

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE DE  
ALTA VELOCIDAD Y PRECISIÓN, PARA SU USO EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ**

**POR**

**ROLANDO IRAM CASAS ORTEGA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA A 23 DE SEPTIEMBRE DEL 2013**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE DE  
ALTA VELOCIDAD Y PRECISIÓN, PARA SU USO EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ**

**POR**

**ROLANDO IRAM CASAS ORTEGA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA A 23 DE SEPTIEMBRE 2013**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE DE ALTA VELOCIDAD Y PRECISIÓN, PARA SU USO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**, realizada por el alumno **ROLANDO IRAM CASAS ORTEGA**, con número de matrícula **12ES-137** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dr. Marco Aurelio Jiménez Gómez**  
Tutor Académico

---

**Dr. Pedro Pérez Villanueva**  
Tutor en Planta

---

**Dr. Mario Cesar Osorio Abraham**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ROLANDO IRAM CASAS ORTEGA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE CORTE DE ALTA VELOCIDAD Y PRECISIÓN, PARA SU USO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 23 días del mes septiembre del 2013.

---

**MT. Edgar Daniel Aguilar  
Cortés**  
Presidente

---

**Dr. Everardo Efrén Granda  
Gutiérrez**  
Secretario

---

**Dr. Marco Aurelio Jiménez  
Gómez**  
Vocal

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto, así como a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), por la oportunidad que me brindo para formar parte de esta generación de especialistas en tecnología de la soldadura industrial.

Agradezco a mi tutor académico el Dr. Marco Aurelio Jiménez Gómez, por el apoyo, consejos, recomendaciones dadas durante este año para la realización de la monografía.

A todo el personal que labora en COMIMSA, por todo el apoyo, su paciencia y sus enseñanzas durante todo este año.

A mis compañeros ya que sin su apoyo, críticas y correcciones este año hubiera sido muy aburrido, pero lo más importante es que a lo largo de todo este tiempo aprendimos a trabajar en equipo.

# DEDICATORIA

A mi madre Socorro Ortega Ledesma, ya que sin su cariño, apoyo, comprensión cuidado y cariños me han alentado a seguir adelante, a mi padre Ramiro Casas Alvarado (QEPD) que desde donde quiera que este me apoya en cada decisión.

A mis hermanos, Jorge, Ramiro, Daniel, que sus críticas siempre me han alentado a mejorar y esforzarme cada día un poco más.

Mis amigos que ellos realmente nunca me apoyaron, desgraciados al contrario siempre me han sonsacado, y me decían todo lo que me perdí en las carnes a las cuales no fui.

A mis compañeros de especialidad y maestría (Marisol, Vale, Joel, Miguel, Alex, Sergio, Lacho, Dani, Ángel, Mayito, Loretta, Luggi, Tavitas, Marco) por cada momento de risa, cada palabra de aliento, pero sobre todo por su amistad y compañerismo.

A cada uno de los Doctores y Maestros que a lo largo de este año compartieron sus conocimientos y experiencia, pero sobre todo por la paciencia que tuvieron durante las clases.

# ÍNDICE

SÍNTESIS .....	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	4
1.5 Alcance .....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Procesos de corte convencionales.....	6
2.1.1 Torneado .....	6
2.1.2 Taladrado .....	7
2.1.3 Fresado .....	7
2.1.3.1 Fresado horizontal .....	8
2.1.3.2 Fresado vertical.....	8
2.1.4 Cepillado.....	8
2.1.6 Aserrado .....	9
2.1.7 Esmerilado.....	10
2.1.8 Troquelado .....	11
2.1.9 Corte por presión de chorro de agua .....	11

2.2	Procesos de corte no convencionales.....	14
2.2.1	Corte electroquímico.....	14
2.2.2	Corte por descarga eléctrica.....	15
2.2.2.1	Corte por descarga eléctrica por hilo .....	17
2.2.3	Corte por rayo láser .....	18
2.2.4	Corte por chorro de agua abrasivo .....	19
2.2.5	Corte por plasma .....	21
2.3	Procesos de corte híbrido .....	23
2.3.1	Corte láser/ chorro de agua abrasivo .....	23
2.3.2	Procesos de corte híbrido corte ECM/rectificado.....	26
2.3.3	Corte híbrido electroerosión/chorro abrasivo .....	31
2.3.4	Corte híbrido abrasivo con corte por descarga eléctrica.....	34
2.3.5	Proceso híbrido maquinado electroquímico asistido por láser..	39
2.4	Aceros de alta resistencia y baja aleación .....	42
2.4.1	Definición.....	42
2.4.2	Propiedades de los aceros HSLA.....	43
2.4.3	Microestructura de los aceros HSLA .....	44
2.4.4	Tratamientos térmicos de los aceros HSLA.....	45
2.4.3	Propiedades mecánicas de los aceros HSLA.....	47
2.5	Aceros doble fase .....	48
2.5.1	Definición.....	48
2.5.2	Microestructura.....	48
2.5.3	Propiedades mecánicas de los aceros DP .....	48
2.6	Aceros de plasticidad inducida por transformación .....	49
2.6.1	Definición.....	49



2.5.1 Propiedades de los aceros TRIP .....	50
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA .....	52
CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO .....	54
4.1 Metodología .....	54
4.2 Materiales y equipo .....	54
4.3 Experimentos realizados .....	55
4.4 Resultados .....	58
4.4.1 Microestructura .....	58
4.4.2 Perfil de microdureza .....	59
4.4.3 Análisis por microscopio electrónico de barrido .....	60
4.4.4 Análisis de rugosidad .....	63
4.4.5 Conclusiones del caso de estudio .....	64
Conclusiones .....	65
Listado de figuras .....	66
Listado de tablas .....	69
Bibliografía .....	70
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO .....	73



# SÍNTESIS

El presente documento es la recopilación de información, sobre los procesos de corte que son más utilizados para la manufactura de los aceros.

Hoy en día los procesos de corte utilizados en la industria automotriz busca mejorar e innovar sus modelos de producción, para ofrecer procesos más rápidos, con mejor calidad y menos costosos, que ofrezca las ventajas necesarias para manufacturar las nuevas generaciones de aceros utilizados en esta industria.

En el estado del arte abarca la evolución de los sistemas de corte convencionales, no convencionales y los procesos híbridos.

El caso de estudio presente en este documento se enfoca en el comportamiento de los aceros HSLA, DP, TRIP al momento de ser seccionados por el proceso de corte no convencional de electro erosión por hilo (WEDM por sus siglas en inglés)

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

En la actualidad los procesos de remoción de material utilizados en la industria automotriz, son considerados como tecnologías que no ofrecen ventajas favorables para la manufactura, ya que en los últimos años se ha visto el incremento de nuevas tecnologías para la fabricación de aceros, los cuales son usados en automóviles de menor masa y mejor rendimiento (1), ya que las tendencias de los nuevos modelos de manufactura se enfocan en la rapidez, calidad y reducción de los costos de operación.

Los procesos de corte convencionales no ofrecen la eficiencia ni la exactitud necesaria para mejorar las condiciones que las empresas buscan; por lo cual, las industrias desde su inicio han transformado su modelos de manufactura y tecnología necesaria para aumentar la eficiencia de sus procesos, disminuyendo las piezas defectuosas, aumentando la calidad, y por lo tanto reduciendo sus costos. Con el propósito de llegar a los objetivos, las industrias, buscan la innovación mediante la mejora continua de su tecnología, produciendo sistemas de corte no convencionales (corte por chorro de agua abrasivo, corte por plasma CO<sub>2</sub>, maquinado electro químico, maquinado por electro abrasión), los cuales ofrecen un mejor despiece, sin embargo, poseen limitantes que hacen los procesos sean más lentos, costosos y reducen la

eficiencia, en algunas ocasiones comprometiendo la integridad estructural y la calidad de los materiales.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estudiar el estado del arte, para comprender el funcionamiento de los sistemas de remoción de material, para observar el comportamiento que estos tienen en el maquinado de los aceros de alta resistencia y baja aleación, aceros doble fase y los aceros de plasticidad inducida por transformación bajo diferentes variaciones de procesos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Estudio del estado del arte de los sistemas de corte.
- Descripción de los sistemas de remoción de material: convencionales, no convencionales e híbridos.
- Recopilación de información relevante de artículos científicos.
- Estudiar las propiedades mecánicas de los aceros HSLA, DP, TRIP por un sistema de remoción de material no convencional.
- Evaluar las dimensiones: profundidad, diámetro y superficie final, con las diferentes variaciones del proceso.
- Realizar un perfil de microdureza y rugosidad en la zona de remoción de material, para observar si al momento del corte se presenta algún cambio en las propiedades mecánicas.

### **1.3 Justificación**

La industria automotriz, presenta el inconveniente de maquinar metales que son clave para la manufactura de sus productos, en los cuales no pueden sacrificar la calidad y la integridad estructural de piezas a maquinar; a consecuencia, los tiempos de maquinado incrementan aumentando el costo y los recursos necesarios para su fabricación.

Esta monografía es importante porque reúne información relevante sobre los procesos de corte que existen, para que el lector se interese en conocer más sobre procesos de maquinado no convencionales ya que llevando la integración de un sistema de corte de alta velocidad y precisión, aumentará la eficiencia de producción, los desperdicios por piezas maquinadas fuera de especificación serán mínimos, los costos de operación y fabricación disminuirán, aumentando los beneficios al medio ambiente.

### **1.4 Planteamiento del problema**

A medida que los aceros han evolucionado para ofrecer un mejor desempeño en la industria automotriz, la tecnología empleada en los procesos de corte deja de ofrecer las ventajas necesarias, ya que los aceros y sus aleaciones son más ligeras y duras, aumentando el tiempo de procesamiento; debido a esto, surge la necesidad de estudiar los procesos de corte no convencionales, de tal modo que se pueda implementar una nueva tecnología que compense las necesidades de la industria automotriz para poder desarrollar

los productos de calidad y alto desempeño, sin comprometer la integridad estructural de los aceros, reduciendo sus costos de fabricación.

## **1.5 Alcance**

Estudio de los sistemas de remoción de material mediante procesos no convencionales, describir sus principios de funcionamiento, sus ventajas y desventajas para facilitar la hibridación del sistema.

# CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

## 2.1 Procesos de corte convencionales

### 2.1.1 Torneado

Es un proceso de arranque de viruta, el cual permite maquinar piezas de forma circular mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza de trabajo. La herramienta de corte está montada sobre un carro que se desplaza sobre unas guías o rieles paralelos al eje de giro, al movimiento realizado por la herramienta de trabajo se le denomina eje "Z", en el carro existe otro movimiento en cual proporciona la dirección radial según la pieza que se tornea el cual se produce en el eje "X".

La operación de torneado es indicada para producción de piezas circulares, no depende de éstos, sino también de las posiciones relativas del trabajo de la herramienta, con los mismos movimientos pero con un tipo diferente de herramienta y posición, pueden obtener superficies: cilíndricas, planas, cónicas, esféricas, perfiladas y roscadas (2) (3).

Existen gran variedad de tornos:

- Paralelos
- Universales
- Verticales
- Copiadores



- Automáticos
- De control numérico por computadora (CNC)

### **2.1.2 Taladrado**

Se le denomina taladrar a la operación de maquinado la cual produce agujeros cilíndricos en una pieza utilizando como principio de remoción de material herramientas rotatorias de filos múltiples llamadas brocas a la que se le da una alimentación en línea recta paralela al eje de la misma.

El proceso de taladrado se puede dividir en procesos de taladrado corto es para la producción de pequeños agujeros superficiales y el taladrado profundo es la técnica utilizada para realizar las perforaciones con una profundidad de 8 a 9 veces su diámetro, la principal desventaja de este tipo de taladrado es la forma en la cual se desaloja la viruta ya que a medida de que es más profundo se dificulta el desalojo de la viruta, por lo cual se debe tener un mayor control de procesos (2) (3).

Los factores principales que influyen en el maquinado:

- Diámetro
- Calidad superficial y tolerancia
- Material de la pieza
- Material de la broca
- Longitud de agujero
- Condiciones tecnológicas del maquinado
- Cantidad de agujeros a producir
- Sistema de fijación de la pieza de trabajo en el taladro

### **2.1.3 Fresado**

Se utiliza una maquina la cual utiliza herramientas giratorias para realizar el maquinado por medio del arranque de viruta, mediante herramientas de filos múltiples (denominada fresa), utilizando movimientos circulares, mediante el fresado se puede realizar el maquinado de diferentes materiales como: madera,

acero, fundiciones de hierro, metales no ferrosos y materiales sintéticos, debido a la gran versatilidad de movimiento el fresado puede maquinarse los materiales de forma plana, curva, superficies dentadas.

Debido a la variedad de maquinados que se pueden realizar con el proceso de fresado requiere de una gran diversidad de accesorios y personal capacitado para cumplir con las especificaciones de calidad necesaria (2) (3).

### **2.1.3.1 Fresado horizontal**

El fresado horizontal utiliza un husillo porta herramienta el cual se encuentra en un soporte de deslizamiento o rodamiento que es guiado en un cojinete o brazo de contra soporte, el movimiento de la pieza está dado por la mesa de trabajo ya que puede moverse a lo alto como de manera paralela y perpendicular al husillo porta herramienta. El fresado horizontal es utilizado para formar superficies planas, fresado lateral o de dientes escalonados para ranuras profundas (3) (4).

### **2.1.3.2 Fresado vertical**

El husillo porta herramienta es apoyado de manera vertical generalmente giratorio en ángulo recto con la superficie de la mesa, las herramientas utilizadas en este método varían, desde fresas para extremos hasta fresas para alisar, con movimientos longitudinales y transversales pueden producir piezas: escariadas, barrenadas, taladradas, fresado de matrices, tallado de ranuras rectilíneas y circulares (3) (4).

### **2.1.4 Cepillado**

El cepillado es una operación de maquinado con desprendimiento de viruta, el cual se creó con la finalidad de producir superficies planas horizontales o verticales, donde las piezas son sujetas a una mesa, el cepillo tiene un solo movimiento del brazo o carro de vaivén, mientras que los movimientos de profundidad del corte y avance se desarrollan a medida que la mesa de trabajo sube o baja (2).

Los procesos de cepillado se pueden clasificar en cuatro tipos de acuerdo a las características de construcción:

- De batidor doble: tiene un banco grande y pesado sobre los cuales la mesa de trabajo se mueve en movimiento de vaivén sobre las guías.
- de bordes: está diseñada para el cepillado de bordes de planchas, las cuales permanecen fijas durante el maquinado, la herramienta realiza un movimiento de vaivén que es llevado a cabo por un carro móvil montado lateralmente, la herramienta puede ser movida verticalmente y horizontalmente y el soporte es girado de tal modo que el corte ocurra en las dos direcciones del recorrido del carro.
- Tipo foso: el trabajo permanece estacionario y la herramienta efectúa un movimiento oscilante, cuando se debe cepillar una pieza grande requiere una mesa de trabajo suficientemente grande y el peso de la pieza de trabajo dificulta el movimiento de vaivén.
- De lado abierto: este proceso vence la limitación del espacio entre las columnas, algunas máquinas son convertibles, siendo posible agregar un segundo bastidor si se desea convertir en cepillado de doble bastidor.

### **2.1.6 Aserrado**

Es una operación básica de maquinado en la cual se produce viruta por la acción de pequeños filos cortantes, llamados dientes colocados a lo largo de una hoja metálica. Los dientes forman la viruta de una forma progresiva debido a la fricción generada por el material y los dientes de la herramienta de trabajo.

El aserrado puede separar porciones de tamaño considerable de la pieza de trabajo, eliminando una pequeña cantidad de material en forma de viruta, la hoja es la parte más importante durante el proceso de aserrado aunque solo una pequeña parte de la sierra está en contacto que en su mayoría forman una banda sin fin el cual puede variar de dos formas:

- Aserrado horizontal: su principal característica es que la pieza de trabajo se mantiene estacionaria, mientras realiza el corte en una u otra dirección llamado también movimiento de vaivén al tiempo de que es alimentada en dirección descendente a la pieza de trabajo
- Aserrado vertical: la principal característica de esta variante es que la banda sin fin se mueve hacia abajo, formando una hendidura en la pieza de trabajo, la cual puede alimentarse hacia la sierra sobre cualquier plano en cualquier dirección (3) (4).

### **2.1.7 Esmerilado**

El esmerilado consiste en la eliminación del material, mediante la utilización de partículas abrasivas fijas, las cuales se encuentran aglutinadas en un disco, el cual genera virutas provocando una menor deformación de la pieza de trabajo el proceso de esmerilado requiere de ciertas condiciones:

- Fuerza de corte: la presión necesaria que debe existir entre la pieza de trabajo y los gránulos abrasivos debe ser lo suficientemente alta para extraer la viruta.
- Fijación del abrasivo: el granulo abrasivo debe permanecer fijo en el sentido horizontal mientras la pieza de trabajo, para conseguir la fuerza suficiente de corte.
- Penetración vertical: el abrasivo debe tener soporte en sentido vertical para remover la cantidad de material deseado, ya que la velocidad de remoción de material y la cantidad de remoción están relacionados entre sí.

El esmerilado es similar al fresado, en el cual el movimiento es un movimiento rotatorio axial combinado de trabajo. El movimiento de alimentación es opuesto a la rotación del trabajo de torneado en el cual el movimiento es de corte (2) (3) (4).

