

“Efecto de los métodos de corte térmicos sobre la  
microestructura y las propiedades mecánicas de  
aleaciones metálicas”



**Sivori, Francisco**

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

*Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional  
del Comahue como requisito para la obtención del grado de  
INGENIERO MECÁNICO*

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

**“Efecto de los métodos de corte térmicos sobre la  
microestructura y las propiedades mecánicas de  
aleaciones metálicas”**

**Sivori, Francisco**

Directora: Dra. Ing. Poliserpi, Mariana

Co-Director: Dr. Ing. Steimbregger, Ceferino

*Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional  
del Comahue como requisito para la obtención del grado de*

***INGENIERO MECÁNICO***

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

**“Efecto de los métodos de corte térmicos sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de aleaciones metálicas”**

**Sivori, Francisco**

Aprobado en fecha X de Mayo de 2024

Tribunal evaluador:

- Dra. Ing. Zalazar, Mónica
- Ing. Curro, Federico
- Ing. González, Gerardo

# AGRADECIMIENTOS

- A mi familia, por su apoyo y entendimiento en todo momento a lo largo de estos años,
- A Mariana Poliserpi y Ceferino Steimbregger, por la predisposición, voluntad y colaboración en la dirección del PIP.
- A Federico Contreras, Gerardo González, Guillermo Martin, Lucas Goytiño, Mónica Zalazar, Nicolás Raffo, Leandro Ramoska y Tomás Medina por su ayuda y soporte en las distintas etapas de la parte experimental del PIP
- Al equipo de trabajo de la UNRN por realizar la parte experimental de microscopía electrónica de barrido.
- A mi grupo de amigos y compañeros de cursada, que me motivaron en muchas oportunidades.

# “Efecto de los métodos de corte térmicos sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de aleaciones metálicas”

Autor: Sivori, Francisco

Directora: Dra. Ing. Poliserpi, Mariana

Co-Director: Dr. Ing. Steimbregger, Ceferino

## Resumen

La finalidad de este trabajo fue estudiar la influencia de los métodos de corte térmico por plasma, oxicorte y electroerosión por hilo, sobre la microestructura y la performance a la fatiga de cuatro aleaciones metálicas: un acero inoxidable dúplex, una aleación de aluminio, un acero al carbono y un acero aleado de carbono medio.

Los diferentes cortes se realizaron variando la velocidad de corte de cada método, para poder así determinar su efecto en el espesor de la ZAC. Las técnicas de caracterización involucraron inspección visual, microscopía óptica, SEM y microdureza Vickers.

Los resultados obtenidos demostraron que métodos térmicos como el corte por plasma y oxicorte, generan una ZAC mucho más severa en cuanto a espesor y cambios microestructurales que el corte por hilo. Este último, genera una fusión del material de manera más localizada, y en consecuencia, no presenta variaciones microestructurales en los materiales base. Además, se encontró que a mayor velocidad de corte, menor es el espesor de ZAC, pero mayor es el cambio microestructural. Esto se asocia a que ante un mismo aporte térmico y mayor velocidad de corte, menor es el tiempo de enfriamiento sobre el borde seccionado.

Por último, se realizaron ensayos de fatiga mediante una máquina de flexión en 3 puntos, sometiendo la cara afectada térmicamente a carga cíclica. Se encontró que todos los ensayos efectuados resistieron alrededor de  $2E6$  ciclos sin generación de fisuras. El motivo de estos run outs puede estar relacionado con el principio de funcionamiento de la máquina rotativa disponible, más que en la resistencia a fatiga de la superficie cortada. A pesar de mantener el desplazamiento constante, el equipo genera una modificación paulatina del ciclo de carga que reduce el  $\sigma_r$  y modifica  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ . Esto se observó en todos los desplazamientos utilizados. Las mediciones realizadas y el relevamiento de la máquina constituyen un gran aporte al entendimiento de su funcionamiento, y justifican su uso en

aplicaciones que presenten una etapa reducida de nucleación de fisura, como probetas con entallas.

**Palabras clave:** corte por plasma, oxicorte, electroerosión por hilo, ZAC, microestructura, ensayo de fatiga.

# “Effect of thermal cutting on the microstructure and mechanical properties of metallic alloys”

Author: Sivori, Francisco

Advisor: Dra. Ing. Poliserpi, Mariana

Co-advisor: Dr. Ing. Steimbregger, Ceferino

## Summary

The purpose of this work was to study the influence of thermal cutting methods, in particular, plasma cutting, oxy-fuel cutting, and wire electroerosion, on the microstructure and fatigue performance of four metallic alloys: duplex stainless steel, aluminum alloy, carbon steel, and medium carbon alloy steel.

The different cuts were made by varying the cutting speed of each cutting method to determine its effect on the heat-affected zone (HAZ) thickness. Characterization techniques involved visual inspection, optical microscopy, SEM, and Vickers microhardness.

The results showed that thermal methods such as plasma cutting and oxy-fuel cutting generate a much more severe HAZ in terms of thickness and microstructural changes compared to wire cutting. Wire cutting generates a more localized material fusion and consequently does not present microstructural variations in the base materials. Additionally, it was found that higher cutting speeds result in thinner HAZ thickness but greater microstructural changes. This is associated with the fact that under the same thermal input and higher cutting speed, the cooling time at the cut edge is shorter.

Finally, fatigue tests were carried out using a 3-point bending machine, submitting the thermally affected face to cyclic loading. It was found that all tests conducted resisted around 2E6 cycles without crack generation. The reason for these runouts may be related to the operating principle of the available rotary machine, rather than the fatigue resistance of the cut surface. Despite maintaining constant displacement, the equipment gradually modifies the loading cycle, reducing  $\sigma_r$  and modifying  $\sigma_{max}$  and  $\sigma_{min}$ . This was observed in all displacements used. The measurements taken and the survey of the machine contribute significantly to understanding its operation and justify its use in applications with a reduced crack nucleation stage, such as notched specimens.

**Keywords:** plasma cutting, oxy-fuel cutting, wire electrical discharge machining, HAZ, microstructure, fatigue test.

# Índice general

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
1	Objetivo general . . . . .	16
2	Objetivos particulares . . . . .	16
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
1	Métodos de corte no convencionales . . . . .	17
2	Métodos de corte térmicos . . . . .	20
2.1	Maquinado por arco de plasma . . . . .	20
2.1.1	Principio de funcionamiento . . . . .	20
2.1.2	Parámetros que se controlan . . . . .	21
2.1.3	Ventajas y desventajas . . . . .	22
2.1.4	Influencia sobre la microestructura . . . . .	23
2.1.5	Influencia sobre las propiedades mecánicas . . . . .	24
2.2	Corte con oxígeno y gas combustible . . . . .	25
2.2.1	Principio de funcionamiento . . . . .	25
2.2.2	Parámetros que se controlan . . . . .	26
2.2.3	Ventajas y desventajas . . . . .	27
2.2.4	Influencia sobre la microestructura . . . . .	27
2.2.5	Influencia sobre las propiedades mecánicas . . . . .	28
2.3	Maquinado por descarga eléctrica con alambre . . . . .	29
2.3.1	Principio de funcionamiento . . . . .	29
2.3.2	Parámetros que se controlan . . . . .	30
2.3.3	Ventajas y desventajas . . . . .	31
2.3.4	Influencia sobre la microestructura . . . . .	31



2.3.5	Influencia sobre las propiedades mecánicas . . . . .	33
3	Falla por fatiga . . . . .	33
3.1	Generación y crecimiento de fisuras por fatiga . . . . .	34
3.2	Iniciación de fisuras por fatiga . . . . .	36
3.3	Efecto de la tensión media en la fatiga . . . . .	36
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>38</b>
1	Introducción . . . . .	38
2	Materiales utilizados . . . . .	39
3	Métodos y parámetros de corte . . . . .	40
3.1	Parámetros de corte óptimos . . . . .	42
4	Preparación metalográfica . . . . .	43
5	Técnicas de caracterización . . . . .	44
5.1	Inspección visual y macrografía . . . . .	44
5.2	Microscopía óptica . . . . .	44
5.3	Microscopía electrónica de barrido (SEM) . . . . .	45
6	Propiedades mecánicas . . . . .	45
6.1	Medición de dureza . . . . .	45
6.2	Ensayos de fatiga . . . . .	46
6.2.1	Selección del método de ensayo y dimensionamiento de las probetas . . . . .	46
6.2.2	Funcionamiento de la máquina rotativa . . . . .	48
6.2.3	Corrección de puntos de apoyo en probetas . . . . .	50
6.2.4	Strain gage y LVDT . . . . .	51
6.2.5	Ensayos de flexión en 3 puntos . . . . .	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>54</b>
1	Caracterización de los materiales de partida . . . . .	54
1.1	Acero inoxidable dúplex . . . . .	54
1.2	Aleación de aluminio . . . . .	55
1.3	Acero al carbono . . . . .	56
1.4	Acero aleado . . . . .	57
2	Evaluación de parámetros de corte . . . . .	58
2.1	Inspección visual y macrografía . . . . .	59

