgaste de la superficie, afectando a las dimensiones finales de las piezas y contaminando la superficie de ésta.

En el proceso ECM se debe tener en consideración las reacciones oxidantes de los electrolitos, para seleccionar el más adecuado y en concentraciones apropiadas, con el fin de obtener una superficie fina.

En ambos procesos el acabado superficial está en función principalmente de la energía aplicada.

Los sistemas EDM y ECM son factibles de hibridar haciéndolos trabajar de forma secuenciada usando un fluido de trabajo que presente la dualidad de ser dieléctrico y electrolito o bombeándolos en forma secuenciada.

## **5.2 Conclusiones de los resultados del caso de estudio**

El proceso por electrodescargas presenta la ventaja de que corta los tres tipos de aceros con la misma cantidad de energía.

El proceso de corte por electroerosión fijando los parámetros deja residuos del electrodo de cobre y zinc en la superficie del área de corte.

El acabado superficial del corte entra en la clasificación de semifino.

En los aceros HSLA y DP presentan microfisuras y microcavidades en la capa de metal solidificado en la superficie, a comparación del TRIP, que no presenta microfisuras y microcavidades. Probablemente, la diversidad de fases en el acero TRIP permite una mejor distribución de los esfuerzos residuales debido a la diversidad de fases que se obtienen en los tratamientos térmicos de revenido: bainita y martensita revenida. Además, no presenta bandeamiento como es en el caso del acero HSLA.

# BIBLIOGRAFÍA

1. **Neely, John E.** *Materiales y procesos de manufactura*. [ed.] Grupo Noriega Editores. [trad.] Rafael García Díaz. Primera Ed. Guanajuato : Limusa, 1992. págs. 317-320. Vol. 1.
2. **Karpakjian y Serope.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. [trad.] Gabriel Sánchez García. Segunda Ed. Edo. de México : Pearson Educación, 2002. págs. 772-775. Vol. 1.
3. **Schey, John A.** *Introduction to manufacturing processes*. [trad.] Ing. Javier León Cárdenas. Tercera Ed. México D.F. : Mc Graw Hill , 2000. págs. 773-775.
4. **Mott, Robert L.** *Diseño de elementos de máquinas*. [trad.] Virgilio González y Pozo. Cuarta Ed. Edo. México : Pearson educación, 2006. págs. 11-15.
5. **Nieto Martinez, Jose Alberto.** Soldabilidad de aceros HSLA termogalvanizados. [Tesis de maestría]. Cd. Universitaria, Nuevo Leon, México : s.n., 2003. págs. 1-9.
6. **Antiquera, Julio.** [www.soldaduralatinoamericana.com](http://www.soldaduralatinoamericana.com). [En línea] Marzo de 2008. [Citado el: 10 de Enero de 2013.] <http://www.soldaduralatinoamerica.com/articulos.htm>.
7. **Aggen, G., Akstens, Frank W. y Allen, C. Michael.** Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. [HANDBOOK]. s.l. : ASM International Handbook, Sep de 2005. Vol. 1, págs. 380, 382, 668, 668.

8. **Illescas, S., Fernández, J. y Guilemany, J. M.** *Study of the mechanical propiertis of low carbon content HSLA steels*. Madrid : s.n., 2009. págs. 424-431. Vol. 45. 0902.

9. **Meza Vazquez, Salvador.** Soldabilidad de aceros HSLA termogalvanizados para aplicaciones automotrices. [Tesis de maestría]. Ciudad Universitaria, Nuevo Leon , México : s.n., 2004. págs. 1-18.

10. **Angarita, César, Moewins, Philippe y Sáenz, Laura.** *Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido*. Valencia : s.n., 2003. págs. 28-36. Vol. 10. 1316-6832.

11. **Ageen, G. y W. Akstens, Frank.** *ASM Handbook: Properties and seleccion: Irons, steels and high performance alloys*. 10th. s.l. : ASM, 2005. págs. 262-264, 589-591. Vol. 1.