### **2.1.8 Troquelado**

El troquelado es un conjunto de operaciones de corte y estampado, el cual no produce viruta y las láminas son sometidas a diferentes procesos los cuales son:

a) Corte o punzonado (realizado generalmente en frío)

Proceso de corte mediante el cual la herramienta separa una parte del material de otra; la lámina para que pueda ser cortada debe tener un espesor ya sea menor o igual al diámetro del punzón.

b) Doblado y/o curvado (proceso realizado en frío)

Considerado como la operación más sencilla, realizada después del corte o punzonado; se debe tener en cuenta el radio de la curvatura, pero éste no debe ser mayor o igual que el espesor de la lámina, con el fin de no estirar excesivamente el material a trabajar y llegue a fracturar.

c) Embutido (se puede realizar en caliente o frío)

Consiste en transformar una lámina de metal en cuerpo hueco tridimensional. El material a embutir debe ser dulce y recocido, y esta operación no debe de modificar el espesor de la lámina, por lo tanto, el troquel se debe de lubricar para dar mayor fluidez y proteger las partes contra el rozamiento.

### **2.1.9 Corte por presión de chorro de agua**

Es un proceso de corte (WJ por sus siglas en inglés) por medio de alta presión de agua consigue remover el material no metálico deseado, haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad con presiones superiores a los 400 MPa (60Ksi), la cual produce el acabado deseado. Al ser un procedimiento de corte en frío es utilizado en materiales que son susceptibles al calor, ya que no afecta a los materiales por que no los endurece ni deforma.

La principal característica de este proceso consiste en forzar un chorro de agua a presión, por una boquilla con un diámetro que oscila entre 0.5 y 1 mm, el chorro de agua condiciona la viabilidad del proceso, ya que si el chorro de agua es cónico se pierde el poder de corte, precisión y calidad. En un proceso en el cual la generación de viruta no es un problema (5) (6).

Las principales ventajas de este proceso son:

- Al no existir herramientas de corte, no existe el desgaste de la misma.
- El corte es de excelente calidad, en la mayoría de los casos no necesita un acabado posterior.
- Es un proceso sin aporte de calor, no afecta la zona del material sobre el cual se trabaja.
- No se generan tensiones residuales debido a que el proceso no genera esfuerzos de corte.
- No genera contaminantes.

**Tabla 2. 1 Comparación de los procesos de corte convencionales (2)(3)(4).**

<b>Procesos de corte</b>	<b>Características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Torneado</b>	La pieza de trabajo es sujeta a una mesa, mientras que la herramienta es la que hace el movimiento de avance.	Permite hacer figuras cónicas, se puede ajustar la porta herramientas para cambiar rápidamente de herramienta.	Solo para producción de piezas circulares, el arranque de material se tiene que hacer en varias pasadas, se presenta desgaste de las herramientas.
<b>Taladrado</b>	Se producen en piezas de trabajo sólidas, por medio de herramientas giratorias.	Dos filos de corte son más eficientes.	El uso de las herramientas tiene un costo significativo.

<b>Fresado</b>	Proceso de corte versátil, usado en la manufactura de piezas de simetría no rotacional.	Existen máquinas horizontales y verticales, si se utilizan apropiadamente aceleran la producción.	En forma complejas de maquinado los tiempos de producción son muy elevados, se presenta desgaste de las herramientas
<b>Cepillado</b>	La pieza de trabajo se encuentra estacionaria y la herramienta realiza movimientos.	Se pueden usar cepillos horizontales y verticales.	Sólo es para piezas planas el desgaste de la herramienta es considerable.
<b>Aplanado</b>	El material a cortar es el que realiza el movimiento, mientras que la herramienta esta estacionaria	Se le puede dar un buen acabado superficial a las piezas.	El tiempo de duración del proceso es muy lento.
<b>Aserrado</b>	Una cortadora de ranuras muy angosta se convierte en sierra.	Los dientes esmerilados con precisión no necesitan penetrar mucho en la dirección radial.	Los bordes individuales del corte se descomponen.
<b>Esmerilado</b>	Es un proceso muy utilizado, la geometría del esmerilado puede ser tan variable como los de otros procesos.	Se presta para el control CNC.	Para realizar esmerilados a alta velocidad se necesitan ruedas especialmente construidas.
<b>Troquelado</b>	Proceso de corte y formado de láminas automotrices.	Es un proceso que no deja virutas en la superficie cortada.	Depende de otros procesos para poder realizarse.
<b>Corte por presión de chorro de agua</b>	Es una máquina hidrodinámica, para realizar operaciones de corte y devastado de materiales.	No produce calor, las rebabas producidas son mínimas, puede iniciar en cualquier parte de la pieza.	Es utilizado en metales suaves como: piel, ladrillo, papel, caucho, plástico, y algunos materiales compuestos.

## 2.2 Procesos de corte no convencionales

### 2.2.1 Corte electroquímico

Conocido como ECM (por sus siglas en inglés), es un proceso inverso al del electroformado, la característica principal de este proceso, es que la pieza a trabajar debe tener conductividad eléctrica; se sumerge en un electrolito (solución de cloruro de sodio, nitrato de sodio y ácido sulfúrico) el cual emplea un cátodo de metal o grafito, que es negativo de la forma que se va a producir, y éste es alimentado sobre la pieza de trabajo a una rapidez controlada. El electrolito se hace circular en muchas ocasiones a través del cátodo, para facilitar el desalojo del hidróxido metálico y ventilar el hidrógeno formado durante la electrólisis.

Tabla 2. 2 Tasa específica de remoción de material en el corte electroquímico (3)

METAL	TASA ESPECÍFICA DE REMOCIÓN mm <sup>3</sup> /Amin
Hierro (2)	2.21
Hierro (3)	1.47
Aluminio (3)	2.06
Cobre (1)	4.39
Cobre (2)	2.20
Níquel (2)	2.11
Níquel (3)	1.36
Titanio (3)	2.19
Titanio (4)	1.65

Como la remoción del material ocurre en el estado iónico, la dureza del material no es relevante; la integridad de la superficie es excelente, además no presenta daño por el calor; en consecuencia, los esfuerzos residuales son mínimos o inexistentes.

A menudo se cortan las súperaleaciones y los aceros tratados térmicamente, así como las aleaciones de aluminio, que son susceptibles a la fragilidad de



hidrógeno, las que deben ser calentadas a 200°C durante algunas horas después del proceso de corte (3) (7).

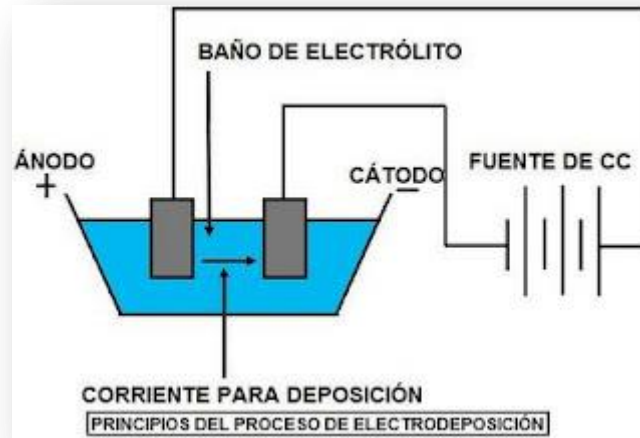
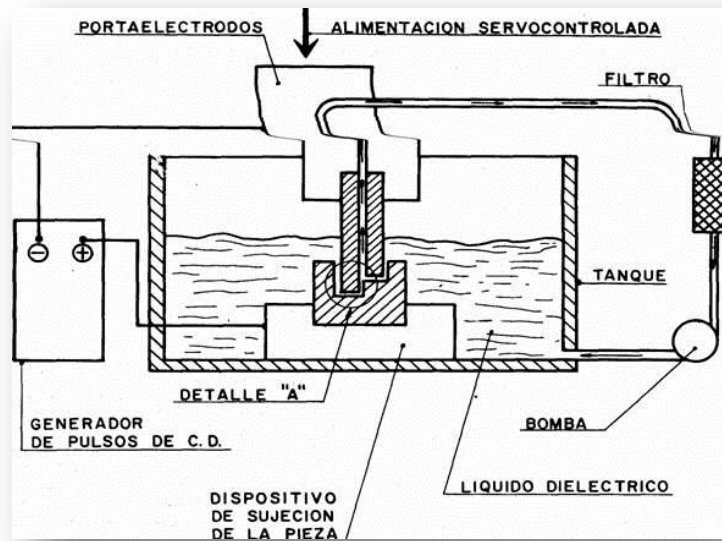


Figura 2. 1 Esquema corte electroquímico (23)

### 2.2.2 Corte por descarga eléctrica

Este proceso EDM (por su siglas en inglés) no depende de la acción química ya que el metal se desprende a causa del calor intenso de la chispas eléctricas. El ánodo (pieza de trabajo) y el cátodo (herramienta), hechos de metal (generalmente cobre) o grafito, son sumergidos en un fluido dieléctrico: en el sistema se le aplica una corriente directa con potencia de hasta 300 V., a bajo voltaje el fluido actúa como aislante, a medida que el voltaje se acumula, el fluido sufre una descomposición dieléctrica, la cual se presenta a causa de que una gran cantidad de electrones que aparecen en la banda de conducción y la chispa pasa a través de la separación, por lo tanto las temperaturas se elevan lo suficiente para ocasionar que un poco de material de la pieza de trabajo sea vaporizado. Después de una descarga controlada, el voltaje disminuye a un valor bajo, es considerado como un tiempo de espera, para restablecer la película aislante mediante la desionización del fluido dieléctrico el cual debe cumplir funciones adicionales: se suministra entre la pieza de trabajo y la herramienta para enfriarlas y retirar los residuos. Se debe filtrar continuamente para retirar los residuos ya que estos pueden llegar a causar cortos circuitos.



**Figura 2. 2 Componentes básicos del sistema de EDM (23)**

Los acabados superficiales están en función de la cantidad de factores que intervienen y se vuelven más rugosos con mayores densidades de corriente, así como el uso de un dieléctrico más viscoso y el uso de una frecuencia de impulso menor. Estos mismos factores que influyen en una calidad de corte más rugosa, provocan un sobre corte en el material y una zona afectada por el calor mayor. Una pequeña porción del material fundido se vuelve a depositar, y también llega a ocurrir ablandamiento de la pieza, por lo cual se recomienda trabajar con densidades de corriente bajas para determinar el corte. El proceso es insensible a la dureza del material, por lo tanto tiene una amplia aplicación para fabricar: trabajos de lámina, forja, extrusión, matrices de acero endurecido (3) (8).

La remoción de material no solo ocurre en la pieza de trabajo, también se erosiona la herramienta.

Tabla 2. 3 Piezas producidas por herramientas en función del insumo utilizado. (3)

MATERIAL	PIEZA DE TRABAJO
METAL	3
GRAFITO	100

### 2.2.2.1 Corte por descarga eléctrica por hilo

Es un método de corte extremadamente útil para la elaboración de los rasgos internos y muy bien detallados de las herramientas y dados. El corte por electroerosión con alambre puede llegar a tener similitud en algunos aspectos con el proceso de corte de aserrado, mientras en este proceso el arranque del material se realiza por medio de dientes de la sierra en el proceso por electroerosión, el hilo actúa mediante el arco eléctrico que forma con la pieza de trabajo. La ranura que se forma es un poco más ancha ( $25\mu\text{m}$ ) que el hilo. La alimentación del hilo es continua mediante el tiempo que se genere el trabajo. El material utilizado en el hilo es regularmente latón, tungsteno o molibdeno de 0.08 a 0.3 mm de diámetro (9).

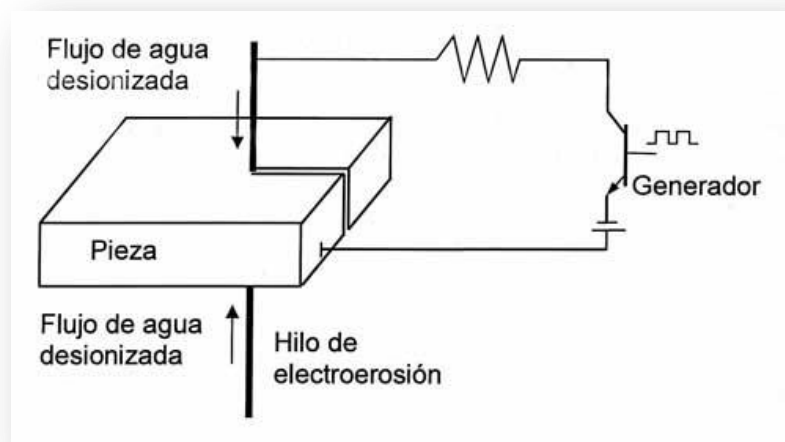


Figura 2. 3 Esquema representativo, corte EDM con hilo (23)

Las ventajas del corte por descarga eléctrica por hilo o (WEDM por sus siglas en inglés):

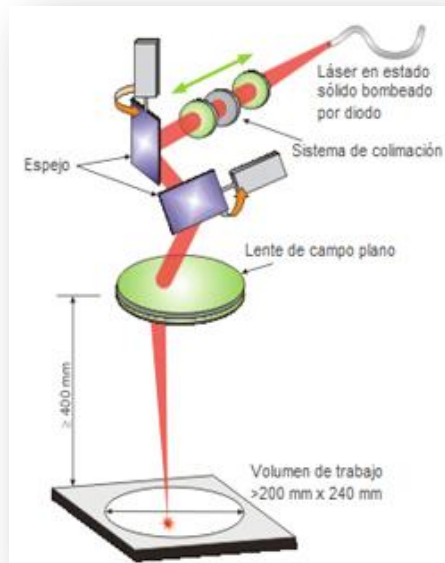
- Maquinado de formas complejas que pueden ser difíciles de realizar por herramientas de corte convencionales (9).
- Maquinado de materiales extremadamente duros con una alta precisión (9).
- Maquinado de piezas de trabajo, donde los procesos convencionales puede llegar a dañar las piezas por excesivas fuerzas de corte (9).
- No existe contacto directo entre la pieza de trabajo y la herramienta (9).

### **2.2.3 Corte por rayo láser**

Es la amplificación de la luz mediante estimulación de emisión de radiación o láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Al estimular eléctricamente los átomos de algunos materiales (cristales y ciertos gases), los átomos de los electrones se desplazan temporalmente a niveles electrónicos de mayor energía dentro de la estructura. Cuando los electrones regresan a su nivel estable liberan fotones de energía luminosa; esta energía puede intensificarse y ser enfocada en un haz de luz coherente, colimado y monocromático. Las aplicaciones han proliferado ya que se obtienen densidades de energía muy alta; no es necesario el vacío, el haz de luz se dirige rápidamente y fácil por los instrumentos ópticos adecuados.

Anteriormente se utilizaba rubí (cristal de  $Al_2O_3$  con iones de Cr) en los primeros láseres, pero estos son útiles sólo para tareas de alineación y medición y, no para efectos de manufactura; en este caso se emplean tres clases de láseres, las cuales proporcionan una longitud de onda diferente de

luz, a medida que la longitud de onda disminuye, el ancho del corte también disminuye.



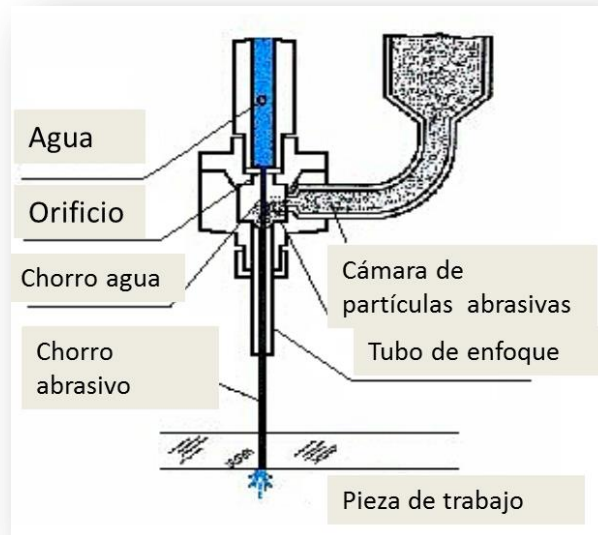
**Figura 2. 4 Esquema de corte por rayo láser (24).**

Los rayos del láser se pueden enfocar por medio de materiales transparentes de dependiendo de la longitud de onda que se genera (seleniuro de zinc o germanio para el CO<sub>2</sub>, y vidrios convencionales para el láser YAG). Dependiendo de la densidad de la energía generada, un poco de material se funde o se ablanda y otro se evapora, creando el corte. Frecuentemente a la superficie de la pieza de trabajo se le suministra oxígeno para incrementar la absorción de energía. La reacción exotérmica de oxidación suministra calor y acelera la fusión, además el óxido se funde a temperatura menor y se retira (3) (5) (10).

### **2.2.4 Corte por chorro de agua abrasivo**

El corte por chorro de agua abrasivo contiene partículas como son: carburos de silicio y óxido de aluminio. Con el incremento de la tasa de remoción de

material por el corte AWJ (por sus siglas en inglés abrasive water-jet), metálicos, no metálicos y algunos materiales compuestos avanzados de varios espesores que solo se pueden cortar en varias capas.



**Figura 2. 5 Esquema del procesos de corte por presión de chorro de agua abrasivo (9).**

Este proceso es conveniente especialmente para los materiales sensibles al calor. Las velocidades del corte pueden ser tan rápidas como 7.5 m/min para plásticos reforzados, pero mucho menores para los metales, por lo cual este proceso no es aceptado para situaciones donde los requerimientos de producción son muy altos. El mínimo tamaño de hueco que se puede producir de una manera satisfactoria es de 3 mm, con una profundidad de 25mm. La vida útil de las boquillas ha mejorado, ya que la fabricación de las mismas son elaboradas con: rubís, zafiros y algunos materiales compuestos a base de carburos (5) (10).