2.1.1	Corte por plasma . . . . .	60
2.1.2	Oxicorte . . . . .	63
2.1.3	Corte por hilo . . . . .	66
2.2	Caracterización microestructural de la zona afectada térmicamente por el corte . . . . .	69
2.2.1	Acero inoxidable duplex . . . . .	69
2.2.1.1	Corte por plasma . . . . .	69
2.2.1.2	Corte por hilo . . . . .	75
2.2.2	Aleación de aluminio . . . . .	78
2.2.2.1	Corte por plasma . . . . .	78
2.2.2.2	Corte por hilo . . . . .	81
2.2.3	Acero al carbono . . . . .	82
2.2.3.1	Corte por plasma . . . . .	82
2.2.3.2	Oxicorte . . . . .	89
2.2.3.3	Corte por hilo . . . . .	93
2.2.4	Acero aleado . . . . .	97
2.2.4.1	Corte por plasma . . . . .	97
2.2.4.2	Oxicorte . . . . .	105
2.2.4.3	Corte por hilo . . . . .	112
2.3	Medición de dureza . . . . .	117
2.3.1	Acero inoxidable dúplex . . . . .	117
2.3.2	Aleación de aluminio . . . . .	119
2.3.3	Acero al carbono . . . . .	121
2.3.4	Acero aleado . . . . .	124
3	Ensayos de flexión en 3 puntos . . . . .	127
3.1	Mediciones de galgas extensiométricas y LVDT . . . . .	128
3.2	Gráficas obtenidas a partir de ensayos de fatiga . . . . .	133
3.3	Análisis dinámico y calibración de celda de carga . . . . .	136
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>143</b>
1	TAREAS FUTURAS . . . . .	145
	<b>Referencias</b>	<b>145</b>

<b>A Anexo I</b>	<b>149</b>
<b>B Anexo II</b>	<b>150</b>

## Índice de figuras

3.1	Maquinado por arco de plasma ( <a href="#">Groover, 2020</a> ) . . . . .	20
3.2	Características y calidad del corte por plasma. ( <a href="#">Corporation, 2012</a> ) . . . . .	23
3.3	(a) Corte por flama de una placa de acero con soplete de acetileno. (b) Sección transversal del corte de la placa, dónde se pueden ver las líneas de arrastre ( <a href="#">Kalpakjian y Schmid, 2020</a> ). . . . .	26
3.4	Esquema del proceso de electroerosión por alambre ( <a href="#">Kalpakjian y Schmid, 2020</a> ) . . . . .	29
3.5	Esquema de las capas creadas por corte por hilo ( <a href="#">Najm, 2018</a> ). . . . .	32
3.6	Diagrama de ciclo de carga con los respectivos parámetros ( <a href="#">Chapetti, 2014</a> ) . . . . .	34
3.7	Curva de Wöhler de un acero SAE 1020 ( <a href="#">Chapetti, 2014</a> ) . . . . .	35
3.8	Dos métodos para representar la información de fatiga cuando la tensión media no equivale a cero. ( <a href="#">Dieter, 1986</a> ) . . . . .	37
4.1	Síntesis de etapas y técnicas utilizadas en el proyecto integrador profesional. . . . .	39
4.2	Máquinas de corte no convencional a disposición en el LMTyS. . . . .	41
4.3	Railtrac utilizado para automatizar los cortes por plasma y oxicorte.. . . .	42
4.4	Esquema simplificado de la medición de espesor de ZAC considerado. . . . .	45
4.5	Esquema simplificado de las dimensiones de las probetas para ensayos de flexión en 3 puntos. . . . .	47
4.6	Esquema de viga simplemente apoyada bajo una carga axial concentrada en el centro. . . . .	47
4.7	Máquina rotativa de flexión en tres puntos a disposición en el laboratorio de ensayos mecánicos de la FaIn.(a) Vista frontal; (b) Vista lateral. . . . .	49
4.8	Probetas de acero inoxidable dúplex (arriba) y acero A36 (abajo), cortadas con plasma y corregidas en los puntos de apoyo. . . . .	50

4.9	Fresadora universal Venier FU-2. . . . .	51
4.10	Dimensiones utilizadas para probetas con strain gage adherido. (a) Probeta 1; (b) Probeta 2; (c) Probeta 3. . . . .	52
4.11	Montaje de probeta 1 con conexión eléctrica realizado sobre máquina de fatiga.	52
4.12	(a) Montaje del LVDT en máquina de fatiga para medición de desplazamiento; (b) Escala de desplazamiento de excéntrico de máquina de fatiga . . . . .	53
5.1	Microestructura transversal de acero inoxidable dúplex 2205, en aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's. . . . .	55
5.2	Microestructura transversal de aleación de Aluminio serie 1xxx, en aumento de x500. Ataque químico: Keller. . . . .	56
5.3	Microestructura transversal de acero ASTM A36. Ataque químico: Nital al 2%	57
5.4	Microestructura longitudinal de acero AISI/SAE 4140, en aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%. . . . .	58
5.5	Terminación superficial obtenida en acero DSS para velocidades de corte por plasma de: (a) 120 cm/min, (b) 140 cm/min y (c) 150 cm/min.. . . .	60
5.6	Terminación superficial obtenida en aleación de Aluminio para velocidades de corte por plasma de: (a) 70 cm/min. (b) 80 cm/min y (c) 90 cm/min. . . . .	61
5.7	Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de corte por plasma de: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min, (d) 60 cm/min y (e) 70 cm/min. . . . .	61
5.8	Terminación superficial obtenida en acero 4140 para velocidades de corte por plasma de: (a) 10 cm/min, (b) 15 cm/min y (c) 20 cm/min. . . . .	62
5.9	Cortes ideal, esperado y no deseado en el método de corte por plasma, junto con los parámetros de arrastre y paso entre líneas ( <a href="#">Gostimirović, 2020</a> ). . . . .	63
5.10	Influencia de la velocidad de corte en la desviación del jet de plasma para el acero A36.. . . .	64
5.11	Influencia de la velocidad de corte en la desviación del jet de plasma para el acero 4140.. . . .	64
5.12	Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de oxicorte de: (a) 30 cm/min, (b) 35 cm/min y (c) 40 cm/min.. . . .	65

5.13	Terminación superficial obtenida en 4140 para velocidades de oxicorte de: (a) 25 cm/min, (b) 30 cm/min y (c) 35 cm/min. . . . .	65
5.14	Terminación superficial obtenida en acero DSS para velocidades de corte por hilo de: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ y (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . . . . .	67
5.15	Terminación superficial obtenida en aleación de aluminio para velocidades de corte de hilo de: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ y (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . . . . .	67
5.16	Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de corte por hilo de: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ y (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . . . . .	68
5.17	Terminación superficial obtenida en acero 4140 para velocidades de corte de: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ y (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . . . . .	68
5.18	ZAC en muestras de DSS cortadas mediante plasma: (a) 120 cm/min; (b) 140 cm/min; (c) 150 cm/min. Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's. . . . .	70
5.19	ZAC en muestra de DSS cortada mediante plasma para una velocidad de 140 cm/min. Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's. . . . .	70
5.20	Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar distribución de elementos de aleación. Naranja = Ni; Amarillo = Fe; Celeste = Cr. Aumento x1000. . . . .	72
5.21	Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Naranja = Ni; Amarillo = Fe; Celenste = Cr. Aumento x1000. . . . .	72
5.22	Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para las distintas velocidades de corte en DSS: (a) 120 cm/min, en aumento de x100; (b) 140 cm/min, en aumento de x200; (c) 150 cm/min, en aumento de x200. . . . .	73
5.23	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para DSS cortado mediante corte por plasma. . . . .	74
5.24	ZAC en muestra de DSS cortada mediante corte por hilo: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's. . . . .	75
5.25	Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por WEDM, con la respectiva medición de composición química en la capa blanca. Aumento x5000.	
	76	
5.26	Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para DSS: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. . . . .	77

5.27	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para DSS cortado mediante corte por hilo. . . . .	78
5.28	ZAC en muestra de aluminio serie 1xxx cortada mediante plasma: (a) 70 cm/seg; (b) 80 cm/seg; (c) 90 cm/seg. Aumento de x500. Ataque químico: Keller. . . . .	79
5.29	Microestructura aluminio serie 1xxx en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar distribución de elementos de aleación. Celeste = Al; Azul = O. Aumento x1000. . . . .	80
5.30	Microestructura aluminio serie 1xxx en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Celeste = Al; Azul = O. Aumento x1000 . . . . .	80
5.31	ZAC en muestra de aluminio serie 1xxx cortada mediante hilo: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Keller. . . . .	81
5.32	ZAC en muestra de A36 cortada mediante plasma: (a) 40 cmm/min; (b) 45 cm/min; (c) 50 cm/seg; (d) 60 cm/min; (e) 70 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 2% . . . . .	83
5.33	ZAC en muestra de A36 cortadas mediante plasma para una velocidad de 60 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 2%. . . . .	83
5.34	Zonas A y B de microestructura resultante en A36 luego del corte por plasma para una velocidad de 60 cm/min. Aumento de x500. . . . .	84
5.35	Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar zonas de contenido de carbono. Azul = Fe; Rojo = C; Amarillo = Mn. Aumento x1000 . . . . .	85
5.36	Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Azul = Fe; Rojo = C; Amarillo = Mn. Aumento x1000 . . . . .	85
5.37	Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para acero A36: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min. Aumento x100. . . . .	86
5.38	Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para: (a) 60 cm/min, (b) 70 cm/min. Aumento x100. . . . .	87
5.39	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante corte por plasma. . . . .	88

5.40	ZAC en muestra de A36 cortadas mediante oxicorte: (a) 30 cm/min; (b) 35 cm/min; (c) 40 cm/min. Aumento x200. Ataque químico: Nital al 2%. . . . .	89
5.41	Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por oxicorte, con el correspondiente mapeo de colores para identificar zonas de contenido de carbono. Verde = Fe; Rojo = C. Aumento x1000 . . . . .	90
5.42	Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por oxicorte, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Verde = Fe; Rojo = C. Aumento x1000. . . . .	91
5.43	Mediciones de espesor de ZAC en oxicorte para acero A36: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min. Aumento x50. . . . .	92
5.44	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante oxicorte.	93
5.45	ZAC en muestra de A36 cortada mediante corte por hilo: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500. Ataque químico: Nital al 2%. . . . .	94
5.46	Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para acero A36: (a) y (b) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500 . . . . .	95
5.47	Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para acero A36: (a) y (b) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500. . . . .	95
5.48	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante corte por hilo.. . . . .	96
5.49	ZAC en muestras de 4140 cortadas mediante plasma: (a) 10 cm/min; (b) 15 cm/min; (c) 20 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%.. . . .	98
5.50	ZAC en muestra de 4140 cortada mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento de x50. Ataque químico: Nital al 4%. . . . .	98
5.51	ZONA D de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500. . . . .	99
5.52	ZONA E de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500. . . . .	100
5.53	ZONA F de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500. . . . .	100
5.54	Microestructura de AISI 4140 en borde afectado térmicamente por PAC con la respectiva línea de medición de CQ. Aumento x60. . . . .	102