12. **Illesca Fernández , Silvia.** *Estudio del efecto de los elementos microalentes en un acero HSLA*. 1ra Ed. Catalunya : Universitat Politècnica de Catalunya, 2007. págs. 40-44.

13. **Illesca, S., Fernández, J. y Guilemany, J. M.** *Estudio del crecimiento de grano de la fase austenítica en un aceso HSLA de bajo contenido en carbono*. [ed.] Revista de Metalurgia. Barcelona : s.n., 2008. 0034-8570.

14. **Fernández, J, Asensio, J. y Sánchez, M.** *Study of the mechanical properties of low carbon content HSLA steels*. Madrid : Revista de Metalurgia, 2009. págs. 424-431. 0034-8570.

15. **Bhadeshia, H. K. y Honeycombe, Sir Robert.** *Steels Microstructure and properties*. 3rt Ed. s.l. : Elsevier Ltd., 2006. págs. 210-230. 978-0-750-68084-4.

16. **Giraudi, Juan B. y Altini, C.** *Electroerosión*. [ed.] Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires : s.n., 2005. págs. 2-8.

17. **Puertas, I.** *Introducción a la electroerosión*. Navarra : ELSEVIER, 2007. 143–144 (2003) 521–526.

18. **Sommer, Carl y Sommer, Steve.** *Complete EDM Handbook*. Texas : Advance Publishing, 2005. págs. 19-26. 978-1575373025.

19. **Ali, M. Y., Rosfazila, M. R. y Rosnita, E.** *Geometrical Integrity of Microholes Drilling by Convencional and Micro Electrical Discharge Machining*. Malaysia : Department of Manufacturing and Materials Engineering. págs. 731-740.

20. **Puertas, I.** *A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining*. Navarra : Elsevier, 2003. págs. 521-526. 0924-0136.

21. **Chen, Y. y Mahdivian, S. M.** *Analysis of electro-discharge machining process and its comparison with experiments*. Australia : Elsevier, 2000. págs. 150-157. s0924-0136 (00) 00531-8.

22. **Perverj Jahan, Muhammad, Wong , Yoke San y Rahman, Mustafizur.** *A comparative experimental investigations of deep-hole micro-EDM drilling capability for cemented carbide (WC-Co) against austenitic stainless steel (SUS 304)*. London : Springer, 2009. págs. 1145-1160. s00170-0090-2167-8.

23. **Khan, A. A.** *Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes*. Kuala Lumpur : Springer, 2007. págs. 482-487. s00170-007-1241-3.

24. **Hewidy, M. S.** *controlling of metal removal thickness in ECM process*. Egypt : Elsevier, 2005. págs. 348-353. 16034-8353.

25. **Masuzawa, T.** *State of the art of micromachining*. Tokyo : Institute of industrial science, 2000. págs. 473-488.

26. **Jain, Vijay K.** *Nacional Programme on Technology Enhanced Learning. NPTEL*. [En línea] 2006. [Citado el: 10 de Mayo de 2013.]

<http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-38.pdf>.

27. **Bhattacharyya, B., Munda, J. y Malapati, M.** *Advancement in electorchemical micro-machining*. Kolkata : ElSevier, 2004. págs. 1577-1589. 0890-6955.

28. **Kim, Bo Hyun, y otros.** *Analysis of the electrochemical behaviors of WC-Co alloy for micro ECM*. Seoul : ElSevier, 2012. págs. 621-630. 0924-0136.

29. **Dang Nguyen, Minh, Rahman, Mustafizur y San Wong, Yoke.** *Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water*. Singapore : ELSEVIER, 2012. págs. 55-65.

30. **J.C. Rebelo , A., Morao Dias , A. y D. Kremer , B.** *J.C. Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels*. s.l. : Journal of Materials Processing Technology, 1998. págs. 90–96.

31. **Opbroek, Edward G.** *Advanced high strength steel (AHSS) guidelines. [HANDBOOK]*. s.l. : Internacional Iron and Steel Institute, 18 de Junio de 2006. Vol. 3.