### 2.2.5 Corte por plasma

El procedimiento consiste en provocar un arco eléctrico a muy elevadas temperaturas, donde los electrones tienen suficiente energía para salir de su órbita, generando iones de carga positiva; a través de una boquilla del soplete muy pequeña, lo cual concentra extraordinariamente la energía cinética del gas empleado (oxígeno), elevando las temperaturas a 9400°C.

La remoción del material es principalmente fundiendo y/o vaporizando el material de una manera controlada, rápida, la anchura de la ranura es pequeña y el acabado superficial es bueno. En partes con espesor de 150 a 200 mm pueden ser cortadas con un promedio mayor de remoción de material superior a otros procesos (5).



Figura 2. 6 corte por plasma (22)

**Tabla 2. 4 Comparación de procesos no convencionales (2)**

	Láser	EDM por hilo	Plasma	Chorro de agua abrasivo
Espesor máx., mm	12 acero, 4 AL	200	200	200
Ancho de corte	0.2-0.5	0.1-0.5	1-4	0.8-1.5
Tolerancia, ± mm	0.02-0.04	0.01-0.03	1	0.2-0.4
Rugosidad del borde, R <sub>a</sub> μm	1-2	0.2-1	1-10	1-2
Inclinación del borde, grados	0.5-1	0	1-3	0
Zona afectada por el calor mm <sup>3</sup>	0.03-1	0.05-0.5	1-5	0
<b>Materiales donde se aplica</b>				
<b>Metal</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Cerámico</b>	Si	No*	No	Si
<b>Plástico</b>	Si	No	Si+	Si

\*si el material es conductor, +si la superficie quemada es aceptable



## 2.3 Procesos de corte híbrido

El reciente progreso realizado en los campos de la aviación, medicina y sobre todo en la industria automotriz ha creado la necesidad de maquinar nuevos materiales, la variedad de técnicas y los principios de desarrollo nuevas tecnologías, los beneficios de los procesos híbridos de corte son aplicados para maquinar materiales más duros, en un menor tiempo y con mayor precisión.

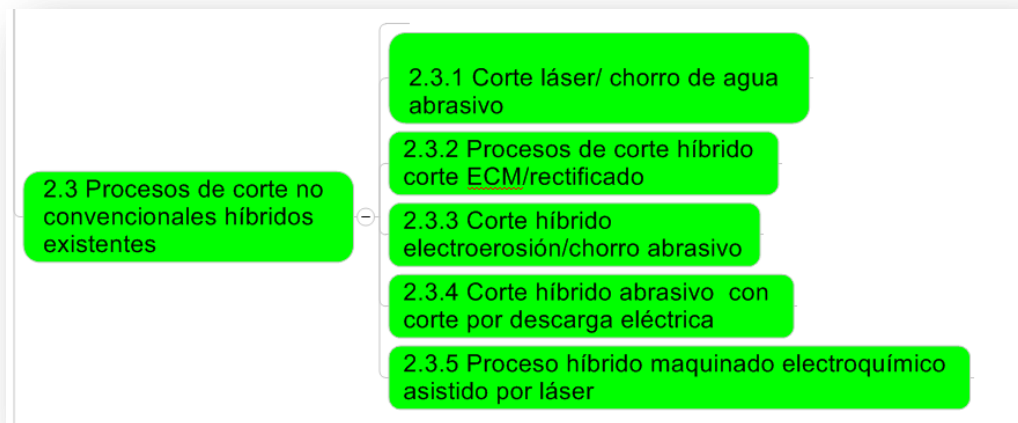
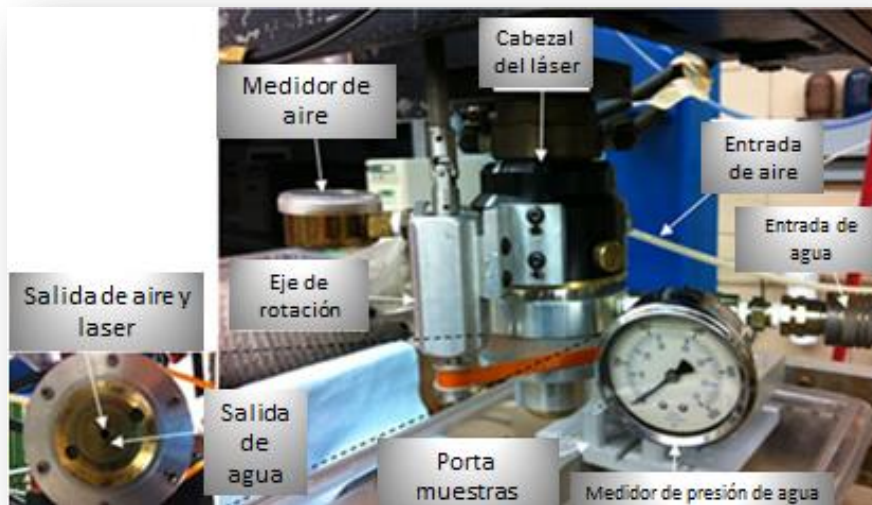


Figura 2. 7 Esquema de procesos híbridos de corte

### 2.3.1 Corte láser/ chorro de agua abrasivo

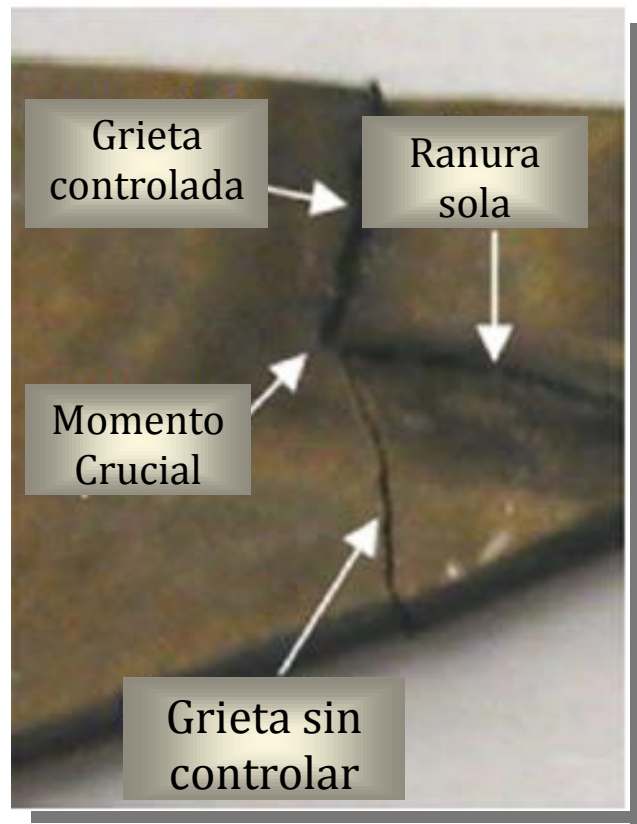
Los procesos de corte láser descrito en el punto 2.2.3, y el corte de chorro de agua abrasivo el cual es descrito en el punto 2.2.4; en conjunto forman un proceso de corte híbrido, el maquinado láser/chorro de agua (LWJ por sus siglas en Inglés) es un nuevo procedimiento que es comúnmente aplicado a materiales frágiles, el rayo láser genera una ranura a través del material debido a la evaporación de la fase de estado sólido, la cual genera calor y ondas de choque, mientras que el chorro de agua realiza el enfriamiento, el láser y el chorro de agua generan tensiones de corte, y los cambios en las tensiones

producidas generan grietas y mecanismos de fractura que son controladas en la pieza de trabajo.



**Figura 2. 8 Descripción máquina híbrida Láser/Chorro de agua abrasivo (11).**

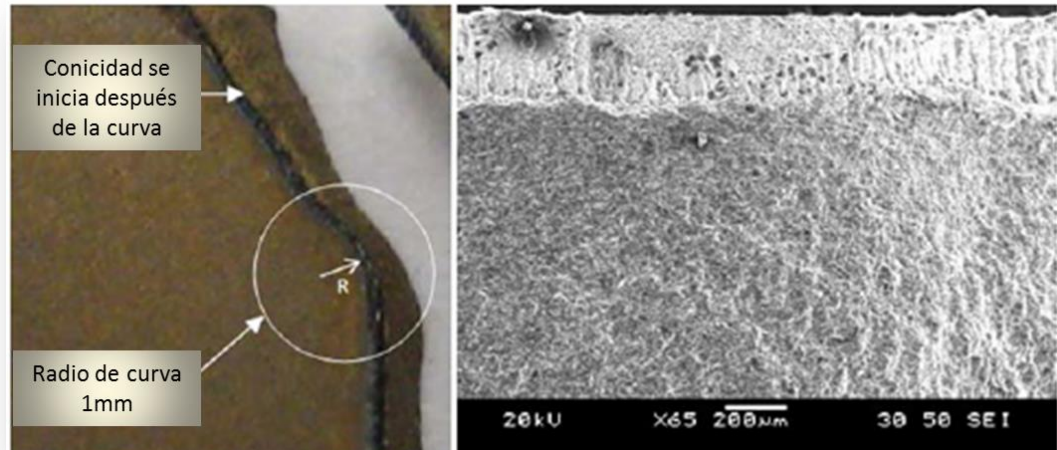
El LWJ se mantiene como desafío para los cortes en dos dimensiones lo cual fue demostrado por: Ammar Melaibari, Pal Molian, Pranav Shrotriya en el estudio **“Corte bidimensional de nitruro de boro policristalino utilizando el método híbrido láser/chorro de agua abrasivo”** en febrero del 2010: controlando los parámetros del el rayo láser CO<sub>2</sub> de 400W, y el chorro de agua abrasivo trabajando con presiones de 0.4-14 MPa (60-200 Psi), cortando la placa de nitruro de boro que es el segundo material más duro existente en la tierra, a una velocidad de 44.33 mm/seg. con una orientación de cortes bi-dimensionales de 60°, 108°, 120°, 135°, seguidos de un radio de 1 mm.



**Figura 2. 9 Una grieta incontrolada reproducidos en el punto de inflexión cuando el giro es cerca del borde (11)**

En este proceso genera un mecanismo de fractura se controla por medio de la evaporación del material causado por la energía producida por el rayo láser y el cono causado por el mecanismo de erosión como el corte por chorro de agua (LWJ); este proceso comienza mediante el calentamiento por láser, lo cual genera un daño localizado, logrando la transformación de fase de las capas superficiales seguido por el chorro de agua la cual enfría rápidamente las capas superficiales, generando un campo de esfuerzos del material transformado y propagando las grietas localizadas a través del espesor lo que da como resultado la separación del material. El mecanismo de fractura controlada condujo a la realización de un corte completo a través del grosor determinado de la pieza con menos energía y menor tiempo, LWJ provee grandes beneficios

para las placas de PCBN como son: Ancho de la ranura de corte muy pequeño determinado por el tamaño de la grieta, la pequeña conicidad del proceso de corte, mayor velocidad, y el daño térmico mínimo (11).



**Figura 2. 10** En la vista izquierda, parte superior del corte angular LWJ de una curva con 1 mm de radio en la muestra PCBN independiente que muestra el cono. En la derecha, una imagen de SEM de la vista transversal de la vuelta (11)

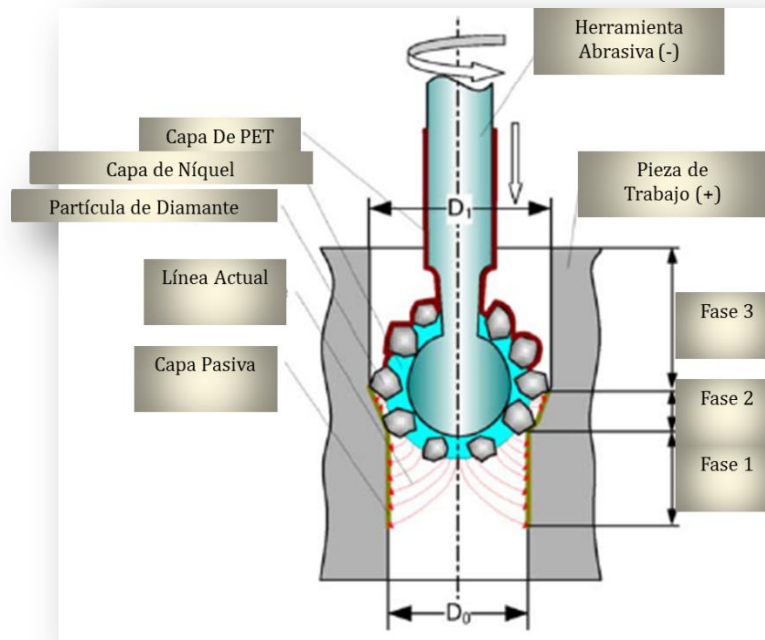
### **2.3.2 Procesos de corte híbrido corte ECM/rectificado**

Este proceso describe el uso de los procesos de maquinado ECM descrito en el punto **2.3.1** y el proceso de rectificado utilizado para hibridar con el maquinado electro químico propone el uso de una herramienta giratoria recubierta con carburos de diamante la cual rotará a una muy alta velocidad removiendo el material de una forma mecánica donde también se utiliza como cátodo para remover químicamente, en el cual puede ser balanceado: determinando racionalmente la tensión de mecanizado, la velocidad de rotación de la herramienta, la tasa de avance de la herramienta, y la composición del electrolito. Se han producido agujeros de 0.6 mm con bordes afilados sin rebabas.

En este proceso una varilla de metal con forma esférica, la cual debe ser el conductor de electricidad, mientras que el recubrimiento abrasivo debe de tener la característica de no conductor. Durante el proceso de maquinado la herramienta de trabajo es cargada eléctricamente de forma negativa (cátodo) y la pieza de trabajo se desempeña como ánodo. Las partículas de diamante abrasivo en la herramienta deben de sobresalir de la superficie conductora; esto establece una pequeña separación entre la capa de níquel de la herramienta y la pared lateral del agujero.

El proceso de remoción ocurre en tres fases: la acción de remoción electroquímica comienza cuando la separación se llena de electrolito y la herramienta es eléctricamente cargada.

- **Fase 1:** es acción electroquímica, la cual rompe la capa pasiva en la superficie del agujero gracias a la acción del electrolítico nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ).
- **Fase 2:** es la combinación de los la acción electrolítica y el rectificado, a medida que la alimentación de la herramienta baja, la separación disminuye hasta que del abrasivo de la herramienta hace contacto con la pieza de trabajo, los granos del abrasivo eliminan la capa pasiva suave no reactiva, dejando expuesto metal fresco para que continúe una reacción la electrolítica. Simultáneamente, el electrolito atrapado entre los granos abrasivos y la pieza de trabajo forma pequeñas celdas electrolíticas, así la disolución electroquímica ocurre en la pieza de trabajo, esta fase finaliza cuando el diámetro máximo es alcanzado.
- **Fase 3:** para la obtención de bordes afilados y alta precisión dimensional del agujero, la herramienta debe estar aislada, excepto la primera mitad de la esfera. Por lo tanto, no hay ninguna acción de remoción, si le herramienta no está asilada, la disolución del material continua por la superficie del agujero, lo cual genera un orificio cónico.



**Figura 2. 11 Vista esquemática del proceso híbrido propuesto de eliminación electroquímica rectificadora. (12)**

En el 2011 en el departamento de ingeniería mecánica y eléctrica de la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Nanjing Jiangsu China, D Zhu, Y.B Zeng, Z.X Xu, X.Y Zhang, experimentaron con la tecnología de corte ECM/rectificado con una placa de acero inoxidable 321(acero inoxidable austenítico, estructura cúbica centrada en las caras bajo las siguientes condiciones:

**Tabla 2. 5 Referencia de variables experimentales (12)**

<b>Condiciones experimentales</b>	
<b>Material de pieza de trabajo</b>	Acero inoxidable 321
<b>Espesor de la pieza de trabajo</b>	300 $\mu\text{m}$
<b>Diámetro de la herramienta</b>	500 $\mu\text{m}$
<b>Electrolítica</b>	NaNO <sub>3</sub>
<b>Concentración</b>	10 wt. %
<b>Temperatura del electrolítico</b>	25 °C
<b>Velocidad de rotación</b>	10,000-30,000 rpm
<b>Voltaje de maquinado</b>	3.5-7.5 V
<b>Velocidad de alimentación</b>	4-6 $\mu\text{m/s}$

La Figura 2.12 muestra en cambio de en la rugosidad ( $R_a$ ) de la superficie y el ángulo cónico con la velocidad de rotación de la herramienta para rectificar. Las muestras se realizaron con voltaje constante de 4.5V y una velocidad de avance de 5.5mm/s lo cual demuestra que si las velocidades de avance son muy altas o muy bajas la calidad de la pieza maquinada no es satisfactoria, ya que el proceso no está balanceado debido a que existe una discrepancia entre el voltaje y la velocidad los cuales pueden ser que el voltaje en el cual se realiza el trabajo es muy alto y la velocidad de giro es muy baja o viceversa.