5.55	Gráfica de medición de CQ a lo largo del espesor de ZAC, para el 4140 cortado mediante PAC. . . . .	102
5.56	Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para las distintas velocidades de corte en 4140: (a) 10 cm/min; (b) 15 cm/min; (c) 20 cm/min. Aumento x500. . . . .	103
5.57	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante corte por plasma. . . . .	104
5.58	ZAC en muestras de 4140 cortadas mediante oxicorte: (a) 25 cm/min; (b) 30 cm/min; (a) 35 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%.. . . .	105
5.59	ZAC en muestras de 4140 cortada mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min. Aumento de x50. Ataque químico: Nital al 4%. . . . .	106
5.60	ZONA G de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min. . . . .	107
5.61	ZONA H de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min . . . . .	107
5.62	ZONA I de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min . . . . .	108
5.63	Microestructura de AISI 4140 en borde afectado térmicamente por OXICORTE con la respectiva línea de medición de CQ. Aumento x60. . . . .	109
5.64	Gráfica de medición de CQ a lo largo del espesor de ZAC, para el 4140 cortado mediante OXICORTE. . . . .	110
5.65	Mediciones de espesor de ZAC en oxicorte para las distintas velocidades de corte en 4140: (a) 25 cm/min; (b) 30 cm/min; (c) 35 cm/min. Aumento x50. . . . .	111
5.66	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante oxicorte. . . . .	112
5.67	ZAC en muestras de 4140 cortada mediante electroerosión por hilo: (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Nital al 4%. . . . .	113
5.68	Microestructura 4140 en borde afectado térmicamente por corte por hilo, con el correspondiente mapeo de colores para identificar la capa blanca. Amarillo = Fe; Rojo = Cr; Celeste = Mn. Aumento x1000 . . . . .	114

5.69	Microestructura 4140 en borde afectado térmicamente por corte por hilo, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Amarillo = Fe; Rojo = Cr; Celeste = Mn. Aumento x1000 . . . . .	114
5.70	Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para las distintas velocidades de corte en 4140. (a) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. . . . .	115
5.71	Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante corte por hilo. . . . .	116
5.72	Esquema de sentido de barrido de microdureza. . . . .	117
5.73	Microdureza Vickers para DSS luego del corte por plasma. . . . .	118
5.74	Microdureza Vickers para DSS luego del corte por hilo. . . . .	118
5.75	Microdureza Vickers para la aleación de aluminio luego del corte por plasma. . . . .	119
5.76	Microdureza Vickers para la aleación de aluminio luego del corte por hilo. . . . .	120
5.77	Microdureza Vickers para acero A36 luego del corte por plasma. . . . .	121
5.78	Microdureza Vickers para acero A36 luego de oxicorte. . . . .	121
5.79	Microdureza Vickers para acero A36 luego del corte por hilo. . . . .	122
5.80	Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por plasma. . . . .	124
5.81	Microdureza Vickers para acero 4140 luego de oxicorte. . . . .	124
5.82	Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por hilo. . . . .	125
5.83	Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por plasma, sobre las bandas de martensita. . . . .	126
5.84	Microdureza Vickers para acero 4140 luego del oxicorte, sobre las bandas de martensita. . . . .	127
5.85	Gráfico obtenido mediante galga extensiométrica, para la probeta 1, con una excentricidad de máquina de fatiga de 0,2 mm. . . . .	128
5.86	Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,08 mm. . . . .	132
5.87	Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,1 mm. . . . .	132
5.88	Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,2 mm. . . . .	132
5.89	Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de A36 seccionadas mediante corte por plasma. . . . .	134
5.90	Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de A36 seccionadas mediante corte por hilo. . . . .	134

5.91	Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de 4140 seccionadas mediante corte por hilo.. . . . .	135
5.92	Crecimiento de la tensión media en probeta de A36 con galga extensiométrica adherida. . . . .	136
5.93	Crecimiento de la relación de carga en probeta de A36 con galga extensiométrica adherida. . . . .	137
5.94	Sistema de medición fuera de funcionamiento de la máquina de fatiga. . . . .	138
5.95	Celda de carga tipo S de 500 kg utilizada para calibrar el sistema de medición incorporado en la máquina de fatiga. . . . .	138
5.96	Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, al inicio del ensayo. . . . .	139
5.97	Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, luego de 2 horas de ensayo. . . . .	140
5.98	Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, luego de 3 horas de ensayo. . . . .	140

## Índice de tablas

3.1 Gases usados en el oxicorte, con temperaturas de flama y calores de combustión. ( <a href="#">Groover, 2020</a> ) . . . . .	26
4.1 Materiales utilizados para realizar cortes térmicos, con su respectivo espesor.	39
4.2 Composición química de acero inoxidable dúplex 2205. . . . .	40
4.3 Composición química de aluminio serie 1xxx. . . . .	40
4.4 Composición química de acero al carbono ASTM A36. . . . .	40
4.5 Composición química de acero aleado AISI 4140. . . . .	40
4.6 Máquinas a disposición en el LMTyS . . . . .	41
4.7 Parámetros óptimos de corte por plasma para cada material. . . . .	42
4.8 Parámetros óptimos de corte por hilo para cada material. . . . .	42
4.9 Parámetros óptimos de oxicorte para cada material. . . . .	42
4.10 Resumen reactivos y tiempos de inmersión para revelar la microestructura de los metales ( <a href="#">Internacional, 2004c</a> ). . . . .	44
4.11 Resumen de las dimensiones de cada probeta para cada material . . . . .	48
4.12 Características de la máquina de fatiga del laboratorio de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería . . . . .	48
4.13 Dimensiones de probetas para ensayar el funcionamiento de la máquina de fatiga. . . . .	52
5.1 Velocidades de corte evaluadas en PAC. . . . .	59
5.2 Velocidades de corte evaluadas en OXICORTE. . . . .	59
5.3 Velocidades de corte evaluadas en WEDM. . . . .	59
5.4 Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma en DSS, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	74

5.5	Medición de composición química en capa blanca de DSS cortado con WEDM, en wt[%]. . . . .	76
5.6	Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por hilo en DSS, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	77
5.7	Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	87
5.8	Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	88
5.9	Valores obtenidos de medición de ZAC luego de oxicorte para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	92
5.10	Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por hilo para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	96
5.11	Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por plasma para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	104
5.12	Valores obtenidos de medición de ZAC luego de oxicorte para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	111
5.13	Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por hilo para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte. . . . .	115
5.14	Promedio de valores obtenidos para PROBETA 1 con las distintas excentricidades. . . . .	130
5.15	Promedio de valores obtenidos para PROBETA 2 con las distintas excentricidades. . . . .	130
5.16	Promedio de valores obtenidos para PROBETA 3 con las distintas excentricidades. . . . .	130

# 1. INTRODUCCIÓN

El mecanizado de los materiales constituye una etapa fundamental en los procesos de fabricación y reparación de componentes metálicos. Generalmente, es un proceso mandatorio previo al proceso de ensamble y/o unión metalúrgica, y requiere del estudio de la influencia del tipo de mecanizado en la pieza.

Una de las clasificaciones de los métodos de mecanizado los divide en convencionales y no convencionales. Dentro de este último grupo se encuentran los métodos de corte tales como oxicorte, corte por láser, corte por plasma, corte por hilo y corte por chorro de agua, entre otros. Dado que gran parte de ellos se basan en el aporte de energía térmica para efectuar el corte, provocan una modificación en la microestructura y por consiguiente, en las propiedades mecánicas y fisicoquímicas del acero. Es por ello, que la influencia del tipo de corte en el material debe ser estudiada para garantizar el correcto funcionamiento del componente mecánico, según las solicitaciones a las que está sometido.

La utilización de métodos de corte térmicos para la manufactura de diferentes componentes que se requieren en la industria, se torna cada vez más popular debido a la alta productividad que presentan. Por tal motivo, resulta de gran interés el análisis en profundidad de cómo afecta el aporte térmico de estos procesos a la fabricación de componentes mecánicos y su desempeño en servicio. A tal fin, se propone realizar un estudio exhaustivo de la microestructura que presentarán estos materiales luego de ser sometidos a diferentes ciclos térmicos introducidos por los cortes a analizar. Adicionalmente, dado que las superficies modificadas actúan en detrimento de la resistencia a fatiga de la pieza mecanizada, se analizará la respuesta de la superficie cortada a solicitaciones cíclicas.

El presente trabajo se centrará en el estudio de tres métodos distintos de corte térmico, los cuales son: (1) corte por arco de plasma, (2) corte con oxígeno y gas combustible (o también llamado oxicorte), y (3) corte por electroerosión por alambre.

## **2. OBJETIVOS**

### **1 Objetivo general**

El objetivo general del trabajo es estudiar la influencia de los métodos de corte térmicos por plasma, oxicorte y electroerosión por alambre sobre la resistencia a la fatiga y la microestructura de cuatro aleaciones metálicas: un acero inoxidable dúplex, un acero aleado de carbono medio, un acero de bajo carbono y una aleación de aluminio.