# LISTADO DE TABLAS

## CAPÍTULO 2

TABLA 2. 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA REPRESENTATIVA DE LOS ACEROS HSLA Y DOS EJEMPLOS (A633 GRADO E Y A656) (7)	14
TABLA 2. 2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LÍMITE ELÁSTICO Y RESISTENCIA DE ACEROS HSLA Y SUS APLICACIONES (7)	16
TABLA 2. 3 COMPOSICIÓN NOMINAL DEL ACERO 16Mn4 (% EN PESO) (13)	21
TABLA 2. 4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS ESTUDIADOS (% EN PESO) (14)	23
TABLA 2. 5 PARÁMETROS DEL ELECTROMAQUINADO POR EL PROCESO CONVENCIONAL Y MICRO EDM (19)	35
TABLA 2. 6 COMPARACIÓN DE LA GEOMETRIA DE LAS PERFORACIONES CON MICRO EDM Y EDM CONVENCIONAL (19)	36
TABLA 2. 7 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO (20)	39
TABLA 2. 8 CONDICIONES DE LAS MICROPERFORACIONES CON EL MICRO EDM (22)	47
TABLA 2. 9 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES (23)	52
TABLA 2. 11 VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL EXPERIMENTO (23)	52
TABLA 2. 10 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ALUMINIO Y ACERO DULCE (23)	52

## CAPÍTULO 3

TABLA 3. 1 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS PROCESOS DE ELECTROEROSIÓN Y ELECTROQUÍMICO	73
--	----

## CAPÍTULO 4

TABLA 4. 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS DP, HSLA Y TRIP	79
TABLA 4. 2 PARÁMETROS DEL PROCESO DE CORTE DEL W-EDM USADOS EN LOS TRES TIPOS DE ACEROS	81
TABLA 4. 3 VALORES DE RUGOSIDADES RA Y RZ DE ACEROS	87