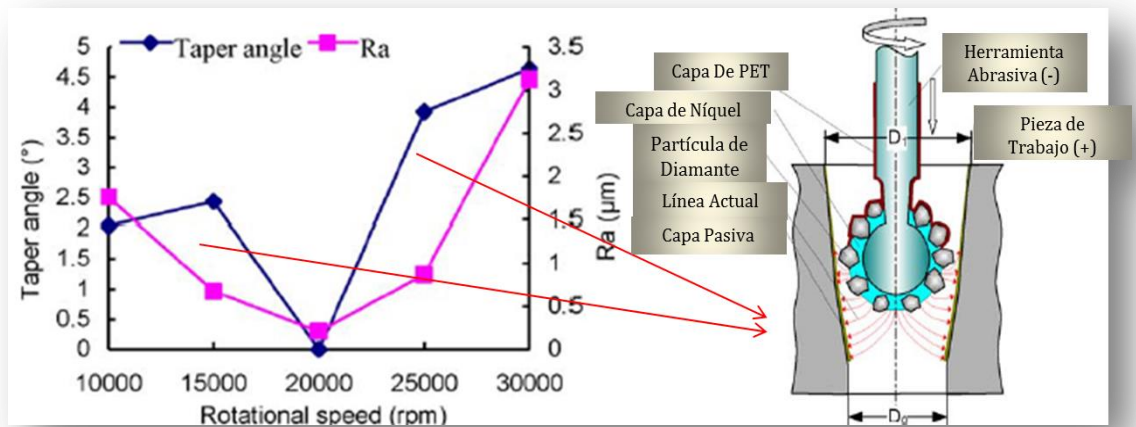


Figura 2. 12 Variación en rugosidad (Ra) y la velocidad y el ángulo de conicidad con la velocidad de rotación de la herramienta. (12)

Para encontrar las velocidades óptimas para el trabajo a realizar en el acero inoxidable 321, se trabajó con un rango de parámetros, ya que al emplear con un alto voltaje y una baja velocidad de corte, la acción electroquímica del electrolito produce un sobre corte y una tolerancia muy pobre, de lo contrario cuando el voltaje es muy bajo y el movimiento de la herramienta es muy elevado, las partículas abrasivas contenidas en la herramienta, son forzadas a realizar el trabajo de corte lo que genera un incremento en la profundidad del corte, un excesivo desgaste de la herramienta y con frecuencia un corto circuito.

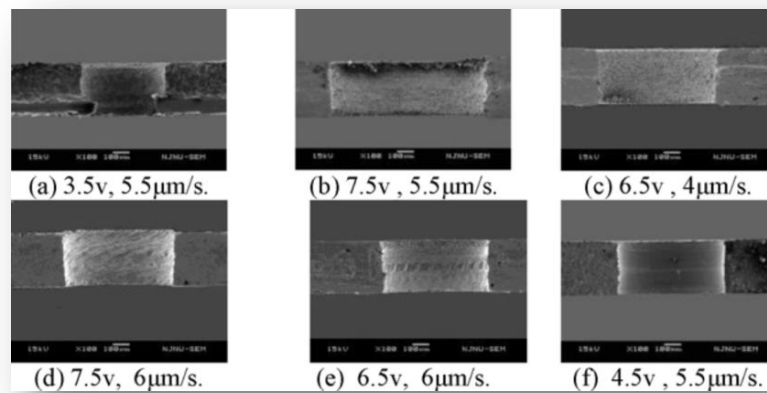


Figura 2. 13 Sección de agujeros maquinados con diferentes parámetros de trabajo: velocidad de alimentación y voltaje (12)



La calidad de la pieza a maquinar está relacionada con el material a ser removido y el balance entre el maquinado electroquímico y el rectificado, para un trabajo de precisión se requiere de los parámetros adecuados para tener la calidad deseada en el acabado de la pieza maquinada (4.5 V, 5.5 $\mu$ m), ya que si no existe el balance adecuado, los bordes podrían tener demasiadas rebabas (12).

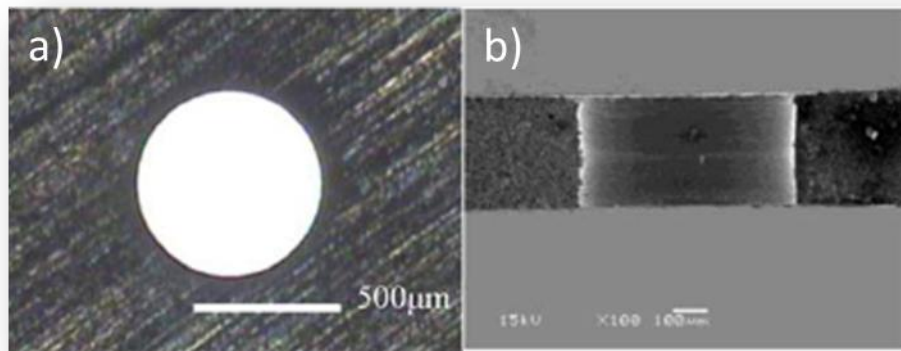


Figura 2. 14 agujero maquinado con óptimos parámetros a) parte superior del agujero maquinado, b) corte seccional visto por SEM (12)

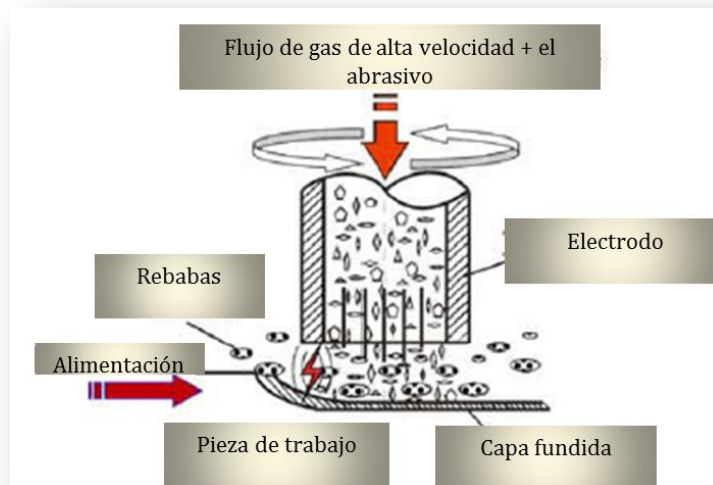
### 2.3.3 Corte híbrido electroerosión/chorro abrasivo

Este proceso de maquinado es una combinación descarga eléctrica o electroerosión descrito en el punto 2.2.2 y un chorro abrasivo (AJM por sus siglas en inglés), el cual utiliza partículas abrasivas como lo son  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiC}$ .

Tabla 2. 6 Descripción de las partículas abrasivas usadas en el proceso EDM/AJM (13)

Propiedades de las partículas abrasivas		
Propiedad	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiC}$
Punto de fusión °C	2050	2500
Conductividad térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	22	120
Resistencia eléctrica ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	>1014	105

Las partículas son suministradas por un gas que inciden en la superficie del material para eliminar la capa fundida que deja el proceso EDM, aumentando la eficiencia de remoción de material, reduciendo la rugosidad de la superficie.



**Figura 2. 15 Esquema de funcionamiento de proceso híbrido de maquinado EDM/AJM (13)**

Los departamentos de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica Nan Kia y la Universidad de Ciencia y Tecnología Chein Hsi, a cargo de: Yan-chenng LIN, Yuan-feng CHEN, A-cheng WANG, Wan-lin SEI, experimentaron con la tecnología del proceso de maquinado híbrido en un material SKD 61 acero herramienta con una dimensión de 30mmx10mmx10mm. Los parámetros esenciales del maquinado como son: pico de la corriente ( $I_p$ ), duración del impulso ( $t_p$ ), tamaño del grano abrasivo, tipo de abrasivo y la presión de aire ( $P_A$ ), fueron cambiados para ver el efecto que tienen en las características del maquinado durante 30 min.

Tabla 2. 7 Condiciones de maquinado (13)

Condiciones de trabajo	Descripción
Pieza de trabajo	SKD 61 (-)
Electrodo	Cu (+)
Factor de funcionamiento	0.5
Pico de corriente (A)	6, 9, 12, 15
Duración del pulso ( $\mu\text{s}$ )	200, 500, 750, 1000
Ni hay tensión de carga (V)	140
Medio dieléctrico	Aire
Presión (MPa)	0.3, 0.5, 0.7, 0.9
Tipo de abrasivo ( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ )	SiC, $\text{Al}_2\text{O}_3$
Velocidad de flujo del abrasivo	6
Tamaño del abrasivo	80#, 220#
Tiempo de trabajo (min)	30

Los resultados muestran que el proceso híbrido de EDM/AJM incorpora los efectos de abrasión sobre la superficie maquinada, origina la eliminación del material mejorando el acabado superficial lo cual obtiene beneficios de maquinado con mayor velocidad de material removido (MRR por sus siglas en inglés).

La velocidad de remoción de material del proceso híbrido aumenta con la corriente utilizada y la duración del primer impulso eléctrico generado. Por otro lado el uso del abrasivo adecuado y la presión de aire correcta promueven una mayor tasa de remoción de material.

La rugosidad superficial (SR por sus siglas en inglés) que genera el proceso híbrido aumenta con la duración del primer impulso generado la cual se reduce con la duración del pulso (13)

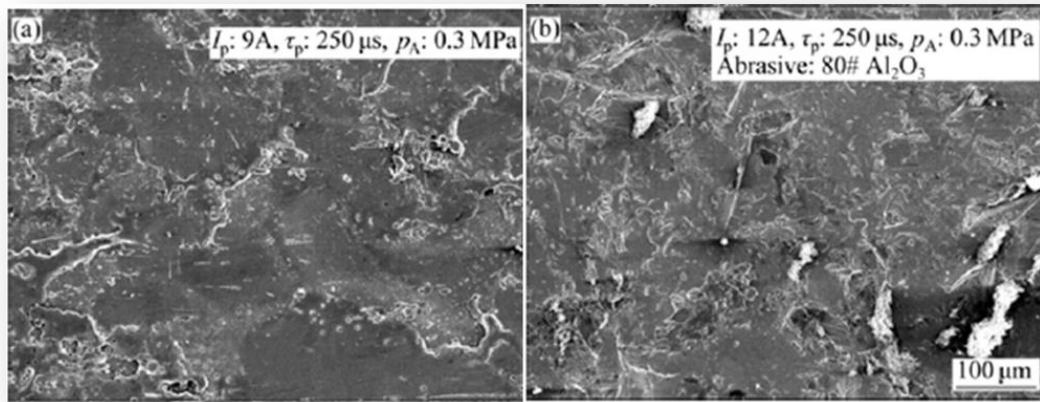


Figura 2. 16 Imagen comparativa de superficie asociados a) proceso sin partículas abrasivas b) procesos con partículas abrasivas (13)

### 2.3.4 Corte híbrido abrasivo con corte por descarga eléctrica

En este proceso de corte el material es removido por una serie de descargas eléctricas y por la acción abrasiva de las partículas (AEDM por sus siglas en inglés) en el medio dieléctrico con el objetivo de mejorar el flujo de remoción de material y mejorar la calidad de la superficie maquinada, las partículas abrasivas en forma de polvo se mezclan con el fluido dieléctrico, para mejorar la circulación mediante un sistema de agitación. El polvo metálico conductor de la electricidad reduce y el fluido incrementa la separación de la chispa entre la pieza de trabajo y el electrodo.

Los factores que influyen en el maquinado por el proceso AEDM son:

- Los parámetros eléctricos
- Las propiedades del electrodo
- La pieza de trabajo
- El fluido dieléctrico
- Las propiedades del polvo abrasivo

El mecanismo de maquinado del proceso AEDM es diferente al proceso EDM, por la influencia de las partículas eléctricamente cargadas que son aceleradas y generan un movimiento de zigzag; las partículas llegan a actuar como conductores. Por lo tanto las partículas disminuyen la dureza entre el aislante y el fluido dieléctrico (14) las series de descargas comienzan en el área electrodo, las partículas abrasivas incrementan la separación entre la pieza de trabajo y el electrodo, mientras que la separación de la chispa se reduce el proceso se vuelve más estable mejorando la rugosidad y la velocidad de remoción de material de las piezas. (15)

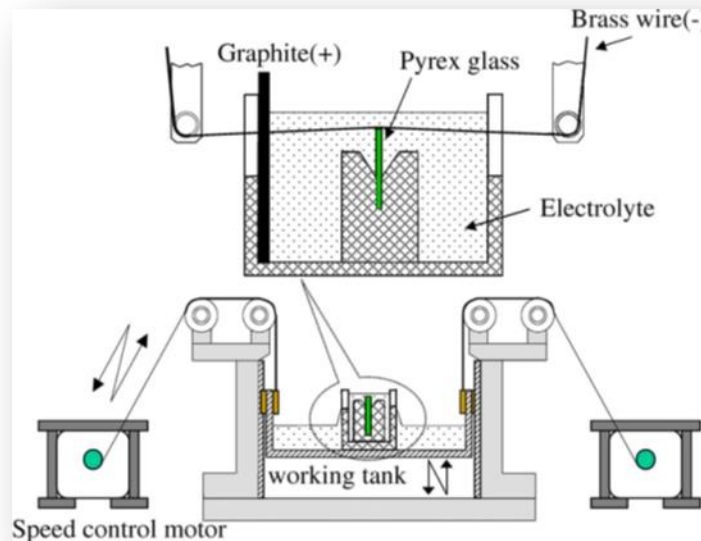


Figura 2. 17 Esquema de operación de máquina AEDM (16)

En el 2005 en el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Central Nacional, en Chung-Li Taiwan los investigadores: C.T. Yang, S.L. Song, B.H Yang, F.Y. Huang realizaron un estudio llamado “Mejorar el rendimiento de mecanizado de alambre mecanizado electroquímico de descarga mediante la adición de SiC abrasivo al electrolito”, este método combina los procesos de corte WEDM, fluido dieléctrico con partículas abrasivas con el cual decidieron cortar materiales como el vidrio y barras de cuarzo, usando un alambre de latón

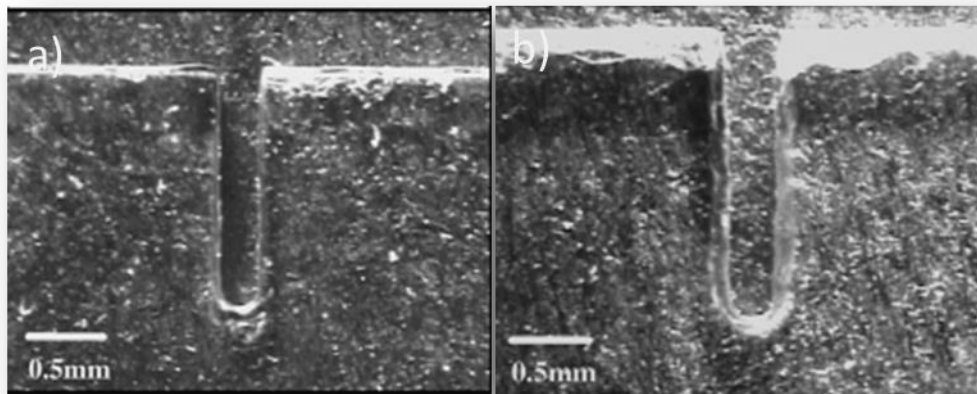
con un diámetro de 0.25mm el cual se puso en contacto con un cátodo y una placa de grafito como ánodo, el material pasivo usa como una manera preventiva fluido dieléctrico para prevenir la disolución electroquímica del cobre lo cual genera una gran cantidad de lodos contaminantes.

**Tabla 2. 8 Condiciones de experimento del maquinado AEDM (16)**

<b>Condiciones de trabajo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Electrolito</b>	KOH, NaOH
<b>Concentración de electrolito</b>	100, 200, 300 g/L
<b>Abrasivo</b>	SiC
<b>Tamaño de la partícula de abrasiva</b>	57, 20, 11 $\mu\text{m}$
<b>Velocidad de alambre</b>	5.46m/min

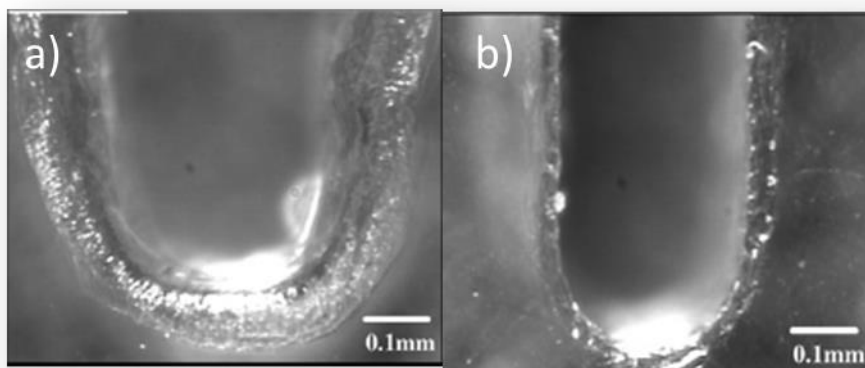
La reacción electroquímica genera burbujas que se acumulan en el alambre cuando el voltaje es aplicado, si la longitud de alambre no es apropiada y se usa una mayor longitud requiere más potencia, se usa Corriente Directa para prevenir el rompimiento del alambre y obtener una distribución uniforme de la chispa, la temperatura del electrolito es controlada a 40°C.

Las partículas abrasivas están presentes en el alambre y el cristal e interrumpen la acumulación de las burbujas, lo cual causa que se forme una capa aislante alrededor del alambre, a medida que el abrasivo está en la solución electrolítica, el voltaje crítico necesario es más alto que el utilizado en el electrolito puro. La cantidad de energía generada en la capa de aislamiento es mayor, y la cantidad de energía que es liberada durante la remoción del material es menor por el calentamiento de la descarga. El aumento de la concentración de partículas abrasivas no cambia el tamaño de la ranura.