### **2 Objetivos particulares**

Los objetivos particulares de este trabajo se listan a continuación:

1. Estudiar e implementar de forma óptima técnicas de análisis y caracterización de materiales.
2. Analizar el efecto de los métodos de corte en la microestructura de las aleaciones en estudio.
3. Determinar la combinación de parámetros óptimos, teniendo en cuenta consideraciones preliminares técnicas de cada método de corte.
4. Estudiar el efecto de los métodos de corte en la vida a fatiga de las aleaciones en estudio, para distintas tensiones nominales
5. Integrar conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica para realizar estudios críticos de problemáticas tecnológicas e industriales actuales.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 1 Métodos de corte no convencionales

Los métodos de corte no convencionales hacen referencia al grupo de procesos de remoción de material mediante técnicas que incluyen diferentes formas de energía, ya sea mecánica, térmica, química, eléctrica o una combinación de ellas. Estos procesos no involucran un instrumento afilado de corte que deforme el material por cizallamiento hasta cortarlo, tal y como se puede ver en procesos convencionales como el torneado, fresado y taladrado, entre otros.

A continuación, se describen las diferentes fuentes de energía utilizadas en estos procesos (Groover, 2020):

- **Mecánica:** involucra erosión de la pieza de trabajo mediante un chorro de alta velocidad de partículas abrasivas, de fluido o ambas.
- **Eléctrica:** remoción de material a través de un proceso electroquímico (energía eléctrica y reacción química). Este mecanismo es el opuesto a la electrodeposición. Es necesario que el material a maquinarse sea conductor.
- **Térmica:** se alcanzan temperaturas localizadas lo suficientemente altas para fundir o vaporizar el material. Estos procesos tienen la complicación de que las altas temperaturas causan daños físicos y metalúrgicos a la nueva superficie de la pieza. En algunos casos, la superficie resultante está por debajo de las tolerancias o rugosidades requeridas, lo que conlleva realizar un maquinado posterior para cumplimentar los requerimientos específicos.
- **Química:** muchos materiales son susceptibles a los ataques químicos de ciertos ácidos y otras sustancias de acción química fuerte. En este proceso, el material se elimina con una adecuada selección del químico a utilizar, para remover una porción del material mientras las otras partes están cubiertas por una máscara.



Resulta importante el estudio de estos métodos de corte, dado que existen diferentes situaciones en las cuales los medios mecánicos convencionales no resultan satisfactorios, económicos o incluso posibles. Puede suceder que se deba recurrir a estos métodos de corte, dado que muchos de ellos tienen la flexibilidad de ser portátiles, lo que permite realizar trabajos de campo. Además, se atribuyen otras razones para su selección, como por ejemplo (Kalpakjian y Schmid, 2020):

- La resistencia mecánica y dureza del material de la pieza de trabajo son muy elevadas.
- El material de la pieza de trabajo es muy frágil para maquinarlo sin dañar la pieza. Caso típico en aleaciones con tratamientos térmicos severos, vidrios, cerámicos y piezas fabricadas por metalurgia de polvos.
- La pieza de trabajo es muy flexible o muy esbelta para soportar las fuerzas del maquinado o rectificado convencional, o bien existen complicaciones en los dispositivos de soporte y sujeción.
- La forma que se quiere maquinar es compleja, incluyendo características como perfiles internos y externos u orificios con relaciones elevadas de longitud y diámetro en materiales muy duros.
- Existen requerimientos especiales de acabado superficial y tolerancias dimensionales que no pueden obtenerse por medio de otros procesos de manufactura o que no son económicos mediante procesos alternos.
- No es deseable o aceptable la elevación de temperatura, o los esfuerzos residuales desarrollados en la pieza de trabajo durante el procesamiento.

El presente trabajo se centrará en los métodos de corte que involucran energía térmica, y en particular tres de ellos: corte por arco de plasma, corte con oxígeno y gas combustible (o también llamado oxicorte), y electroerosión por hilo, los cuales se describirán en secciones subsiguientes.

Es importante resaltar que cualquier carga térmica que reciba un material, resulta ser un fenómeno no deseado desde el punto de vista de la vida operativa de la pieza. Actualmente, muchas normas especifican la necesidad de mecanizar los bordes de una pieza luego de aplicar un corte térmico, hasta la profundidad de la zona afectada por calor (ZAC), pero no menos de 1 a 2 mm, lo que incrementa la complejidad y el costo de producción (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

La ZAC, análoga a la que se define en soldadura, es la región adyacente al corte térmico que experimenta cambios microestructurales y alteraciones en las propiedades. Dentro de estas alteraciones, se incluyen ([Callister Jr y Rethwisch, 2018](#)):

- Si la pieza fue previamente trabajada en frío, la ZAC puede experimentar recristalización y crecimiento de grano y, en consecuencia, una disminución de la resistencia mecánica y la tenacidad.
- Durante el enfriamiento, pueden haberse generado tensiones residuales que modifican la respuesta mecánica.
- Para aceros, el material en estas zonas puede haber sido calentado hasta temperaturas lo suficientemente altas para formar austenita. Cuando se enfría hasta la temperatura ambiente, la microestructura resultante que se forma va a depender de la velocidad de enfriamiento y de la composición química. Para aceros de bajo contenido de carbono y aleantes, normalmente estará presente el microconstituyente del eutectoide del acero, denominado perlita y la fase ferrita pro-eutectoide. Mientras que, para aceros aleados, una de las fases posibles es martensita, la cual no es deseable debido a que es una microestructura frágil.
- En algunos aceros inoxidables, puede ocurrir sensitización, promoviendo la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

Para los métodos de interés, la influencia sobre la zona afectada no será la misma. Cada uno de los cortes afectará de manera diferente a los distintos materiales, en lo relativo a ([Tingaev y Gubaydulin, 2016](#)):

- Composición química en el borde cortado.
- Microestructura.
- Dureza.
- Profundidad de la ZAC.

## 2 Métodos de corte térmicos

### 2.1 Maquinado por arco de plasma

#### 2.1.1 Principio de funcionamiento

El corte por plasma o PAC (del inglés, *Plasma Arc Cutting*) se basa en la generación de una corriente de plasma que opera a temperaturas de entre 10.000°C y 14.000°C, con el fin de cortar el metal por fusión. El plasma se define como un gas sobrecalentado e ionizado eléctricamente. Una condición necesaria para aplicar este tipo de corte térmico, es que el material sea conductor eléctrico (Groover, 2020).

En la acción de corte, el chorro se dirige hacia la pieza de trabajo a alta velocidad; esta misma acción se encarga de elevar la temperatura de la pieza hasta fundirla, para luego impulsar el metal fundido por la ranura.

El arco de plasma se genera entre un electrodo no consumible ubicado dentro de una torcha, como se ilustra en la Figura 3.1, y la pieza de trabajo que funciona como ánodo. La corriente fluye a través de una boquilla refrigerada con un circuito de agua o gas secundario, que se encarga de estrangular y dirigir el gas primario hacia el material a cortar, además de limpiar las zonas de corte. Este método es capaz de realizar cortes en metales de hasta 150mm (6") de espesor aproximadamente (Groover, 2020).

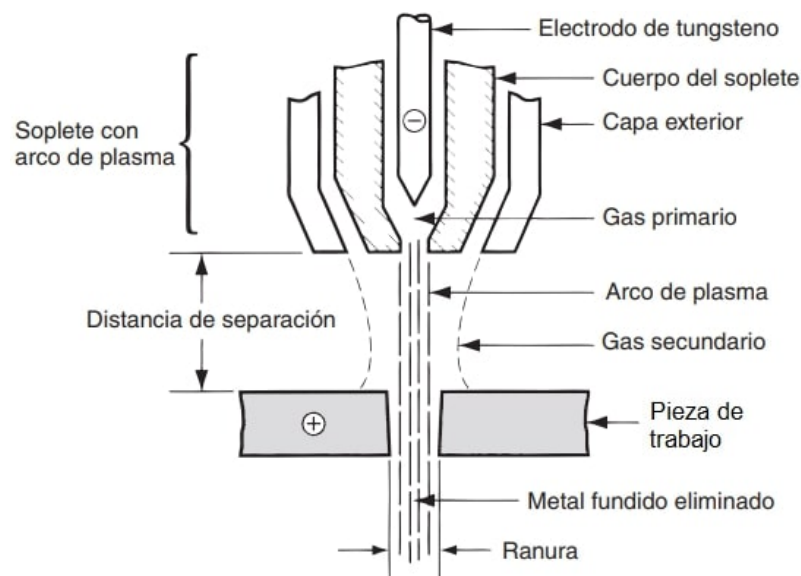


Figura 3.1. Maquinado por arco de plasma (Groover, 2020)

Otra característica de interés en el corte por plasma es que las caras opuestas suelen tener un bisel con respecto a cada una, siendo más anchas en la parte superior que en la inferior. Este bisel suele ser de entre 2 a 10° en cada cara. Esto difiere del corte con combustible de oxígeno-gas, que generalmente tiene un ancho uniforme y es cuadrado para todo el espesor del material.