# LISTADO DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

FIGURA 2. 1 GRÁFICA DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DE LA DEFORMABILIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE ACEROS DE BAJA, ALTA Y ULTRA ALTA RESISTENCIA (31) .....	13
FIGURA 2. 2 MICROGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL TAMAÑO DE GRANO (A) CRECIMIENTO HETEROGÉNEO (1000°C, 5 MIN) Y (B) CRECIMIENTO HOMOGÉNEO (1050°C, 60 MIN) (13) .....	22
FIGURA 2. 3 ACEROS TRATADOS TÉRMICAMENTE: A) MICROGRAFÍA DE ACERO V-Nb A 450 °C POR 30 MIN Y (B) MEB DEL ACERO V+Nb A 450 °C POR 30MIN (14).....	24
FIGURA 2. 4 VARIACIÓN DE LAS MICRODUREZA DE LOS ACEROS CON V+Nb Y V EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. CONSIDERANDO UNA MASA DE 300GF Y TIEMPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR 30 Y 60 MIN. (14).....	25
FIGURA 2. 5 (1) ELECTRODO (CÁTODO) NEGATIVO; (2) PIEZA (ÁNODO) POSITIVO; (3) SISTEMA DE CONTROL; (4) DIELECTRICO; (5) IMPEDANCIA TOTAL DEL CIRCUITO; (6) CAPACITOR; (7) FUENTE DE CC; (8) CUBA. (16).....	28
FIGURA 2. 6 ETAPAS EN LAS QUE SE LLEVA A CABO LA REMOCIÓN DEL MATERIAL EN EL PROCESO EDM (17).....	30
FIGURA 2. 7 MAQUINADO POR ELECTRODESCARGA POR HILO (18) .....	33
FIGURA 2. 8 MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS POR ESTAMPADO (18).....	33
FIGURA 2. 9 MICRO-MAQUINADO POR ELECTRODESCARGAS (18).....	34
FIGURA 2. 10 MICROSCOPIA SEM DE LA MICROPERFORACIÓN USANDO UN ELECTRODO DE CARBURO DE TUNGSTENO: (A) EDM CONVENCIONAL Y (B) MICRO EDM (19) .....	35
FIGURA 2. 11 IMÁGENES DE ELECTRONES SECUNDARIOS DE LA PERFORACIÓN USANDO UN ELECTRODO DE CARBURO DE TUNGSTENO: (A) PERFORACIÓN POR EDM CONVENCIONAL. (B) SUPERFICIE DE LA PERFORACIÓN POR EDM CONVENCIONAL. (C) PERFORACIÓN POR MICRO EDM. (D) SUPERFICIE DE LA PERFORACIÓN POR MICRO EDM .....	37
FIGURA 2. 12 GRÁFICA DE LOS EFECTOS DE LA RUGOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE (I), DEL TIEMPO DE ENCENDIDO (TI), Y TIEMPO DE APAGADO (TO). (20).....	40
FIGURA 2. 13 VARIACIÓN DE LA RAZÓN DE REMOCIÓN DE MATERIAL M EN FUNCIÓN DE LAS DESCARGAS DE CORRIENTES EN TRES INTERVALOS DE TIEMPO DISTINTOS. (21) .....	42
FIGURA 2. 14 GRÁFICO DE LA VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE (21).....	43
FIGURA 2. 15 COMPARACIÓN DE LA RAZÓN DE REMOCIÓN DE MATERIAL VARIANDO LA CORRIENTE (21).....	44
FIGURA 2. 16 COMPARACIÓN DE LA CORRIENTE DE DESCARGA EN LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER (21) .....	44
FIGURA 2. 17 ZONAS AFECTADAS POR EL PROCESO EDM (18) .....	45
FIGURA 2. 18 MICROGRAFÍAS DE BARRIDO ELECTRÓNICO DEL BORDE DE LAS MICRO PERFORACIONES CON DISTINTOS NIVELES DE ENERGÍA: A) WC-Co CON 7.04 μJ; B) SUS 304 CON 7.04 μJ; C) WC-Co CON 11 μJ; D) SUS 304 CON 11 μJ; E) WC-Co CON 98 μJ; F) SUS 304 CON 98 μJ;.....	48

FIGURA 2. 19 MICROGRAFÍAS DE LA ENTRADA EN EL WC-Co Y SUS 304 CON PARÁMETROS BAJOS DE ENERGÍA DE DESCARGA: A) WC-Co con 7.04 $\mu\text{J}$ ; B) SUS 304 con 7.04 $\mu\text{J}$ ; C) WC-Co con 11 $\mu\text{J}$ ; D) SUS 304 con 11 $\mu\text{J}$ ; .....	49
FIGURA 2. 20 ESQUEMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS MICROPERFORACIONES.....	50
FIGURA 2. 21 MICROSCOPIA ÓPTICA DEL DESGASTE DEL ELECTRODO DE LATÓN CON LA PIEZA DE ALUMINIO: A) CORRIENTE DE 2.5 A; B) CORRIENTE DE 3.5 A; C) CORRIENTE DE 6.5 A (23) .....	53
FIGURA 2. 22 RAZÓN DE DESGASTE DE LOS ELECTRODOS DE CU Y LATÓN EN FUNCION DE LA CORRIENTE Y DEL VOLTAJE .....	54
FIGURA 2. 23 DIAGRAMA DE UNA MÁQUINA DE EDM Y SUS CONSTITUYENTES (17).....	58
FIGURA 2. 24 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS REACCIONES DENTRO DEL ELECTROLITO (26).....	61
FIGURA 2. 25 MICROGRAFÍA DE ELECTRONES SECUNDARIOS DE LA RANURA DEL MAQUINADO ELECTROQUÍMICO: POTENCIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO: -0.4 V; AMPLITUD DEL PULSO: 8 V; DURACIÓN DEL PULSO: 100NS; A) ELECTROLITO: NITRATO DE SODIO AL 0.5 M; B) ELECTROLITO: ÁCIDO SULFÚRICO AL 0.2 M (28) .....	66
FIGURA 2. 26 A) MICROGRAFÍA DE ELECTRONES SECUNDARIOS DE LA RANURA DEL MAQUINADO ELECTROQUÍMICO B)ACERCAMIENTO DE LA MICROGRAFÍA: POTENCIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO: -0.4 V; AMPLITUD DEL PULSO: 8V; DURACIÓN DEL PULSO: 100NS; MEZCLA DEL ELECTROLITO: NITRATO DE SODIO AL 0.5 M Y ÁCIDO SULFÚRICO AL 0.2 M (28) .....	67
FIGURA 2. 27 MICROGRAFÍA DE ELECTRONES SECUNDARIOS DE LA RANURA DEL MAQUINADO ELECTROQUÍMICO A) ELECTROLITO DE NITRATO DE SODIO AL 0.5M Y ÁCIDO SULFÚRICO AL 0.2M B) ELECTROLITO DE NITRATO DE SODIO AL 0.2M Y ÁCIDO SULFÚRICO AL 0.2M: POTENCIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO: -0.4V; AMPLITUD DEL PULSO: 8V; DURACIÓN DEL PULSO: 100NS; DIAMETRO DEL ELECTRODO: 45 $\mu\text{m}$ . (28) .....	69
FIGURA 2. 28 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL VOLTAJE EN EL ESPESOR DE METAL REMOVIDO CON DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA. (24).....	70