**Figura 2. 18 Micrografías de zona fundida a) hidróxido de sodio b) hidróxido de potasio (16)**

El aumento del tamaño de la ranura disminuye en función de la del aumento de la potencia. Más energía se libera en forma de descarga cual genera que una mayor cantidad de material se remueva con una frecuencia de potencia menor que hace que la velocidad de remoción de material sea mayor.

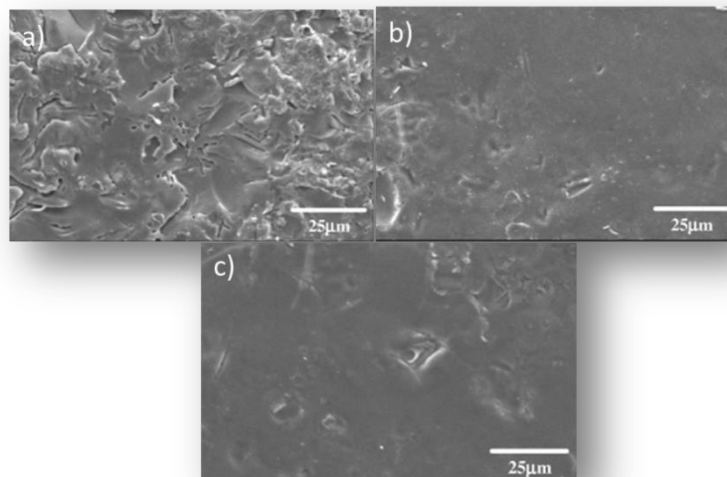


**Figura 2. 19 Muestra la zona fundida a causa del electrolito a) hidróxido de sodio b) hidróxido de potasio (16)**

La selección del electrolito influye en el tamaño de la ranura maquinada, que es más pequeña con la solución de hidróxido de sodio (NaOH), que con la solución electrolítica de hidróxido de potasio (KOH), esto es porque la eficiencia

del maquinado alcanzado por el hidróxido de potasio es mayor que cuando se usa hidróxido de sodio, esto se debe a que la movilidad de iones de potasio excede a la movilidad de los iones de sodio. La corriente de la descarga fluye por menos tiempo en la solución de hidróxido de potasio que en el hidróxido de sodio, lo cual produce que la etapa de reacción electroquímica sea más corta en el NaOH, la formación de una capa densa de burbujas provoca que la descarga sea inestable; la formación de las burbujas induce descarga y remueve el material por el calor producido y el ataque químico de la solución electrolítica. En el electrolito de hidróxido de potasio la fuerza causada por la disminución de la descarga reduce la ranura maquinada, el hidróxido de sodio mejora la velocidad de remoción de material el cual genera una gran expansión.

La rugosidad de la superficie cortada está en relación con la concentración de las partículas abrasivas, ya que al ser adicionadas partículas pequeñas a la solución electrolítica reduce la rugosidad. El abrasivo ayuda a refinar las microgrietas y la zona fundida formada por la erosión de la descarga de calor (16)



**Figura 2. 20 a) Electrolito puro Ra 1.8µm, b) concentración 100g/L Ra 1.2µm c) concentración 300g/L Ra 1µm. (16)**



### 2.3.5 Proceso híbrido maquinado electroquímico asistido por láser

Es un proceso que combina un haz láser con un chorro de electrolito, dando como resultado una herramienta que no genera ningún contacto y elimina el material de forma electroquímica. El haz láser provee la precisión ya que es capaz de dirigir la disolución del material en partes específicas de las piezas de trabajo. La aplicación del haz de láser con maquinado electroquímico se aplica de forma paralela.

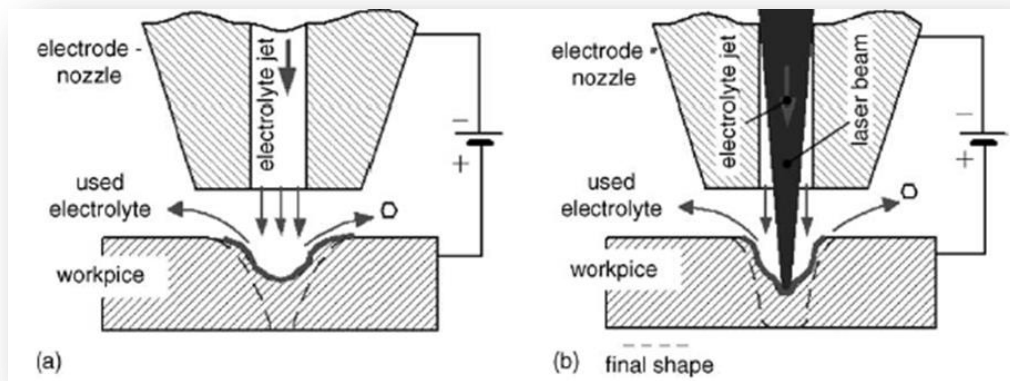


Figura 2. 21 a) Jet-ECM sin disolución dirigida, y b) LAJECM con intensificación de disolución en la zona localizada (17)

El proceso híbrido de maquinado electroquímico asistido por láser (LAJECM por sus siglas en inglés), combina dos diferentes recursos de energía: la energía de iones (ECM), y la energía de fotones (láser). El objetivo principal del proceso híbrido de maquinado es ayudar a la disolución electroquímica en una área específica de la pieza de trabajo; el láser se encuentra alineado de manera coaxial con el chorro de electrolítico.

La disolución electroquímica es el principal método de remoción del material y es apoyado por la baja potencia que el láser genera, el cual no remueve cualquier material pero ayuda a la disolución por la acción térmica esto

mejora la cinética de las reacciones electroquímicas que genera una disolución más rápida y ayuda en la descomposición de la capa de óxido que se encuentra en algunos materiales lo que provoca que se inhiban algunas clases de electrolitos.

La ventaja de LAJECM es que el láser se puede dirigir fácilmente sobre la superficie de la pieza, por lo cual con la aplicación del chorro de electrolito, la disolución se puede acelerar.

En el año 2005 en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Diseño de la Universidad de Glasgow y la Facultad de Ingeniería y Electrónica de la Universidad de Edinburgh en el Reino Unido experimentaron con el proceso híbrido LAJECM maquinando aleaciones de aluminio, aceros inoxidable, aleaciones de titanio, aceros de alto contenido de carbono, hastelloy C276 con las siguientes características:

**Tabla 2. 9 Características y propiedades de los materiales (17)**

	Tipo	Factor de absorción a 20 ° C	Conductividad térmica [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] a 25°C	Conductividad eléctrica [mΩ - <sup>1</sup> Cm <sup>-1</sup> ]
<b>Aleaciones de aluminio</b>	Al88Si12	0.03–0.11	144.0–150.0	217.3–222.2
<b>Acero inoxidable</b>	FeCr13Ni8	0.81–0.93	14.0–17.0	11.4–13.0
<b>Aleaciones de titanio</b>	Ti90Al6V4	0.39–0.49	7.1–7.3	5.88–5.95
<b>Aceros alto carbono</b>		0.86–0.90	47.0–53.0	50.0–58.8
<b>Hastelloy C276</b>	Ni57Mo17Cr16Fe WMn	0.88–0.95	10.4–11.2	8.26–8.70

La precisión LAJECM está en función de la correcta localización para una disolución rápida en dirección axial. Una conicidad más estrecha puede ser producida por el maquinado de chorro electroquímico asistido por láser que por el proceso JECM, con el mismo tiempo también puede producir agujeros de mayor diámetro debido a que la velocidad de eliminación de material es mayor,

la localización del maquinado mejora significativamente la precisión y la dimensión de los agujeros producidos por la disolución electroquímica lo que aumenta significativamente el alto porcentaje de la tasa de remoción volumétrica (VRR por sus siglas en inglés), la mayor reducción de conicidad se logró con tensiones y concentraciones más bajas.

**Tabla 2. 10 Aumento relativo en VRR para LAJECM comparación con JECM aleación de titanio (17)**

<b>Aleación de Titanio</b>				
<b>Voltaje</b>	<b>IEG=2mm</b>		<b>IEG=5mm</b>	
	<b>Cp= 10%</b>	<b>Cp=20%</b>	<b>Cp=10%</b>	<b>Cp=20%</b>
<b>80</b>	20.27	19.79	24.53	9.52
<b>140</b>	14.43	8.77	19.74	8.79
<b>180</b>	12.50	14.43	14.44	2.86

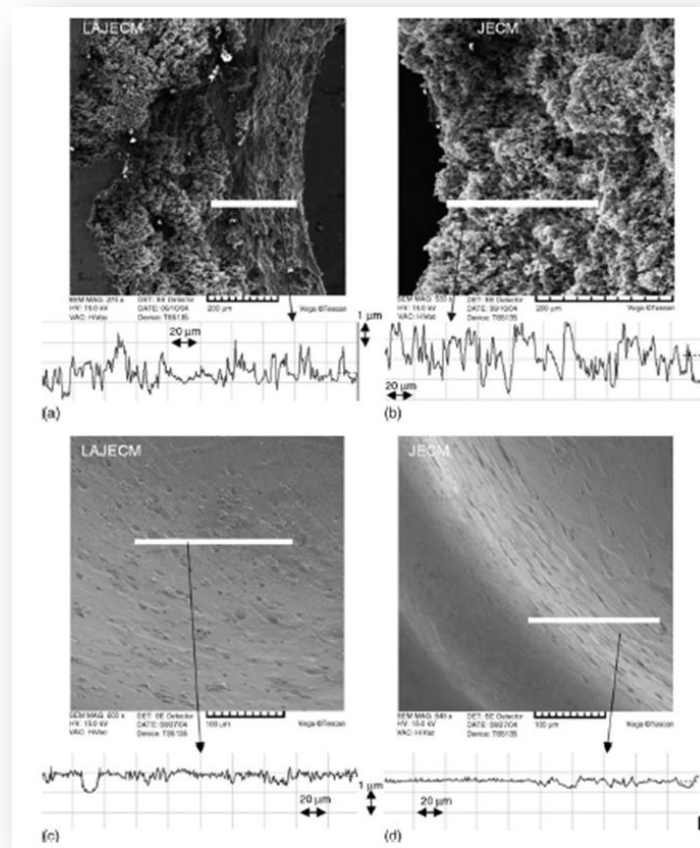
**Tabla 2. 11 Aumento relativo en VRR para LAJECM comparación con JECM Hasteloy (17)**

<b>Hasteloy</b>				
<b>Voltaje</b>	<b>IEG=2mm</b>		<b>IEG=5mm</b>	
	<b>Cp= 10%</b>	<b>Cp=20%</b>	<b>Cp=10%</b>	<b>Cp=20%</b>
<b>80</b>	10.06	39.06	13.27	33.33
<b>140</b>	5.71		13.14	9.79
<b>180</b>	1.82		9.73	9.46

Donde IEG es la separación de electrodos (entre la boquilla y la pieza de trabajo y Cp es la concentración del electrolito.

La calidad de las piezas fue medida por fotografías tomadas por microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), fueron seleccionados cortes transversales para realizar el perfil de rugosidad de una aleación de titanio y la aleación base níquel hasteloy, los cuales difieren mucho en los términos del perfil de rugosidad. La superficie de hasteloy es brillante mientras que la superficie de las piezas de las aleaciones de titanio son ásperas, estas diferencias se pueden explicar por las diferentes propiedades de la oxidación. La capa de óxido que aparece en la superficie del titanio es frágil y con grietas que durante el maquinado deja cavidades afiladas expuestas para el flujo del

electrolito, en consecuencia el material se disuelve en áreas particulares bajo la capa de óxido. Las aleaciones base níquel son más suaves en comparación que las aleaciones de titanio (17).



**Figura 2.22** Fotos de SEM de la sección transversal y el perfil de rugosidad del agujero de los materiales seleccionados en las condiciones de  $U = 180V$ ,  $IEG = 2$  mm,  $Cp = 20\%$ : (a) LAJECM aleación de titanio, (b) JECM aleación de titanio, (c) LAJECM Hastelloy, y (d) Hastelloy JECM (17).

## 2.4 Aceros de alta resistencia y baja aleación

### 2.4.1 Definición

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (High Strength Low Alloy por su siglas en inglés) también pueden ser denominados por como aceros microaleados ya que contienen menos de 0.1% de elementos aleantes tales como Nb, Cr, Zr, V, Mo, N, P, Ti, los cuales consiguen generar una gran

resistencia mecánica y a la corrosión. Estos aceros son diseñados con la finalidad de proporcionar un aumento de resistencia con un mínimo peso, ya que son diseñados para cumplir propiedades mecánicas específicas la composición puede llegar a variar con el espesor de la lámina. Poseen una resistencia mayor a los 275MPa (40Ksi), los aceros de baja aleación alta resistencia contiene bajas cantidades de contenido de carbono que oscila entre el 0.25 a 0.50% (18).

### 2.4.2 Propiedades de los aceros HSLA

Los aceros HSLA son designados según las combinaciones de las propiedades generadas según los elementos de aleación tales como la soldabilidad, tenacidad, formabilidad y la resistencia, son clasificados de manera independiente que los aceros de aleación que es similar a la utilizada en los aceros al carbono, los cuales son mejorados agregando diferentes elementos y procesados de manera especial para controlar sus temperaturas de enfriamiento.

Dentro de la clasificación de los aceros HSLA podemos encontrar las siguientes clasificaciones:

- **Aceros doble fase:** estos aceros tiene una microestructura martensítica dispersa en una matriz ferrítica la cual proporciona una alta resistencia a la tensión y buena ductilidad.
- **Aceros con ferrita acicular:** aceros con bajo contenido de carbono (menos de 0.05% C), transforman durante el enfriamiento, lo que provee excelentes propiedades de soldabilidad, fiabilidad y buena tenacidad y un excelente esfuerzo de cedencia.
- **Aceros microaleados:** generalmente con pequeñas adiciones de elementos (<0.10%), como el niobio, vanadio y titanio para refinar el tamaño de grano y ser endurecidos por precipitación.

- **Aceros de perlita reducida:** aceros reforzados por granos muy finos de ferrita y endurecidos por precipitación, pero con bajo contenido de carbono, por lo tanto poco o nada de perlita en su microestructura.
- **Aceros resistentes al agrietamiento inducido por hidrogeno:** son aceros con bajo contenido de carbono y azufre, poseen inclusiones y segregaciones de magnesio la cual es controlada, y su contenido de cobre es superior al 0.26%.
- **Aceros con inclusiones de forma controlada:** poseen ductilidad y tenacidad por las pequeñas adiciones de calcio, zirconio, titanio o elementos de tierras raras, para cambiar la forma de las inclusiones de azufre a tiras largas, a pequeños glóbulos dispersos.

Estas categorías no son precisamente grupos diferentes, así que los aceros HSLA pueden combinar las características de más de un grupo (19).

### 2.4.3 Microestructura de los aceros HSLA

Composición química de los aceros HSLA:

Tabla 2. 12 composición química de los aceros HSLA (20)

C	Mn	Si	P	S	Al	V	Ti	Nb	N
0.081	1.36	0.185	0.018	0.008	0.002	0.033	0.0297	0.067	0.0053

La cual se observó mediante microscopia óptica de las zonas centrales de las placas roladas en las direcciones perpendicular y paralela en el sentido del rolado de las muestras, la cual la estructura que muestra después del laminado consiste en granos muy finos de ferrita con un tamaño de grano de 12 a 13, con la aparición de perlita, sin embargo no todos los granos de ferrita fueron granos equiaxiales. (20)

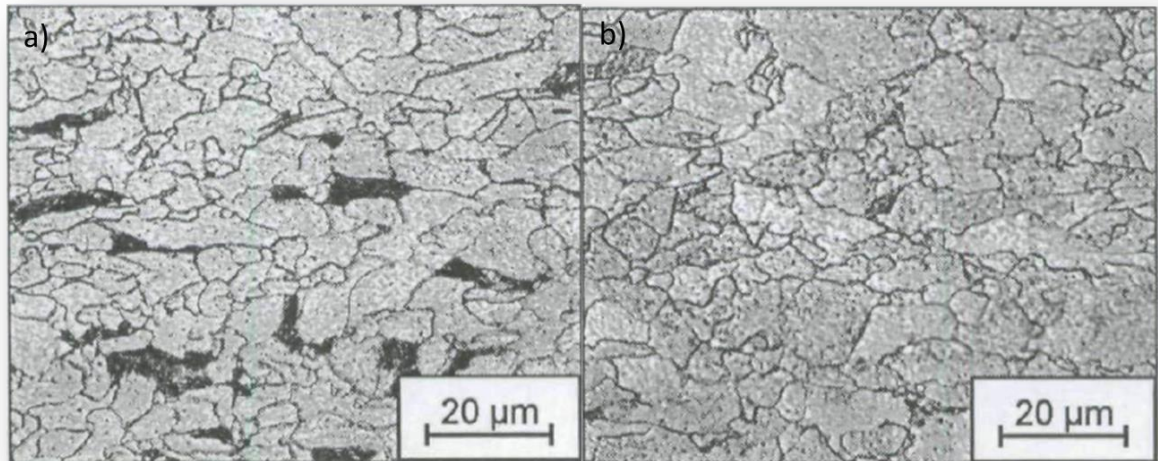


Figura 2. 23 a) Microestructura después de rolado en caliente b) La microestructura de las muestras recocidas por el modo 1 en función de la deformación en frío anterior (20)

#### 2.4.4 Tratamientos térmicos de los aceros HSLA

Los aceros HSLA o aceros microaleados que la adición de materiales aleantes es menor al 0.15% forman carburos y nitruros son los responsables directa o indirectamente de las propiedades mecánicas las cuales son mejoradas de acuerdo al crecimiento del tamaño de grano.