### 2.1.2 Parámetros que se controlan

Dentro de las variables a controlar se tiene el tamaño de la tobera, la potencia (voltaje y corriente), el tipo y caudal de gas, la distancia entre boquilla y pieza de trabajo y la velocidad de corte. A continuación, se describe brevemente cada uno ([Drozda, 1983](#)):

- **Tamaño de la tobera:** La mejor calidad del corte por plasma se obtiene cuando la intensidad térmica es máxima. Para alcanzar esto, la tobera debe tener el menor tamaño posible, considerando la potencia acorde a la velocidad de corte y el espesor del material involucrado.
- **Potencia:** Se suele utilizar corriente directa entre 50 a 1000A, para generar potencias de hasta 200kW.
- **Tipo de gas:** Suelen utilizarse composición de gases como hidrógeno y nitrógeno o argón, y también gases activos como aire u oxígeno. Los gases activos brindan un corte satisfactorio, pero no suele ser recomendable dado el deterioro que genera el oxígeno en el electrodo de la torcha. Aún así, el uso de gases activos mejora la performance del corte por plasma dado que reduce la potencia consumida, permite cortar espesores mayores y también mejora la velocidad de corte. Por otro lado, para gas secundario, suele utilizarse nitrógeno, oxígeno, aire o dióxido de carbono. En algunos otros casos, el agua resulta una opción de protección.
- **Flujo de gas:** Según el tamaño de la tobera, un aumento en el caudal de gas primario permite un incremento en la corriente, lo que incrementa la densidad de potencia y conlleva a un aumento de velocidad con menor conicidad en la ranura de corte. El exceso de caudal de gas puede provocar que no se forme el arco de plasma, así como también dañar la tobera debido a la turbulencia.
- **Distancia entre boquilla de la torcha y pieza de trabajo:** Dada la forma columnar que presenta el flujo de plasma, existe un margen de espacio entre la boquilla de la torcha

y la pieza de trabajo. Un corte de mejor calidad se obtiene a partir de una distancia corta, dado que la divergencia es menor y la intensidad térmica del arco mayor. Aún así, una distancia excesivamente corta puede promover un arco eléctrico deficiente debido a la acumulación de escoria en la tobera. Cuando la distancia se hace mayor, aumenta la divergencia del haz, lo cual provoca ranuras de corte mayores y pérdida de intensidad térmica. Esto demanda un mayor consumo de potencia.

- **Velocidad de corte:** Para un determinado espesor de material, se tendrá un rango de velocidades de corte, especialmente para materiales de pequeño espesor. Los requerimientos de potencia aumentan con el incremento de la velocidad, dado que se remueve más material en un período de tiempo menor. El tamaño de la tobera también tiene que incrementarse para acompañar el incremento de potencia. El incremento de la velocidad de corte sin aumentar la densidad de potencia, provoca un deterioro en la calidad del corte, además de resaltar el efecto de la conicidad en las paredes de la ranura de corte.

La variación en la intensidad térmica y la velocidad del gas a través del diámetro del arco es el causante del ángulo de corte en las superficies cortadas. El centro del arco es la zona más intensa, mientras que la intensidad térmica y la velocidad del gas disminuyen hacia el borde exterior del diámetro del arco. Un aumento en la velocidad de avance tiende a enfriar el borde exterior de la llama y a desviar la trayectoria del arco ([Drozda, 1983](#)).

### **2.1.3 Ventajas y desventajas**

La reacción de oxidación exotérmica del acero en el flujo de plasma mejora el proceso permitiendo un aumento en la velocidad de corte, lo que conlleva a su vez una zona afectada por calor más angosta y una disminución de la distorsión. Sumado a esto, en la parte inferior de la ranura de corte, no suele presentarse escoria, y en caso de presentarse, puede ser removida con facilidad. El ángulo del borde que queda a la derecha del sentido de corte, es generalmente menor a  $1^\circ$ . Estas características se pueden visualizar en la Figura 3.2.

El recorrido del corte puede realizarse tanto de manera manual, mediante una torcha manipulada por un operador, o bien, utilizando una torcha que es dirigida por un control numérico. Cuando se requiere rapidez de producción y una precisión mayor, el control numérico tiene un rendimiento mucho mejor sobre las variables tales como velocidad de

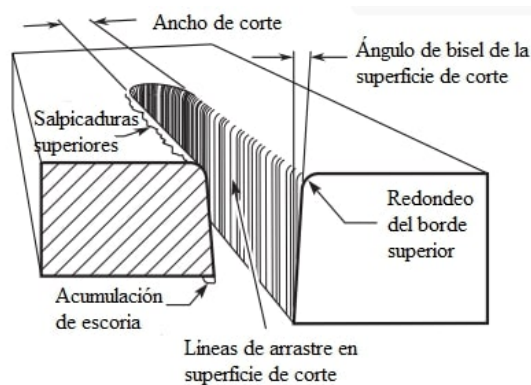


Figura 3.2. Características y calidad del corte por plasma. (Corporation, 2012)

avance y la distancia entre la pieza y la torcha. Este método de corte permite cortar, en la mayoría de los casos, cualquier material que sea conductor eléctrico, tales como aceros al carbono, aceros inoxidables y aluminio. Por otro lado, existen dos desventajas que pueden ser una problemática para la aplicación posterior de la pieza de trabajo, las cuales son (Groover, 2020):

1. La superficie de corte resultante es rugosa y,
2. El daño metalúrgico en la zona afectada por el calor es considerado el más severo de todos los procesos analizados en el presente trabajo.

#### 2.1.4 Influencia sobre la microestructura

Los autores que analizaron el efecto sobre la microestructura de materiales cortados mediante plasma, observaron tres capas características (Gostimirović, 2020): La capa resolidificada, la capa superficial modificada y la capa intermedia. La capa resolidificada es una zona delgada donde se depositan residuos de material fundido sobre la superficie. La capa modificada consiste en la transformación de la microestructura ferrita - perlita en martensita, y la capa intermedia muestra la transición gradual de la capa modificada hasta el metal base.

En cada caso, el número de zonas y su espesor, la estructura y la composición de fases, dependen principalmente del tipo de acero y del ciclo térmico del corte (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

Según los ensayos realizados por distintos autores en aceros estructurales, la ZAC generada por el corte por plasma resulta ser muy pequeña en comparación con otros procesos de corte térmico con menores densidades de energía, como es el caso de oxicorte.

No sucede lo mismo cuando se lo compara con corte por láser, dónde el espesor de ZAC de este último resulta ser menor. Respecto a la profundidad afectada que genera el corte por plasma, se destaca el hecho de que la misma se mantiene casi constante a lo largo del espesor del material, característica que no sucede en los otros dos métodos de corte mencionados, dónde los espesores suelen ser variables (Aldazabal, 2018).

El calor generado durante el proceso de corte produce transformaciones de fase y crecimiento de grano en la matriz microestructural del material. Para este estudio (Aldazabal, 2018), se pudo observar por debajo del borde de corte agujas de martensita y bainita, seguido de ferrita poligonal a una profundidad mayor, luego el crecimiento de grano y por último la matriz perlítica o granos de ferrita poligonal aun más grande. Como última microestructura, el metal base no afectado por el corte.

Por supuesto el cambio microestructural tendrá un efecto significativo en la dureza del material en el borde de corte. Los resultados obtenidos mediante ensayos de dureza pueden ayudar a determinar con mayor precisión la profundidad que presenta la ZAC en el material (Aldazabal, 2018).

### **2.1.5 Influencia sobre las propiedades mecánicas**

La bibliografía reportada por diferentes autores, muestran que la rugosidad de la superficie de corte obtenida mediante el plasma, para materiales con espesores de 15 mm, tiende a ser la más pequeña comparada a otros métodos de corte térmicos tales como oxicorte o corte por láser. Éste parámetro (rugosidad) no permite explicar en su totalidad el comportamiento a la fatiga de probetas cortadas con los diferentes cortes térmicos, dado que el corte por plasma suele tener una performance intermedia entre probetas realizadas con corte por laser (presentan el límite de fatiga mayor) y probetas obtenidas mediante oxicorte (tienden a presentar el peor comportamiento ante cargas cíclicas) (Cicero, 2016).

Los cortes por plasma exhiben puntos de iniciación tanto en los bordes superiores como inferiores de la superficie de corte (Ver Figura 3.2), y también suelen presentar algunas fisuras longitudinales sobre las probetas, asociadas a pequeñas proyecciones del material que ocurren durante el proceso de corte (Cicero, 2016).

Otros autores estudiaron el efecto del corte por plasma en chapas de aceros al carbono de 15 mm de espesor, y realizaron mediciones de las tensiones residuales de compresión que se generan en el borde de corte, debido al gradiente de enfriamiento que se tienen. Estos valores medidos en la superficie del material, se encontraban en el orden del límite

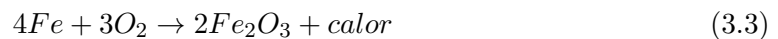
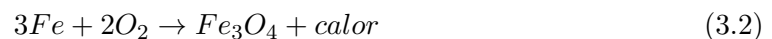
elástico del mismo, lo cual puede desempeñar un papel importante en el comportamiento a la fatiga de la pieza, cómo puede ser retrasando el inicio de las grietas y, por lo tanto, aumentando la vida útil por fatiga (Aldazabal, 2018).

Por otro lado, Lipiänen et al. analizaron el efecto de corte por plasma sin eliminar la rebaba, y eliminando la rebaba. Los autores realizaron ensayos de fatiga en aceros de alta resistencia y evaluaron las superficies de fractura resultantes. Encontraron que la propagación de las fisuras se dió en el área con rebabas, mientras que para el caso dónde se rectificó el exceso de material, la propagación de la fisura se desarrolló en un defecto del borde de corte y, aún así, pudo observar una mejora en la vida a la fatiga del material del 6.3 %.

## 2.2 Corte con oxígeno y gas combustible

### 2.2.1 Principio de funcionamiento

El corte con oxígeno y gas combustible, también llamado oxicorte, utiliza un gas combustible combinado con oxígeno para producir una flama, que será la fuente de calor necesaria para aumentar la temperatura del material hasta su temperatura de autoignición, con el fin de retirar una zona delgada de una chapa o lámina metálica. El material se remueve por la reacción química exotérmica entre el oxígeno (O) y el hierro (Fe) del material a cortar, dónde las reacciones químicas básicas que se presentan son:



La reacción 3.2 es la que genera mayor cantidad de calor, y permite alcanzar temperaturas de casi 870°C. Esta temperatura, no resulta ser lo suficientemente elevada como para remover material, por tal motivo, se requiere que la pieza se precaliente con gas combustible primero, y luego se introduzca el oxígeno a través de una boquilla, tal y como se muestra en la Figura 3.3. La temperatura de precalentamiento dependerá del contenido de carbono del acero (Kalpakjian y Schmid, 2020).

El fenómeno que genera el corte es principalmente oxidación, aunque también ocurren fenómenos de fusión. El proceso permite realizar cortes con espesores máximos de 300 mm.