## CAPÍTULO 4

FIGURA 4. 1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CASO DE ESTUDIO. ....	78
FIGURA 4. 2 EQUIPO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO MARCA CHARMILLES TECHNOLOGIES GEVENE MODELO 290.....	80
FIGURA 4. 3 DIAGRAMA DEL CORTE POR EL W-EDM .....	82
FIGURA 4. 4 MICROFRAGÍA DEL ACERO TRIP CONTIENIENDO FASES DE: FERRITA (F), MARTENSITA (M), BAINITA (B) Y AUSTENITA RETENIDA (A) .....	84
FIGURA 4. 5 MICROGRAFÍA DE UN ACERO DP, PRESENTANDO DE: FERRITA (F), MARTENSITA (M).....	85
FIGURA 4. 6 BANDEAMIENTO MICROESTRUCTURAL DEL ACERO HSLA (BANDA CLARA, FASE RICA EN FERRITA Y BLANDA OSCURA, FASE RICA EN PERLITA). ....	86
FIGURA 4. 7 MICROGRAFÍA DEL ACERO HSLA, VISTA A 1000 AUMENTOS, LAS FASES PRESENTES: FERRITA (F), PERLITA (P)..	86
FIGURA 4. 8 PERFILES DE RUGOSIDADES DE ACEROS: A) HSLA; B) TRIP Y C) DP-600.....	88
FIGURA 4. 9 IMÁGENES DE ELECTRONES SECUNDARIOS DE ACEROS: A) HSLA, B) TRIP Y C) DP-600 .....	89

FIGURA 4. 10 IMAGEN DE ELECTRONES SECUNDARIOS Y ANÁLISIS LINEAL POR EDX DE UN ACERO HSLA CORTADO POR EL PROCESO EDM EMPLEANDO HILO DE LATÓN. ....	91
FIGURA 4. 11 IMAGEN DE ELECTRONES SECUNDARIOS Y ANÁLISIS LINEAL POR EDX DE UN ACERO TRIP CORTADO POR EL PROCESO EDM EMPLEANDO HILO DE LATÓN. ....	93
FIGURA 4. 12 IMAGEN DE ELECTRONES SECUNDARIOS Y ANÁLISIS LINEAL POR EDX DE UN ACERO DP-600 CORTADO POR EL PROCESO EDM EMPLEANDO HILO DE LATÓN. ....	95
FIGURA 4. 13 PERFIL DE MICRODUREZAS MEDIDAS A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CORTE DE ACEROS EMPLEANDO EL PROCESO W-EDM.....	97