En aceros aleados con niobio, vanadio, titanio y aluminio provoca la aparición de precipitados capaz de producir refinamiento de grano, alterando los valores de las propiedades mecánicas como dureza y límite elástico.

S. Illescas, J. Fernández y J.M. Guilemany, en el departamento de materiales e ingeniería metalúrgica de la Universidad de Barcelona en el 2008, estudiaron un acero HSLA laminado en caliente denominado 16Mn4 cuya composición se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2. 13 Composición química de los aceros HSLA 16Mn4 (21)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	P	S	N
1.166	1.24	0.16	0.02	0.02	0.001	0.051	0.0309	0.186	0.15	0.0151	0.0027

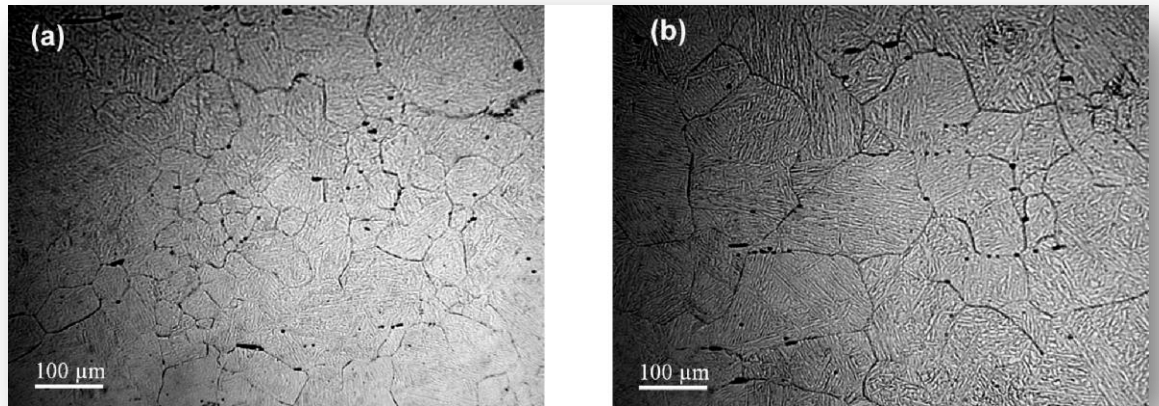
Ya que el porcentaje de contenido de carbono es de 1.166 entra en la clasificación de aceros microaleados con bajo contenido de carbono, probetas de una dimensión de  $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^2$ , se elevaron hasta la temperatura de austenización posteriormente fueron enfriadas en agua y determinaron el tamaño de grano mediante microscopia óptica y el medio para revelar la microestructura fue una solución de ácido pícrico en agua destilada a  $60^\circ \text{C}$

Una vez determinados los tamaños de grano inicial los planos de laminación, se realizó la medición por medio de microscopia óptica se observó lo siguiente:

- a  $1000^\circ \text{C}$  a tiempos de entre 5 a 60min el tamaño de grano se mantiene de manera constante y homogéneo en los primeros minutos superando los 60 min se produce un tamaño de grano dando una morfología homogénea en los tiempos de mayor duración.
- a  $1050^\circ \text{C}$  con tiempos cortos de 5 min el tamaño de grano que se presenta es heterogéneo y para tiempos de mayor duración aumenta su homogeneidad.
- a  $1100^\circ \text{C}$  al igual que lo presentado en la temperatura anterior se presentan dos comportamientos distintos, a los 5 min se observa crecimiento de grano heterogéneo y en tiempos mayores el tamaño de grano aumenta en su forma homogénea.
- $1150^\circ \text{C}$  a esta temperatura no se observa ningún cambio hasta tiempos superiores de los 90 min sin embargo a los 60 min el grano crece de manera violenta.
- $1200^\circ \text{C}$  en esta temperatura a diferencia de las anteriores a los 5 min ya se observa crecimiento de grano de forma homogénea
- $1250^\circ \text{C}$  se presenta crecimiento homogéneo en todos los tiempos del tratamiento
- $1300^\circ \text{C}$  a esta temperatura se observó un crecimiento de grano homogéneo durante todo el proceso del tratamiento

Sin embargo al utilizar la microscopia óptica solo se puede obtener un criterio cualitativo de separación de los mecanismos de crecimiento del grano. (21)





**Figura 2. 24** Micrografías que muestran los dos tipos de crecimiento: (a) Crecimiento heterogéneo (1.000°C, 5 min) y (b) Crecimiento homogéneo (1.050 °C, 60 min (21))

### **2.4.3 Propiedades mecánicas de los aceros HSLA**

Las propiedades mecánicas de los aceros alta resistencia está dado de acuerdo a los elementos de aleación que se adicionan, la forma en que son manufacturados.

En los aceros microaleados HSLA, la utilización de elementos como el vanadio y el niobio en conjunto con una laminación controlada dan como resultado una mejora en la resistencia a la fluencia, la tenacidad debido a que el tamaño de grano de ferrita se reduce, sin embargo, el sentido de laminación es importante ya que si se analiza en el sentido transversal, se observa que la dureza se reduce de manera considerable debido a que al momento que los aceros son laminados forman inclusiones no metálicas que se presentan en forma alargada en sentido de la laminación.

## 2.5 Aceros doble fase

### 2.5.1 Definición

Los aceros doble fase (DP por sus siglas en inglés), se caracterizan por un valor de resistencia a la tensión de 500MPa y por su microestructura la cual consiste en una matriz ferrítica con islas de martensita. El término de doble fase se refiere a la predominancia de la microestructura de las dos fases ferrita y martensita (18).

### 2.5.2 Microestructura

La **Figura 2.25** representa la microestructura de los aceros DP, donde muestra la ferrita con las pequeñas islas de martensita, la fase suave de ferrita es generalmente continua, ya que estos aceros proporcionan una excelente ductilidad, cuando este acero es deformado, la tensión se concentra en la parte de menor resistencia de la fase de ferrita la cual rodea las islas de martensita la cual incrementa la tasa de endurecimiento.

### Aceros DP

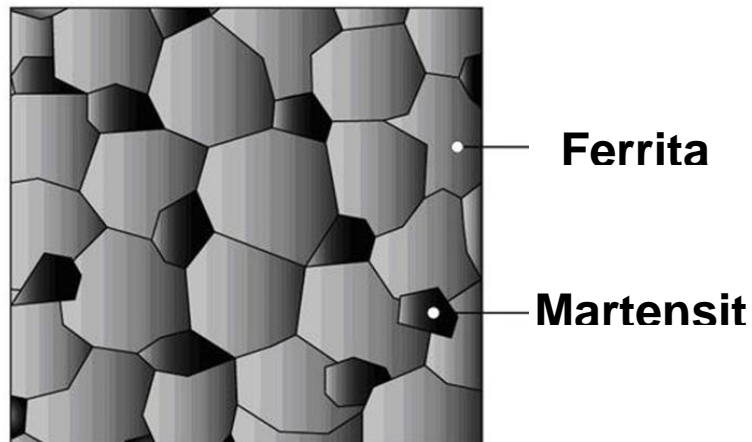


Figura 2. 25 Microestructura de los aceros DP

### 2.5.3 Propiedades mecánicas de los aceros DP

En general los aceros DP (ferrita-martensita) combinan altas tensiones residuales y una alta densidad de dislocaciones en la ferrita que hacen que el flujo plástico pueda ocurrir, el proceso de endurecimiento de los aceros DP puede ocurrir en tres etapas.

- Primera etapa (0.1 al 0.5% de deformación): esta ocurre por el rápido endurecimiento en el trabajo por la eliminación de tensiones residuales, y la rápida acumulación de tensiones por la incompatibilidad de las dos fases.
- Segunda etapa (0.5 al 4% de deformación): ocurre la transformación de la austenita retenida.
- Tercera etapa (4 al 18% de deformación): se forman células de dislocaciones y una deformación adicional en la ferrita por lo tanto existe una recuperación dinámica y el deslizamiento transversal eventual hace ceder a la martensita.

El comportamiento de endurecimiento por deformación de los aceros DP es muy complejo, especialmente en las primeras etapas. Sin embargo el alto índice de endurecimiento por deformación inicial contribuye a una buena conformabilidad de los aceros, además la falta de un punto de fluencia del material elimina la formación de las bandas de Lüders

## **2.6 Aceros de plasticidad inducida por transformación**

### **2.6.1 Definición**

Los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP por sus siglas en inglés) consisten en una matriz continua de ferrita la cual contiene fases secundarias dispersas de martensita y bainita donde también se puede encontrar austenita retenida en fracciones volumétricas mayores del 5%.

# TRIP

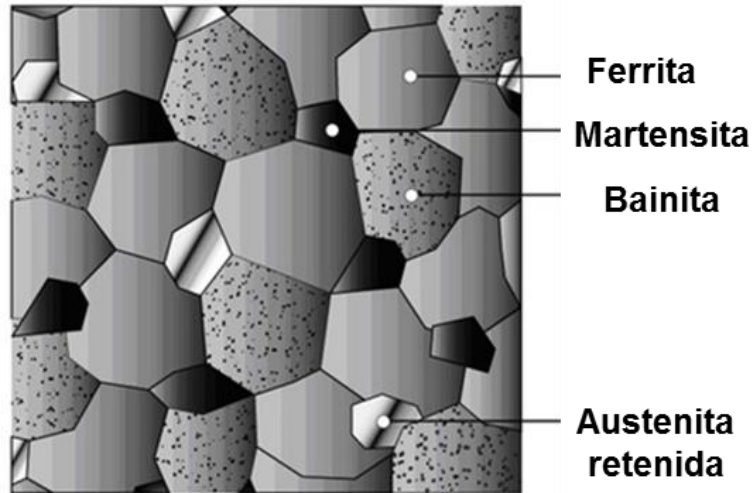
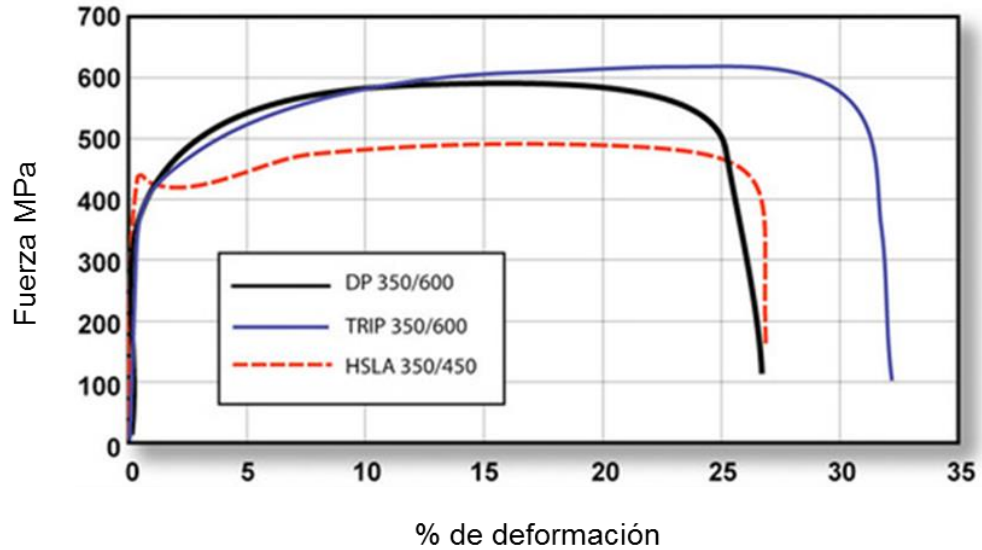


Figura 2. 26 Microestructura de los aceros TRIP

## 2.5.1 Propiedades de los aceros TRIP

Durante la deformación, la dispersión de las fases duras como en ferrita blanda crea una alta velocidad de endurecimiento durante la aplicación de trabajo como se observa en los acero DP, pero a diferencia de los aceros DP en los aceros TRIP la austenita retenida progresivamente también se transforma en martensita causado por el aumento de la tensión, esto aumenta la velocidad de endurecimiento de trabajo a niveles de deformación.

En la **Figura 2.27** se muestra la comparación de cómo se comportan los aceros tensión-deformación de los aceros HSLA, DP y TRIP, donde se muestra que la resistencia a la fluencia son aproximadamente similares. Los aceros TRIP tienen una velocidad de endurecimiento inicial más baja que los aceros DP, pero la velocidad de endurecimiento es constante.



**Figura 2. 27 Gráfica representativa del comportamiento de los aceros HSLA, DP, TRIP**

Los aceros TRIP utilizan mayores cantidades de carbono que los aceros DP para obtener suficiente contenido de carbono con el objetivo de estabilizar la fase de austenita retenida a una temperatura inferior a la ambiente. Las concentraciones de silicio y aluminio aceleran la formación de ferrita, bainita, por lo tanto estos elementos ayudan a mantener el contenido de carbono necesario dentro de la austenita retenida, además estos elementos ayudan a evitar la precipitación de carburos en la región bainita.

La austenita retenida comienza a transformarse en martensita y es controlada mediante el ajuste del contenido de carbono, en los niveles más bajos de carbono, la austenita comienza a transformar inmediatamente después de la deformación. Con contenidos de carbono altos, la austenita retenida es más estable, en estos niveles de contenido de carbono, la austenita retenida permanece en la parte final. Y se transforma en martensita durante la deformación posterior.

# **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA**

Los procesos de corte son ampliamente utilizados en la preparación de piezas de aceros para su posterior manufactura en la industria automotriz, una buena preparación reduce los riesgos de que pueda existir algún defecto, y que las piezas cortadas sufran algún daño durante el proceso de corte.

Hay que tomar en cuenta que existen diferentes procesos de corte:

- Procesos convencionales
- Procesos no convencionales
- Procesos híbridos

En la industria automotriz el uso de nuevos materiales que ofrecen mayor resistencia y menor peso son ideales para la manufactura de los nuevos automóviles. Ya que los aceros utilizados en la conformación de las partes automotrices son susceptibles a la transformación por impactos en los choques donde se pueden llegar a generar calor y presión, al momento de utilizar un proceso de corte no adecuado puede llegar a sacrificar la integridad estructural de los aceros utilizados en esta industria:

- Aceros HSLA
- Aceros DP
- Aceros TRIP

Los aceros DP y TRIP son de gran importancia ya que a medida que prosperan en su uso de estos materiales se convierten en materiales más difíciles de cortar por algún método ya sea convencional o no convencional.

Ya que los procesos de corte convencionales son procesos de corte considerados de contacto, ese mismo contacto produce calor entre la pieza de trabajo y la herramienta, lo que implica que el uso de procesos convencionales no ofrezca ventajas en el uso de aceros susceptibles a la transformación por calor y que el uso de herramientas de corte aumente

Los procesos de corte no convencionales están diseñados para ofrecer métodos con mejor calidad de corte, pero llegan a volverse en algunas ocasiones lentos, al momento de cambiar los parámetros de operación a velocidades más rápidas de remoción de material, los procesos se convierten en procesos rápidos de corte pero esto genera una disminución en la calidad del corte.

En comparación los procesos híbridos de corte son procesos combinados en convencionales o no convencionales que ofrecen una mayor ventaja, al momento de que estos realizan algún proceso corte, sin embargo hay que tomar en cuenta que estos procesos están diseñados de acuerdo a las necesidades que presentan cada industria.

Por lo general para seleccionar que tipo de proceso de corte se debe utilizar se tiene que tomar en cuenta las siguientes características:

- Tipo de material
- Composición química
- Propiedades mecánicas
- Tipo de uso que tendrá la pieza

Una buena preparación de corte tiene un factor importante en los siguientes procesos de manufactura de las partes automotrices, por consecuencia se eliminan variables en los procesos posteriores de ensamble.

# CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan los resultados del análisis del comportamiento de los aceros HSLA, DP y TRIP cortados por el procesos no convencional de electro erosión por hilo (WEDM), en la Universidad de Ferrara, Italia

## 4.1 Metodología

Para realizar este análisis comparativo del comportamiento de los aceros antes mencionados se realizaron los siguientes pasos:

- Corte por muestras de aceros por el proceso de corte de electro erosión por hilo.
- Preparación de muestras cortadas para realizar caracterización (montaje, pulido).
- Ataque químico con nital al 2%.
- Observación de la microestructura de cada muestra de acero en el microscopio óptico.
- Observación mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB).

## 4.2 Materiales y equipo

Durante el proceso de corte se utilizó una máquina de electro erosión por hilo marca Charmilles Technologies, la cual utiliza un carrete de hilo para el corte de latón con un diámetro de 0.25mm.

La composición química de los aceros HSLA, DP y TRIP ésta dada en la **Tabla 4.1, 4.2 y 4.3** respectivamente.