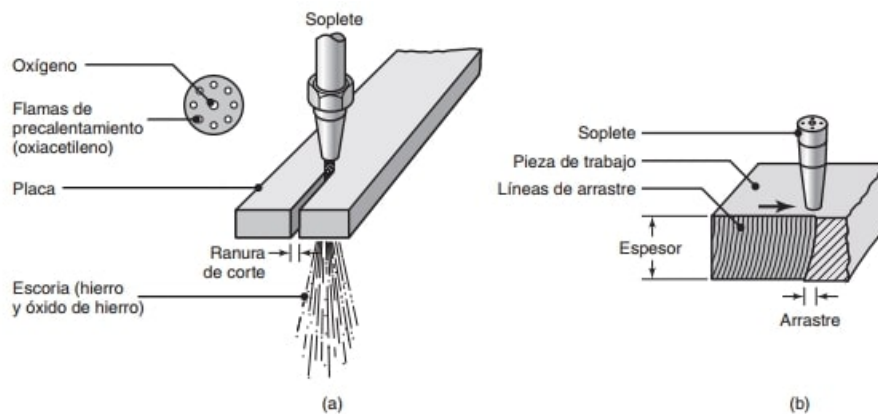


Figura 3.3. (a) Corte por flama de una placa de acero con soplete de acetileno. (b) Sección transversal del corte de la placa, dónde se pueden ver las líneas de arrastre (Kalpakjian y Schmid, 2020)

### 2.2.2 Parámetros que se controlan

Las variables a controlar, dependiendo del espesor y la calidad requerida en el material, serán: el caudal y la presión del gas, la velocidad del corte y la distancia entre la boquilla de la torcha y la pieza de trabajo. A su vez, existen diferentes tipos de gases que pueden ser utilizados, entre los más comunes se pueden encontrar (Groover, 2020): acetileno ( $C_2H_2$ ), MAPP (metilacetileno-propadieno -  $C_3H_4$ ), propileno ( $C_3H_6$ ) y propano ( $C_3H_8$ ). Las temperaturas de llama y los calores de combustión para estos combustibles se pueden ver en la Tabla 3.1.

Combustible	Temperatura		Calor de combustión	
	°C	°F	MJ/m <sup>3</sup>	Btu/ft <sup>3</sup>
Acetileno ( $C_2H_2$ )	3 087	5 589	54.8	1 470
MAPP <sup>a</sup> ( $C_3H_4$ )	2 927	5 301	91.7	2 460
Hidrógeno ( $H_2$ )	2 660	4 820	12.1	325
Propileno- ( $C_3H_6$ )	2 900	5 250	89.4	2 400
Propano ( $C_3H_8$ )	2 526	4 579	93.1	2 498
Gas natural	2 538	4 600	37.3	1 000

Tabla 3.1. Gases usados en el oxicorte, con temperaturas de flama y calores de combustión. (Groover, 2020)

El acetileno presenta la temperatura de llama más elevada, y suele ser el gas más utilizado para este método de corte. Como desventaja, hay ciertos riesgos con el almacenamiento y manejo del acetileno que deben ser considerados.

### 2.2.3 Ventajas y desventajas

A medida que se realiza el avance del soplete, la flama va dejando líneas de arrastre sobre la superficie cortada, lo cual indica una alta rugosidad por parte del proceso, incluso mayor que la que se presentaría en un aserrado (Figura 3.3). Como gran inconveniente de este método, que además es un factor común con el método de corte por plasma, es la distribución no uniforme de temperaturas, que puede generar grandes problemas con la microestructura y las propiedades mecánicas del material próximas a la ranura (Kalpakjian y Schmid, 2020).

El proceso de oxicorte se lleva a cabo tanto de forma manual como automatizado. La operación manual de la torcha se utiliza para trabajos de reparación, corte de metal desechado, recortes de mazarotas en moldes de arena y operaciones similares que generalmente requieren una precisión mínima, y permiten realizar trabajos en campo. Para trabajos de mayor producción, el corte por llama automatizado permite velocidades más rápidas con una mayor precisión. A menudo, este equipo está controlado numéricamente para permitir el corte de formas perfiladas (Groover, 2020).

Este método de corte es únicamente aplicable a materiales ferrosos, dada las reacciones químicas que se generan.

### 2.2.4 Influencia sobre la microestructura

La evidencia científica respecto al impacto térmico que tiene el oxicorte respecto a la microestructura y la variación de dureza de distintos aceros, no difiere en gran medida de lo que se obtiene cuando se realiza un corte por plasma.

De acuerdo con autores que estudiaron las características de agrietamiento y falla de aceros de gran espesor, cortados mediante corte por llama, la ZAC generada por oxicorte está formada por 3 regiones (Jokiah, 2020): una región con fase martensita, una región de dos fases (transición) y la región de microestructura original. Estas tres regiones microestructurales también determinan el perfil de dureza del borde del corte. La dureza es mayor en la región de martensita recién formada, y disminuye en la región de dos fases a medida que la martensita se mezcla con la estructura original. La menor dureza se produce justo después de la región de dos fases y luego la dureza aumenta gradualmente hasta llegar al metal base. El porcentaje de estructura martensítica y bainítica dentro de la ZAC, dependerá de las diferentes condiciones de enfriamiento que presenten las piezas

a causa del espesor y el contenido de carbono de las mismas.

Según otros autores que realizaron experimentación con este tipo de corte en aceros al carbono de baja aleación, pudieron observar, además de las 3 regiones mencionadas anteriormente, un área estrecha de metal sobrecalentado. La presencia de esta zona, se puede explicar mediante la reacción de carburización (incremento del contenido de carbono) del borde de corte luego del ciclo térmico. El incremento del contenido de carbono en el acero, en un determinado rango, conlleva a la disminución de los puntos críticos del acero (Ac1 y Ac3), y puede contribuir al incremento del tamaño de grano austenítico ([Tingaev y Gubaydulin, 2016](#)).

### 2.2.5 Influencia sobre las propiedades mecánicas

Este método de corte causa tensiones residuales elevadas en el borde de corte del material, que surgen a partir de restricciones dimensionales en la estructura de manera localizada dentro del mismo. Estos esfuerzos se pueden dividir en dos tipos ([Jokiaho, 2020](#)):

- Térmicos: se originan a partir de los diferentes ciclos de calentamiento y enfriamiento que experimenta la superficie y el interior del acero.
- Tensiones de transformación: las cuales surgen a partir de transformaciones microestructurales, que vienen acompañadas de cambios volumétricos.

Las tensiones de compresión se producen en la zona martensítica, en la proximidad del borde de corte, y debido a que las tensiones residuales deben estar en equilibrio, se desarrolla a continuación de dicha región, una zona con tensiones residuales de tracción en la zona templada. La magnitud de estos esfuerzos va a depender de los parámetros de corte utilizados, la microestructura que presente el material, las dimensiones de la chapa y la tensión de fluencia.

La superficie que se genera con este método de corte, presenta una rugosidad significativa además de que suele contener una gran cantidad de adherencia de escoria en la parte inferior del borde de corte. Esto provoca que, en la mayoría de los casos, la resistencia a la fatiga y la performance en general a la fatiga, es decir, por encima de la vida límite, tiendan a ser menor que otros métodos de cortes térmicos ([Garcia, 2015](#)).

En aceros, suele ser muy significativa la disminución de la vida límite de fatiga, la cual se puede explicar bajo la idea de que estos cortes tienen la iniciación de la fisura en la parte

inferior de la ranura de corte, donde la superficie de escoria actúa como un concentrador de tensión.

## 2.3 Maquinado por descarga eléctrica con alambre

### 2.3.1 Principio de funcionamiento

El método de corte por hilo, o WEDM (del inglés *Wire Electrical Discharge Machining*) es una variación del maquinado por descarga eléctrica o electroerosión convencional, el cual consiste en la erosión de los metales mediante descargas por chispas. Cuando dos elementos conductores de la electricidad se tocan, se produce un arco eléctrico, que erosionará una pequeña porción de las piezas en los puntos de contacto.

El conjunto requerido para la operación de un electroerosionado con alambre consiste en (Ver Figura 3.4) (Kalpakjian y Schmid, 2020):

- Alambre con guías y carrete (electrodo).
- Pieza de trabajo conectada a una fuente de potencia de corriente continua.
- Fluido dieléctrico (no conductor), en la zona de corte.

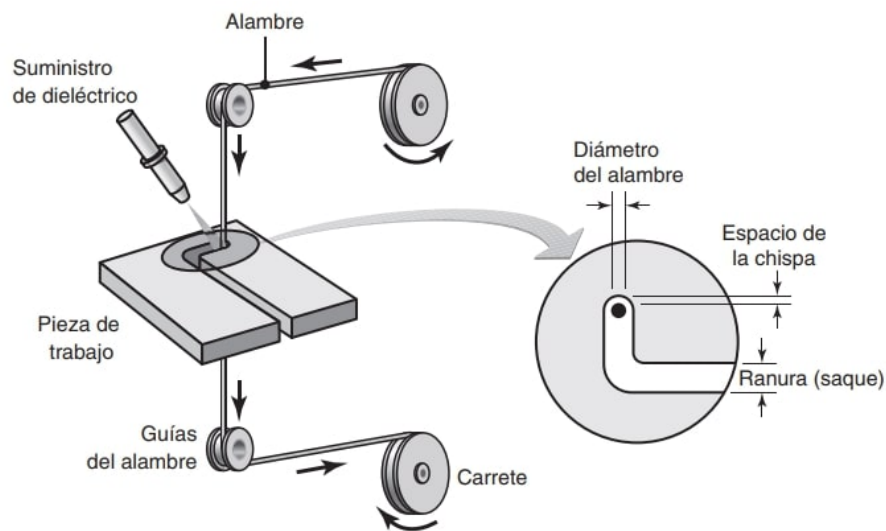


Figura 3.4. Esquema del proceso de electroerosión por alambre (Kalpakjian y Schmid, 2020)

El objetivo consiste en aumentar la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo, al punto en el cual el dieléctrico se vence, generando así una descarga

eléctrica mediante una chispa transitoria a través del fluido, y así retirar una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza.