**Tabla 4. 1 Composición química del acero HSLA**

Grado	% C		%Mn		%P	%S	%B		%TI		% N
	Min	Max	Min	Max	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Max
24TBO	0.21	0.28	1.10	1.30	0.02	0.010	0.002	0.0060	0.020	0.045	0.008

**Tabla 4. 2 Composición química del acero DP**

DP	%C	%S	%Mn	%P	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%V	%Nb	%Ti	%W
	0.03	0.005	0.21	0.007	0.01	<0.01	<0.04	0.01	0.012	<0.004	<0.004	0.006	<0.002

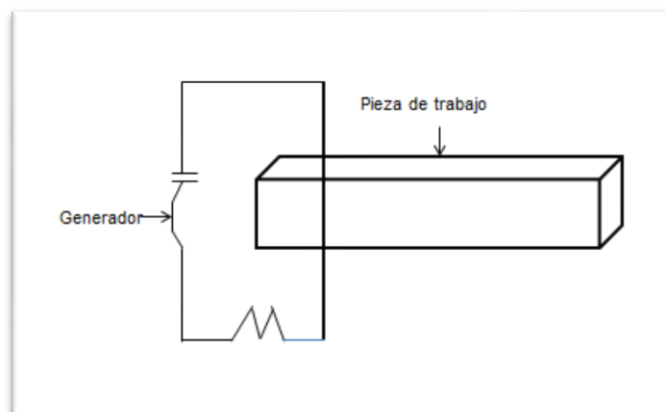
**Tabla 4. 3 Composición química del acero TRIP**

TRIP	%C	%Mn	%Si	%Al	%P	%S
690	1.75	1.98	1.2	0.8	0.0003	0.0001

Para la caracterización microestructural de los aceros se utilizó: el microscopio óptico LEICA modelo MEF4M, microscopio electrónico de barrido marca ZEISS modelo EVO MA 15

### 4.3 Experimentos realizados

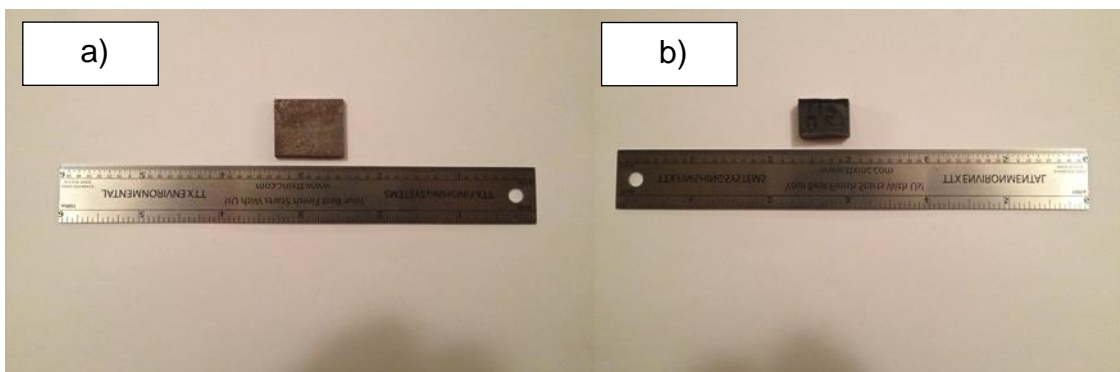
Para la realización de la experimentación se trabajó con la máquina de WEDM, cortando las piezas de acero en forma perpendicular, para obtener pequeñas muestras como se muestra en las **Figura 4.1 y 4.2** inciso a) y b)



**Figura 4. 1 Esquema del corte de las piezas de acero cortadas por el proceso WEDM**

Las piezas fueron cortadas bajo diferentes parámetros de proceso los cuales se muestran en la parte inferior el significado de cada uno de los parámetros:

- EL: Número de hilos utilizados
- PA. Número del material utilizado para la pieza
- ST: Estrategia (inicio condiciones de procesamiento automático)
- M: Manera (desbaste, acabado)
- V: Voltaje de trabajo
- IAL: interruptor de impulso de corriente
- B: Tiempo entre dos impulso (microsegundos)
- A: Duración del impulso (microsegundos)
- tac: Tiempo de impulso corto
- Aj; Referencia de voltaje medio
- S: Velocidad máxima de avance (varía desde 0.001 hasta 40, lo que corresponde a un cambio de 7.32 micras/min a 292.8mm/min).
- Inj: Monto de presión de inyección
- WB: Tensión mecánica del cable
- WS: velocidad de movimiento del alambre (m/min)



**Figura 4. 2 Muestras de acero cortadas por el proceso WEM a) Acero DP, b) Acero HSLA**

Los parámetros más importantes en el proceso WEDM son los siguientes:

- V: voltaje
- B: tiempo entre dos impulsos
- A: Duración del impulso
- P<sub>sup</sub>: Presión superior
- P<sub>inf</sub>: Presión inferior
- Slavoro: Trabajo

**Tabla 4. 4 Parámetros utilizados durante el corte de las muestras de aceros**

<b>MATERIAL</b>	<b>HSLA</b>	<b>DP</b>	<b>TRIP</b>
EL	7	7	7
PA	6	6	6
ST	1	1	1
M	21	21	21
V	-80	-80	-80
IAL	8	8	8
B	14.8	18	18
A	0.8	0.8	0.8
Tac	0.4	0.4	0.4
Aj	42	42	42
S	10	10	10
Inj	2	2	2
WB	1	1	1
WS	8	8	8
FF	100	100	100
P <sub>sup</sub> (bar)	3.7	3.8	3.8
P <sub>inf</sub> (bar)	4.2	4.3	4.3
Slavoro (mm/min)	0.9	1.5	1.5

Una vez cortadas las muestras se prepararon para el siguiente paso de la experimentación se montaron en baquelita para ser desbastadas, pulidas con alúmina de  $0.5\mu\text{m}$ . y atacadas con nital al 2% para revelar la microestructura.

## 4.4 Resultados

### 4.4.1 Microestructura

Una vez cortadas montadas y atacadas las muestra de acero, se llevaron al microscopio óptico para análisis de su microestructura, revelando a diferentes magnificaciones que no se encontró ningún cambio en la microestructura de cada acero analizado a una magnificación de 5x.



Figura 4. 3 Microestructura a 5x a) acero HSLA, b) acero DP, c) acero TRIP

Mostrando la magnificación de 5x no muestra ningún resultado relevante de alguna alteración de la microestructura se decidió aumentar paulatinamente las magnificaciones

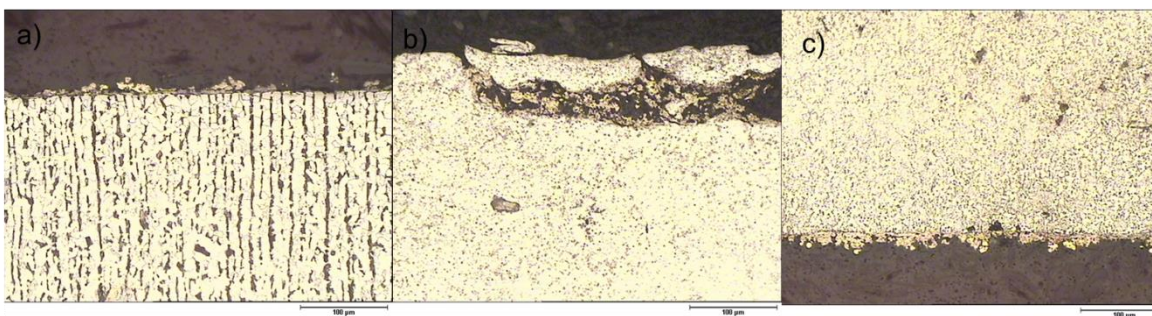


Figura 4. 4 Microestructuras a 20X a) acero HSLA, b) acero DP y c) acero TRIP

A 20x de magnificación en el microscopio óptico revelo una pequeña cascarilla de material, la cual se observa en los tres tipos de material, formada por el modo en el cual el material fue seccionado.

Al aumentar la magnificación a 50x, para analizar la sección del material cortado, no se revela ninguna alteración térmica causada por el proceso de corte WEDM.

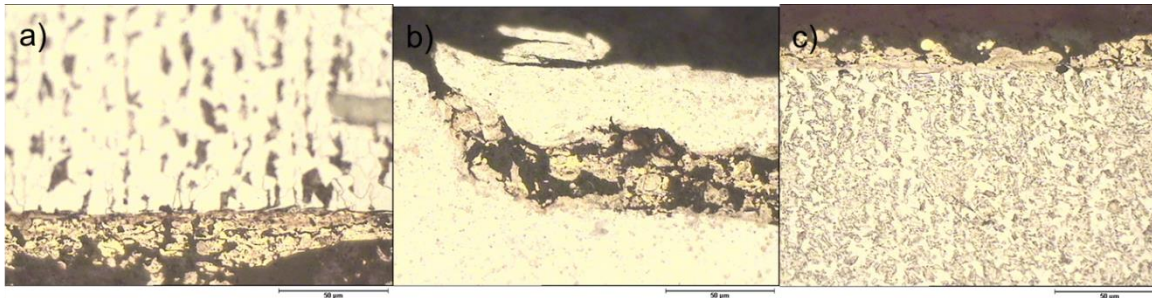


Figura 4. 5 Microestructura a 50x a) acero HSLA, b) acero DP, c) acero TRIP

#### 4.4.2 Perfil de microdureza

Realizado en análisis de la microestructura se observó que no existía ninguna alteración evidente, se decidió realizar un perfil de microdureza tomando seis lecturas horizontalmente distribuidas a lo largo de la pieza y tomando tres lecturas más de forma vertical en el borde del corte realizado por el proceso WEDM como se muestra en la **Figura 4.6** incisos: a) y b).

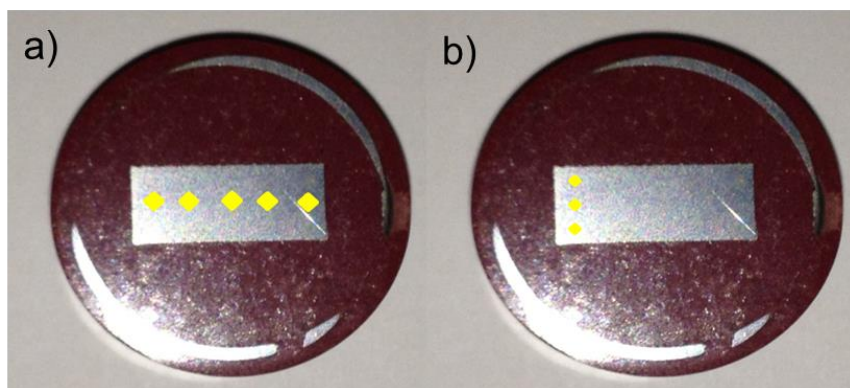
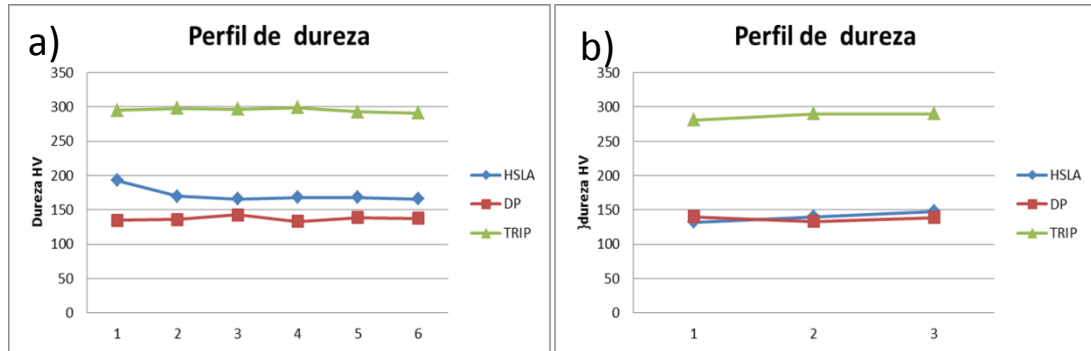


Figura 4. 6 Distribución de microdureza



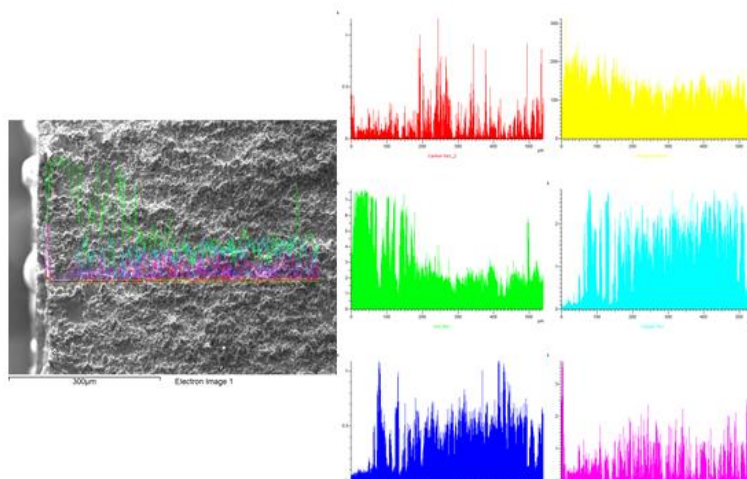
Al realizar el perfil de microdureza como se muestra en la **Figura 4.7** no se observó un cambio relevante de manera horizontal y de manera vertical en los aceros DP y TRIP, sin embargo el acero HSLA presentó una disminución al momento de realizar el perfil de microdureza de manera vertical próxima al borde del corte.



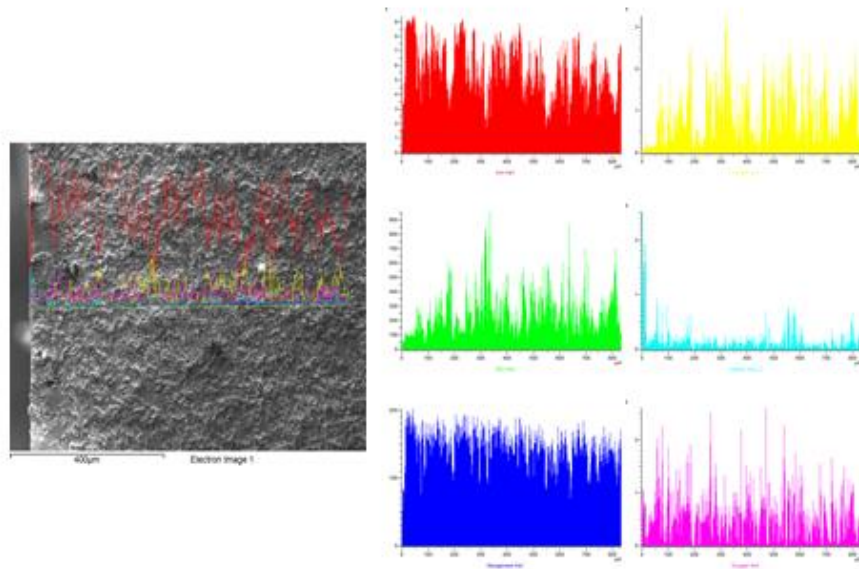
**Figura 4. 7 perfil de dureza a) vertical b) horizontal**

### 4.4.3 Análisis por microscopio electrónico de barrido

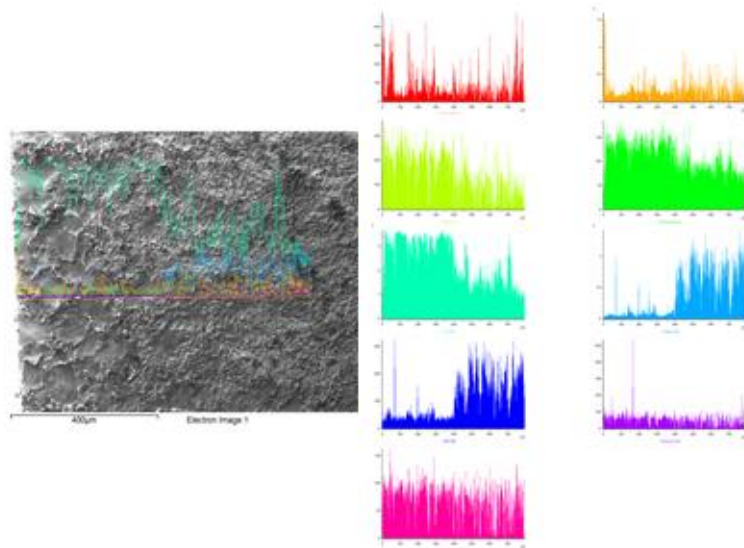
Se realizó un análisis de forma cualitativa en el microscopio electrónico de barrido se demostró que pequeñas cantidades del electro utilizado durante el proceso de corte se adicionan a las piezas, además se muestra que pequeñas cantidades de oxígeno presentes a causa del fluido dieléctrico utilizado agua des ionizada por osmosis inversa.



**Figura 4. 8 Análisis cualitativo por MEB del acero HSLA**



**Figura 4. 9 Análisis cualitativo por MEB del acero DP**



**Figura 4. 10 Análisis cualitativo por MEB del acero TRIP.**

Mediante fotografías de la microscopia electrónica de barrido se evaluaron las superficies finales del corte, mostrando que los aceros HSLA y DP no muestran ninguna alteración relevante.