El proceso comprende un movimiento lento, que se desplaza a lo largo de una trayectoria prescrita, cortando la pieza de trabajo, tal como muestra la Figura 3.4. Permite cortar placas de hasta 300 mm de espesor, y suele utilizarse en la fabricación de punzones, prototipos de manufactura, herramientas para tornos y moldes, insertos especiales, entre otras aplicaciones (Drozda, 1983)

### 2.3.2 Parámetros que se controlan

El proceso de corte por hilo está controlado por varios parámetros tales como la potencia, el tipo de fluido, el tipo de alambre del electrodo, y la velocidad de corte, entre otros. Estos parámetros se describen a continuación (Drozda, 1983):

- Potencia: Se suele utilizar corriente eléctrica de hasta 32 A, y el voltaje puede variar entre 55 y 60 V.
- Fluidos dieléctricos: El más utilizado es agua desionizada. El agua fluye de mejor manera que otros dieléctricos por las pequeñas ranuras que genera el hilo al cortar, además de brindar una buena refrigeración. Algunas máquinas permiten sumergir la pieza de trabajo en el fluido para mejor control de los cambios térmicos. En algunos casos, se utiliza aceite como dieléctrico.
- Alambre del electrodo: Generalmente se usa bronce, cobre, tungsteno o molibdeno como electrodo. Los diámetros del mismo suelen ir hasta 0,3mm, y el mismo puede variar según se requiera operación de desbaste o acabado.
- Velocidad de corte: Este parámetro dependerá de manera directa del tipo y espesor del material, el diámetro del alambre, y en menor grado, del *flushing* (*capacidad de remoción de partículas erosionadas*).

Otros parámetros a considerar en el corte por hilo que han sido estudiados por diferentes autores, involucran lo relacionado a la intensidad de la chispa. Estas variables son: la duración del pulso, el intervalo entre pulsos, y en menor medida, la tensión mecánica del cable. Estas tres variables tendrán una gran influencia en la cantidad de material removido, la calidad de la superficie de corte, y también en la vida útil que pueda presentar el cable (Pramanik, 2018). Como tendencia general, una duración de pulso mayor genera

una ranura de corte mayor y una superficie más rugosa, debida a la mayor tasa de remoción de material, mientras que un intervalo entre pulsos corto también promueve la mayor eliminación de material. Respecto a la tensión del cable, un aumento de la variable no afecta a la eliminación de material, pero una tensión mecánica baja presentará mayores vibraciones y el borde de corte perderá calidad.

### 2.3.3 Ventajas y desventajas

La electroerosión con alambre se puede asemejar a un corte con sierra caladora, pero por supuesto con una precisión mucho mayor. Además, la ranura que se genera es de menor dimensión, lo que permite hacer esquinas más agudas. Se utiliza cuando se quiere realizar cortes en materiales conductores los cuales son difíciles de maquinar mediante un método de corte convencional. Durante este proceso, no se presenta contacto mecánico entre el electrodo y la pieza de trabajo, las cuales están separadas por un gap, también llamado *overcut*, por lo que no hay cargas mecánicas en la pieza de trabajo. El material se erosiona favorecido por la alta temperatura que se genera en el pequeño huelgo que existe entre el electrodo y el ánodo.

Las consecuencias que presenta el proceso resultan ser muy diversas respecto a las de un maquinado tradicional. La operación de corte por hilo contribuye a efectos no deseados en las propiedades de la superficie, dado que la pieza de trabajo se funde o vaporiza con las altas temperaturas que se generan (Najm, 2018).

Debido al equipamiento necesario que requiere este proceso, el mismo no presenta la posibilidad de realizar trabajos en campo como en los casos del corte por plasma u oxicorte. Además, los tiempos de producción resultan ser mucho mayores, dado que se requiere mayor tiempo de montaje de la pieza, sumado a que la velocidad de alambre no puede ser muy elevada, ya que puede provocar la rotura del mismo.

### 2.3.4 Influencia sobre la microestructura

Se presentan diferentes cambios metalúrgicos superficial o subsuperficial debido a la generación de calor que ocurre en el proceso. Se pueden visualizar 3 capas en un sentido normal a la superficie de corte (Pramanik, 2019):

- La primera capa de la superficie de corte son los residuos restantes de material y electrodo fundido, los cuales vuelven a solidificar en la superficie.

- La segunda capa es la capa refundida, también llamada capa blanca, en dónde se deposita y se vuelve a solidificar el propio material fundido de la pieza de trabajo, sobre la superficie.
- La tercera capa es la zona afectada por calor, en dónde la microestructura de esta capa no cambia de manera abrupta, dado que esta zona experimenta el menor flujo de calor y no pasa por un proceso de fusión.

La Figura 3.5 muestra los 3 tipos de capas de superficie creados por el corte por hilo. La profundidad que presente la misma será una variación, mayormente, de la corriente y del tiempo de pulso del alambre (Najm, 2018):

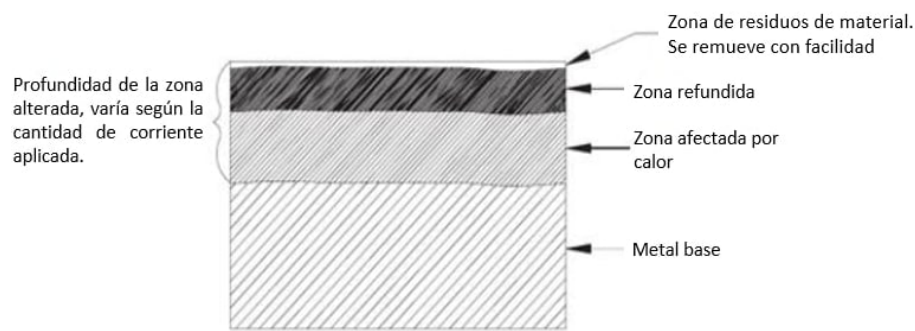


Figura 3.5. Esquema de las capas creadas por corte por hilo (Najm, 2018).

La integridad de la superficie de la pieza de trabajo, se evalúa mediante la correlación que se presenta entre los efectos de los cambios en la superficie y las alteraciones producidas luego del maquinado, contra un rango de propiedades mecánicas y características microestructurales, tales como la micro dureza, la microestructura, los esfuerzos residuales y la performance ante la fatiga, entre otros (Pramanik, 2019).

La evidencia científica disponible sobre el efecto de la variación de parámetros de corte en el proceso de electroerosión con alambre sobre aceros inoxidables duplex, explica que las chispas se generan en puntos discretos y el aumento de temperatura ocurre localizadamente. Sumado a ello, el flujo continuo del dieléctrico elimina el calor y los residuos mecanizados, lo cual no permite mantener la temperatura de mecanizado durante períodos de tiempo largos. Esto conlleva a que no sea posible cambiar la microestructura debajo de la capa refundida (Pramanik, 2018).

### 2.3.5 Influencia sobre las propiedades mecánicas

Una incorrecta selección de los parámetros de corte conduce a irregularidades (cráteres, poros, etc.) sobre la superficie de la pieza de trabajo, y por debajo de la misma y también, tensiones residuales de tracción inducidas por la temperatura o fisuras (Trauth, 2016). En las últimas décadas, la bibliografía relacionada con el efecto del corte por hilo en las propiedades mecánicas de los materiales, se centra principalmente en aleaciones no ferrosas como las aleaciones de titanio, aluminio o superaleaciones de base níquel.

En función de esto, autores han encontrado tensiones residuales de tracción de hasta 200 MPa luego de una operación de acabado, y de hasta 600 MPa luego de una operación de desbaste en superaleaciones de base níquel. Esto, por supuesto, trae apareada una reducción en la vida de fatiga bajo cargas cíclicas (Antar, 2012).

Otros autores que evaluaron la vida a la fatiga de aleaciones de titanio, demostraron que, en general, el rendimiento del material es similar para fatiga de alto ciclo. Pero en el caso de la fatiga de bajo ciclo, una menor duración del pulso y un mayor intervalo entre pulsos de la chispa pueden prolongar la vida a la fatiga de bajo ciclo. Además, la rugosidad de la superficie se mantiene casi constante con la variación de parámetros de maquinado, y esto no contribuye en la performance a la fatiga. Tanto la naturaleza como la extensión de la capa resolidificada y la ZAC, son los contribuyentes principales que afectan a la vida a la fatiga. La zona resolidificada es frágil y contiene una cierta cantidad de microfisuras, que disminuyen o eliminan la etapa de nucleación de fisuras. Por otro lado, la ZAC es relativamente dúctil, lo cual retarda la propagación. (Pramanik, 2019).

## 3 Falla por fatiga

En las secciones anteriores se mencionó, de manera general, cómo los distintos cortes térmicos pueden afectar la respuesta mecánica de los materiales, medida a través de parámetros como la dureza, la resistencia a la tracción, la vida a fatiga y otras características tales como la rugosidad, los esfuerzos residuales, y la alteración microestructural debido al aporte térmico localizado.

Uno de los objetivos del presente trabajo, es estudiar el efecto del método de corte en la resistencia a la fatiga, dado que es un mecanismo de daño altamente susceptible al estado superficial del componente. Por tal motivo esta sección tendrá una breve síntesis de la falla por fatiga y lo relacionado a la propagación de fisuras.



### 3.1 Generación y crecimiento de fisuras por fatiga

La fatiga describe la rotura de materiales bajo la aplicación de cargas cíclicas. El comportamiento de este fenómeno resulta ser muy complejo, y requiere de conocimiento de la Mecánica de Fractura para una correcta comprensión.