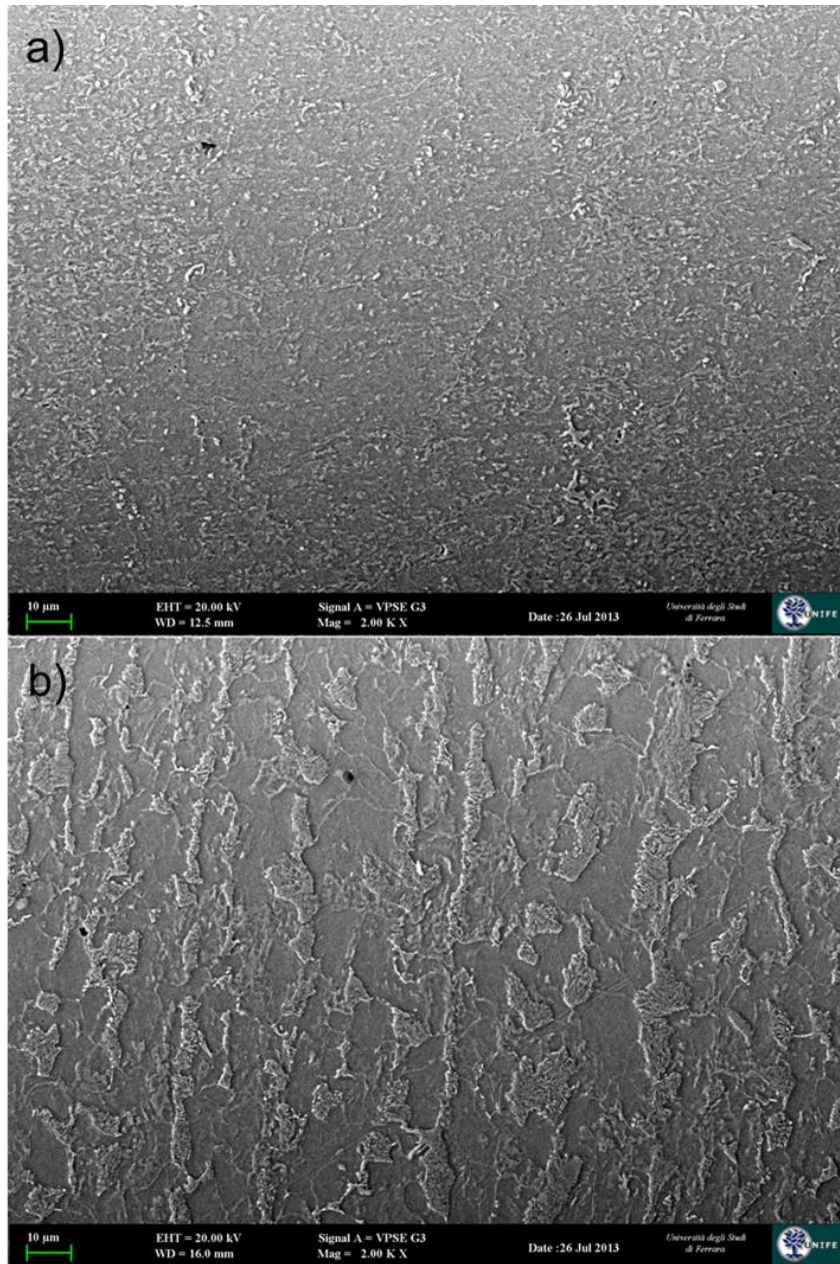


Figura 4. 11 Fotografías tomadas por MEB a) acero HSLA b) acero DP



EL acero TRIP muestra una pequeña capa de material solidificado, la cual es fundida por la excesiva temperatura producida por el proceso de corte y se solidifica por el enfriamiento rápido que causa el fluido dieléctrico en este caso agua desionizada por osmosis inversa.

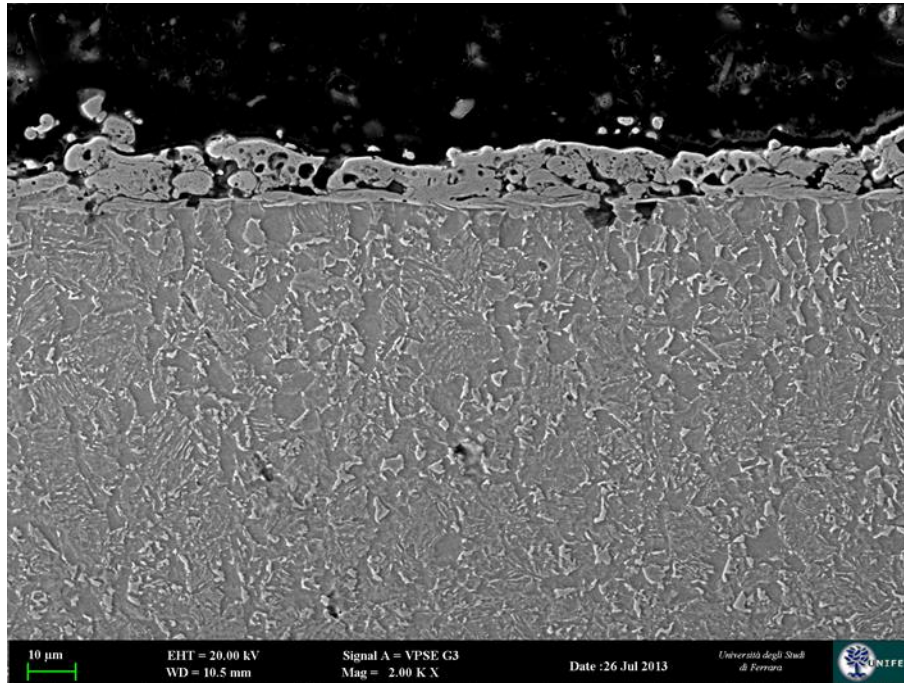


Figura 4. 12 Fotografía por MEB de acero TRIP, la cual muestra la capa de acero solidificado

#### 4.4.4 Análisis de rugosidad

Mediante el uso del perfilómetro se logró determinar la rugosidad de las muestras cortadas tomando en cuenta el factor de rugosidad “Rz”, la cual es la profundidad de la rugosidad media, para cada muestra de acero se tomaron 4 lecturas, los resultados se muestran el **Tabla 4.5**, la cual muestra que los aceros DP presentan una menor rugosidad gracias a las fases presentes en el acero.

**Tabla 4. 5 Resultado de rugosidad tomada mediante el perfilómetro**

<b>Rugosidad</b>			
<b>VALOR</b>	HSLA	DP	TRIP
<b>Rz</b>	µm	µm	µm
<b>1</b>	19.036	10.283	24.945
<b>2</b>	19.791	21.148	24.554
<b>3</b>	18.495	15.273	14.953
<b>4</b>	17.813	14.748	17.75
<b>Promedio</b>	18.78375	15.363	20.5505

#### **4.4.5 Conclusiones del caso de estudio**

- El uso del proceso de corte WEDM no presenta ningún riesgo al ser empleado en los aceros HSLA, DP y TRIP.
- La microestructura de los aceros no presenta ningún cambio.
- Los aceros HSLA y DP, no presentan ninguna alteración a lo largo de la zona donde se realizó el corte en comparación de los aceros TRIP.
- Los tres tipos de aceros presentaron la adición de los elementos que desprende el electrodo y la adición de oxígeno por el uso de agua desionizada como fluido dieléctrico.
- El proceso WEDM es lento como lo marca la literatura, pero muy preciso, por lo cual, se debe una manera de combinarlo con algún otro proceso que ofrezca la ventaja de rapidez.

# Conclusiones

El análisis y revisión de la bibliografía permitieron obtener las siguientes conclusiones:

- El diseño y el uso de procesos de corte basado en la problemática de la evolución de los materiales empleados en la industria automotriz, representa un gran desafío ya que se busca procesos más rápidos con mejor calidad y amigables con el medio ambiente.
- Al momento de diseñar un proceso de corte para solucionar la problemática se debe de considerar: el diseño de la pieza, el tipo de material que se utilizará, así como el servicio que brindará la pieza.
- La existencia de procesos híbridos no representan que al ser aplicados a un material distinto tenga éxito al momento de realizar el corte, ya que son diseñados de acuerdo a las necesidades de cada proceso de manufactura.

# Listado de figuras

Figura 2. 1 Esquema corte electroquímico (24) .....	15
Figura 2. 2 Componentes básicos del sistema de EDM (24) .....	16
Figura 2. 3 Esquema representativo, corte EDM con hilo (24) .....	17
Figura 2. 4 Esquema de corte por rayo láser (24). .....	19
Figura 2. 5 Esquema del procesos de corte por presión de chorro de agua abrasivo (9).....	20
Figura 2. 6 corte por plasma (24).....	21
Figura 2. 7 Esquema de procesos híbridos de corte .....	23
Figura 2. 8 Descripción máquina híbrida Láser/Chorro de agua abrasivo (11). .....	24
Figura 2. 9 Una grieta incontrolada reproducidos en el punto de inflexión cuando el giro es cerca del borde (11).....	25
Figura 2. 10 En la vista izquierda, parte superior del corte angular LWJ de una curva con 1 mm de radio en la muestra PCBN independiente que muestra el cono. En la derecha, una imagen de SEM de la vista transversal de la vuelta (11) .....	26
Figura 2. 11 Vista esquemática del proceso híbrido propuesto de eliminación electroquímica rectificado. (12).....	28
Figura 2. 12 Variación en rugosidad (Ra) y la velocidad y el ángulo de conicidad con la velocidad de rotación de la herramienta. (12) .....	30
Figura 2. 13 Sección de agujeros maquinados con diferentes parámetros de trabajo: velocidad de alimentación y voltaje (12) .....	30
Figura 2. 14 agujero maquinado con óptimos parámetros a) parte superior del agujero maquinado, b) corte seccional visto por SEM (12).....	31

Figura 2. 15 Esquema de funcionamiento de proceso híbrido de maquinado EDM/AJM (13) .....	32
Figura 2. 16 Imagen comparativa de superficie asociados a) proceso sin partículas abrasivas b) procesos con partículas abrasivas (13).....	34
Figura 2. 17 Esquema de operación de maquina AEDM (16) .....	35
Figura 2. 18 micrografías de zona fundida (16) .....	37
Figura 2. 19 muestra la zona fundida a causa del electrolito a) hidróxido de sodio b) hidróxido de potasio (16).....	37
Figura 2. 20 a) electrolito puro Ra 1.8 $\mu$ m, b) concentración 100g/L Ra 1.2 $\mu$ m c) concentración 300g/L Ra 1 $\mu$ m. (16).....	38
Figura 2. 21 a) Jet-ECM sin disolución dirigida, y b) LAJECM con intensificación de disolución en la zona localizada (17).....	39
Figura 2. 22 Fotos de SEM de la sección transversal y el perfil de rugosidad del agujero de los materiales seleccionados en las condiciones de U = 180V, IEG = 2 mm, Cp = 20%: (a) LAJECM aleación de titanio, (b) JECM aleación de titanio, (c) LAJECM Hastelloy, y (d) Hastelloy JECM (17). .....	42
Figura 2. 23 a) microestructura después de rolado en caliente b) La microestructura de las muestras recocidas por el modo 1 en función de la deformación en frío anterior (20).....	45
Figura 2. 24 Micrografías que muestran los dos tipos de crecimiento: (a) Crecimiento heterogéneo (1.000°C, 5 min) y (b) Crecimiento homogéneo (1.050 °C, 60 min (21).....	47
Figura 2. 25 Microestructura de los aceros DP .....	48
Figura 2. 26 Microestructura de los aceros TRIP.....	50
Figura 2. 27 Grafica representativa del comportamiento de los aceros HSLA, DP, TRIP .....	51

Figura 4. 1 Esquema del corte de las piezas de acero cortadas por el proceso WEDM .....	55
Figura 4. 2 muestras de acero cortadas por el proceso WEM a) Acero DP, b) Acero HSLA .....	56
Figura 4. 3 microestructura a 5x a) acero HSLA, b) acero DP, c) acero TRIP .....	58
Figura 4. 4 microestructuras a 20X a) acero HSLA, b) acero DP y c) acero TRIP .....	58
Figura 4. 5 microestructura a 50x a) acero HSLA, b) acero DP, c) acero TRIP .....	59
Figura 4. 6 distribución de microdureza .....	59
Figura 4. 7 perfil de dureza a) vertical b) horizontal .....	60
Figura 4. 8 análisis cualitativo por MEB del acero HSLA .....	60
Figura 4. 9 análisis cualitativo por MEB del acero TRIP. ....	61
Figura 4. 10 análisis cualitativo por MEB del acero DP .....	61
Figura 4. 11 fotografías tomadas por MEB a) acero HSLA b) acero DP .....	62
Figura 4. 12 Fotografía por MEB de acero TRIP, la cual muestra la capa de acero solidificado .....	63

# Listado de tablas

Tabla 2. 1 Comparación de los procesos de corte convencionales (2)(3)(4).	12
Tabla 2. 2 Tasa específica de remoción de material en el corte electroquímico (3)	14
Tabla 2. 3 Piezas producidas por herramientas en función del insumo utilizado. (3)	17
Tabla 2. 4 Comparación de procesos no convencionales (2)	22
Tabla 2. 5 Referencia de variables experimentales (12)	29
Tabla 2. 6 Descripción de las partículas abrasivas usadas en el proceso EDM/AJM (13)	31
Tabla 2. 7 Condiciones de maquinado (13)	33
Tabla 2. 8 Condiciones de experimento del maquinado AEDM (16)	36
Tabla 2. 9 Características y propiedades de los materiales (17)	40
Tabla 2. 10 Aumento relativo en VRR para LAJECM comparación con JECM aleación de titanio (17)	41
Tabla 2. 11 Aumento relativo en VRR para LAJECM comparación con JECM Hasteloy (17)	41
Tabla 2. 12 composición química de los aceros HSLA (20)	44
Tabla 2. 13 composición química de los aceros HSLA 16Mn4 (21)	45
Tabla 4. 1 Composición química del acero HSLA	55
Tabla 4. 2 Composición química del acero DP	55
Tabla 4. 3 Composición química del acero TRIP	55
Tabla 4. 4 Parámetros utilizados durante el corte de las muestras de aceros	57
.....	
Tabla 4. 5 Resultado de rugosidad tomada mediante el perfilometro	64

# Bibliografía

1. **Institute, International Iron & Steel.** (*AHSS*), *Advance high strenght steel*. 2006.
2. **Harry D. Moore, Donald R. Kibbey.** *Materiales y procesos de fabricación*. segunda. México D.F. : Limusa, 2002. pp. 572-573.
3. **Schey, John A.** *Procesos de Manufactura*. México D.F. : McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-031136-6.
4. **Neely, John E.** *Materiales y procesos de manufactura*. primera. Mexico D.F. : Limusa, 1992. pp. 258-260,271-316.
5. **Kalpakijian, Serope.** *Manufaturing Engineering and Technology*. s.l. : Prentice Hall, 2006. ISBN 0-13-148965-8.
6. *Flow*.
7. **Habib, Mohammad Ahsan and Rahman, Mustafizur.** *Performance analysis of EDM electrode fabricated by localized electrochemical deposition for micro-machining of stainless steel*. London : s.n., 2010. pp. 975–986. DOI 10.1007/s00170-009-2479-8.
8. **Puertas, I. and Luis, C.J.** *A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining*. Navarra : Journal of Materials Processing Technology, 2003.
9. **Shijin, Zhang, Yuqiang, Wu and Yanli, Wang.** *A Review on Abrasive Waterjet and Wire Electrical Discharge Machining*. Chongqing : The Open Mechanical Engineering Journal, 2011. Vol. 5.
10. **Zeleňák, Michal, et al., et al.** *COMPARISON OF SURFACE ROUGHNESS QUALITY CREATED BY ABRASIVE WATER JET AND CO2 LASER BEAM CUTTING*. Tehnički vjesnik : s.n., 2012. pp. 481-485. ISSN 1330-3651.



11. **Melaibar, Ammar, Molian, Pal and Shrotriya, Pranav.** *Two-dimensional contour cutting of polycrystalline cubic boron nitride using a novel laser/water jet hybrid process.* s.l. : Int J Adv Manuf Technol, 2012.
12. **Zhu, D., et al., et al.** *Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding.* Nanjing : Manufacturing Technology, 2011. Vol. 60.
13. **Lin, Yan-cherng, Chen, Yuan-feng and Wang, A-cheng.** *Machining performance on hybrid process of abrasive jet machining and electrical discharge machining.* Taoyuan : Trans. Nonferrous Met. Soc., 2012. 99-2212-E-252-006-MY3.
14. **Ekmekci, B. and Erden, A.** *Remarks on surface integrity of electric discharge machined surfaces A state of art review.* Antalya, Turkey : Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Design and Production, 2004.
15. **Anil , Kumar, et al., et al.** *A Study of Multiobjective Parametric Optimization of Silicon Abrasive Mixed Electrical Discharge Machining of Tool Steel.* Delhi, India : Materials and Manufacturing Processes, 2009. 1042-6914.
16. **C.T., Yang, et al., et al.** *Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte.* Chung-Li, Taiwan : International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006. Vol. 46.
17. **P.T., Pajak, et al., et al.** *Precision and efficiency of laser assisted jet electrochemical machining.* Glasgow,Edinburgh, UK : Precision Engineering, 2006. Vol. 30.
18. **Materials, American Standar.** *ASM Handbook, Vol.1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys.* 2005.

19. **Vazquez, Salvador Meza.** *Soldabilidad de los aceros HSLA termogalvanizados para aplicaciones automotrices.* San Nicolas de los Garza, Nuevo Leon : s.n., 2004.

20. **J A N O S E C , M., et al., et al.** *Mierostructure and mechanical properties of cold rolled, annealed HSLA strip steels.* Ostrava, Czech Republic : ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, 2007. Vol. VII.

21. **Illescas, S., Fernández, J. and Guilemany, J.M.** *Estudio del crecimiento de grano de la fase austenítica en un acero HSLA de bajo contenido en carbono.* Barcelona, España. : REV. METAL. MADRID,, 2008. Vol. 44. ISSN: 0034-8570.

22. *corte plasma CNC turbomax.*

23. *electromaquinado.*

24. *Equipos y Soldadura RAFE.*

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre:	Rolando Iram Casas Ortega
Grado a obtener:	Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial
Título de la monografía:	Estudio para la integración de un sistema de corte de alta velocidad y precisión, para su uso en la industria automotriz
Títulos obtenidos:	Ingeniero Industrial y de Sistemas
Universidad:	Universidad Autónoma de Noreste
Experiencia profesional:	HP Pelzer de México
Lugar y fecha de nacimiento:	Saltillo Coahuila; 4 de marzo de 1986
Padres:	Ramiro Casas Alvarado Socorro Ortega Ledesma