La Figura 3.6, muestra una representación de un ciclo de carga y los distintos parámetros necesarios para definirlo. Puede suceder que los ciclos de carga no sean totalmente de tracción, por lo que es necesario caracterizarlos no sólo mediante la amplitud  $\sigma_a$ , o el rango de tensiones  $\Delta\sigma$  (o  $\Delta P$ ), sino también por algún otro parámetro que permita situar al ciclo respecto del cero de tensión (o de carga). Para ello, se utiliza el valor de tensión media,  $\sigma_m$ , o bien el parámetro R, denominado relación de carga, el cual se define de la siguiente manera (Chapetti, 2014):

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.4)$$

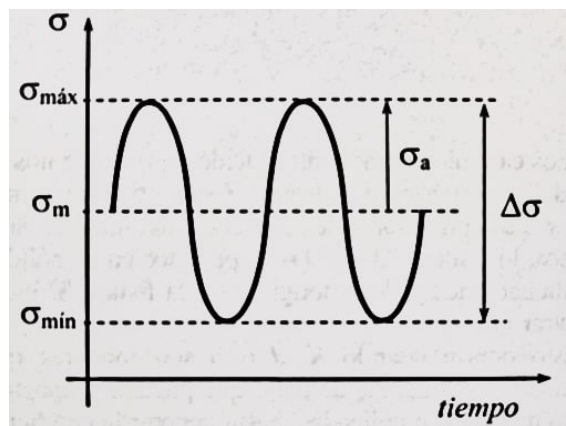


Figura 3.6. Diagrama de ciclo de carga con los respectivos parámetros (Chapetti, 2014)

La rotura por fatiga se puede dividir en 3 etapas características:

1. Iniciación de una fisura.
2. Propagación de una fisura.
3. Fractura final o inestabilidad.

El método tradicional para diseñar un componente que estará sometido a carga cíclica se basa en tensiones admisibles obtenidas de ensayos normalizados de probetas de laboratorio. Estos resultados luego se representan en la denominada curva de Wöhler (o curvas

$\sigma$ - $N$  del material), que relacionan la amplitud del ciclo de tensiones aplicado con el número de ciclos a la falla. La Figura 3.7, muestra el ejemplo de la curva de Wöhler para un acero SAE 1020, con una relación de carga de  $R = -1$ , es decir, carga alternativa de tracción y compresión.

Cada punto de la curva, representa el número de ciclos necesarios para fracturar una probeta a un determinado nivel de tensión. En algunos materiales, a medida que disminuye la tensión, se presenta una tendencia asintótica, conocida como límite de fatiga. Este se define como el valor de tensión (o carga) por debajo del cual el material experimenta una vida infinita. Existen muchos factores que pueden afectar a las propiedades de fatiga, que en consecuencia presentarán diferentes curvas características.

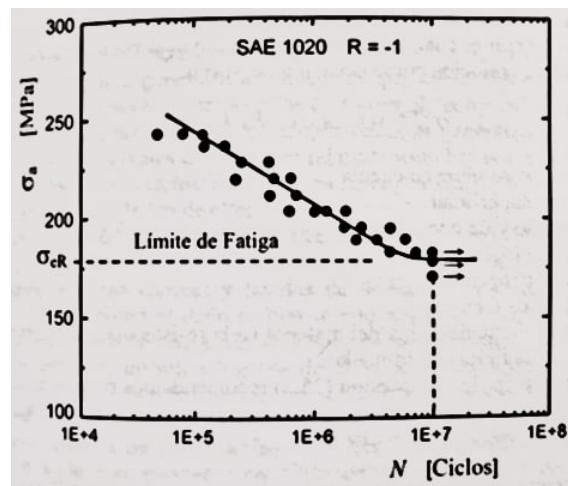


Figura 3.7. Curva de Wöhler de un acero SAE 1020 (Chapetti, 2014)

La ecuación de Marin incorpora coeficientes de correlación para considerar la influencia de diversos parámetros, como la terminación superficial, la presencia de defectos, el entorno y los concentradores de tensiones, entre otros. Estos factores son tomados en cuenta al analizar el límite de fatiga o la resistencia a la fatiga. Estos coeficientes permiten inferir la resistencia a la fatiga ( $\sigma_{eR}^{comp}$ ) a partir de la resistencia a la fatiga con la que el material fue construido ( $\sigma_{eR}$ ) (Chapetti, 2014):

$$\sigma_{eR}^{comp} = k_S k_G k_C k_T k_D \sigma_{eR} \quad (3.5)$$

Donde  $k_S$  es el coeficiente de terminación superficial,  $k_G$  el de efecto de tamaño y concentradores de tensión,  $k_C$  considera el tipo de carga,  $k_T$  tiene en cuenta la temperatura y  $k_D$  otros factores externos, como pueden ser tensiones residuales o condiciones ambientales,

como corrosión. En la literatura existen tablas en donde pueden hallarse los coeficientes mencionados.

### 3.2 Iniciación de fisuras por fatiga

A niveles de tensiones bajas, cerca del límite de fatiga y para tensiones máximas menores que la tensión de fluencia del material, la probeta estará sometida en general a un rango de tensiones elásticas, y en consecuencia, el daño cíclico recibido será más localizado en concentradores de tensión, y defectos geométricos, entre otros. El presente trabajo busca analizar cómo afectan los diferentes cortes térmicos a estos ciclos de tensión, es decir, la generación y propagación de fisuras por fatiga en los que la vida a la fatiga supera los 10.000 ciclos, también llamada, fatiga de alto ciclo ( $N > 10^3$ ) (Chapetti, 2014).

Tanto la iniciación como la propagación de fisuras por fatiga, involucran una localización de deformaciones plásticas cíclicas y bandas de deslizamientos. Para el caso de la propagación, el daño cíclico se concentra en el vértice de la fisura, mientras que para la iniciación de fisuras en un material libre de defectos, el daño se concentra en distintos lugares de la superficie cuyas configuraciones microestructurales permiten la localización de deformaciones plásticas. Es importante recordar que si bien la iniciación de fisura se produce a valores de tensión menores a la tensión o deformación de fluencia, las tensiones o deformaciones locales en la zona de iniciación son mayores, productos de los distintos fenómenos mencionados anteriormente.

La iniciación de una microfisura no es visible al ojo humano, y la cantidad de ciclos consumidos puede ser de entre 0 y el 90 % del total de los ciclos a la rotura, dependiendo del material y de la existencia o no de defectos y procesos de localización de deformaciones. Entallas y altas tensiones localizadas reducen la duración de esta etapa, mientras que tensiones residuales de compresión que se pueden dar por granallado o tratamientos termomecánicos, pueden generar un incremento apreciable en la etapa de iniciación de la fisura (Chapetti, 2014).

### 3.3 Efecto de la tensión media en la fatiga

Mucha de la información relacionada a la fatiga que existe hoy en la literatura, ha sido determinada considerando un ciclo de tensión completamente reversible, es decir,  $\sigma_m = 0$  ( $R = -1$ ). Esto no siempre sucede en la práctica ingenieril. Existen varios métodos para determinar la curva de Wöhler para situaciones en las cuales la tensión media no es igual a

cero. La Figura 3.8, muestra los métodos comúnmente utilizados para presentar este tipo de información.

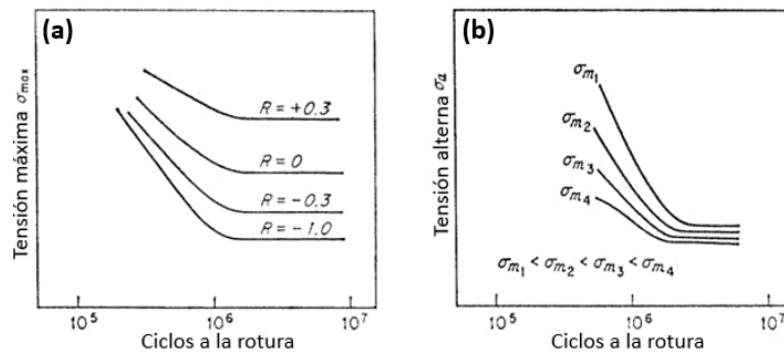


Figura 3.8. Dos métodos para representar la información de fatiga cuando la tensión media no equivale a cero. (Dieter, 1986)

En la Figura 3.8 (a), la tensión máxima está graficada en función del logaritmo de  $N$  (cantidad de ciclos a la falla), para valores constantes de la relación de carga  $R$ . Esto se logra mediante la aplicación de una serie de cargas cíclicas con disminución de la tensión máxima, y ajustando la tensión mínima en cada caso para obtener una relación que sea constante. Es importante remarcar que  $R$  se torna más positivo, lo cual es equivalente a una tensión media creciente, y el límite a fatiga medido se vuelve más elevado. La figura 3.8 (b), presenta la misma información, pero en términos de la tensión alternativa y ciclos a la rotura a valores constantes de tensión media. Se puede ver como a valores más positivos de tensión media, la tensión alternante permisible disminuye.

## 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 1 Introducción

En las siguientes secciones, se describirán brevemente las metodologías empleadas para cumplir con los objetivos planteados anteriormente. La parte experimental de este trabajo se dividió en tres etapas: una primera etapa dónde se extrajeron muestras para caracterizar los metales de partida y conocer así su historia termomecánica, una segunda etapa dónde se evaluó cómo la variación de la velocidad de corte en cada método afecta a la terminación superficial, la microestructura, la composición de fases, la profundidad y la variación de dureza en la ZAC de cada material, y por último, una tercer etapa dónde se fabricaron las probetas con dimensiones predeterminadas para evaluar la performance a la fatiga, mediante un ensayo de flexión en tres puntos.

El esquema de la Figura 4.1, muestra una síntesis de las técnicas utilizadas en cada etapa del presente trabajo.

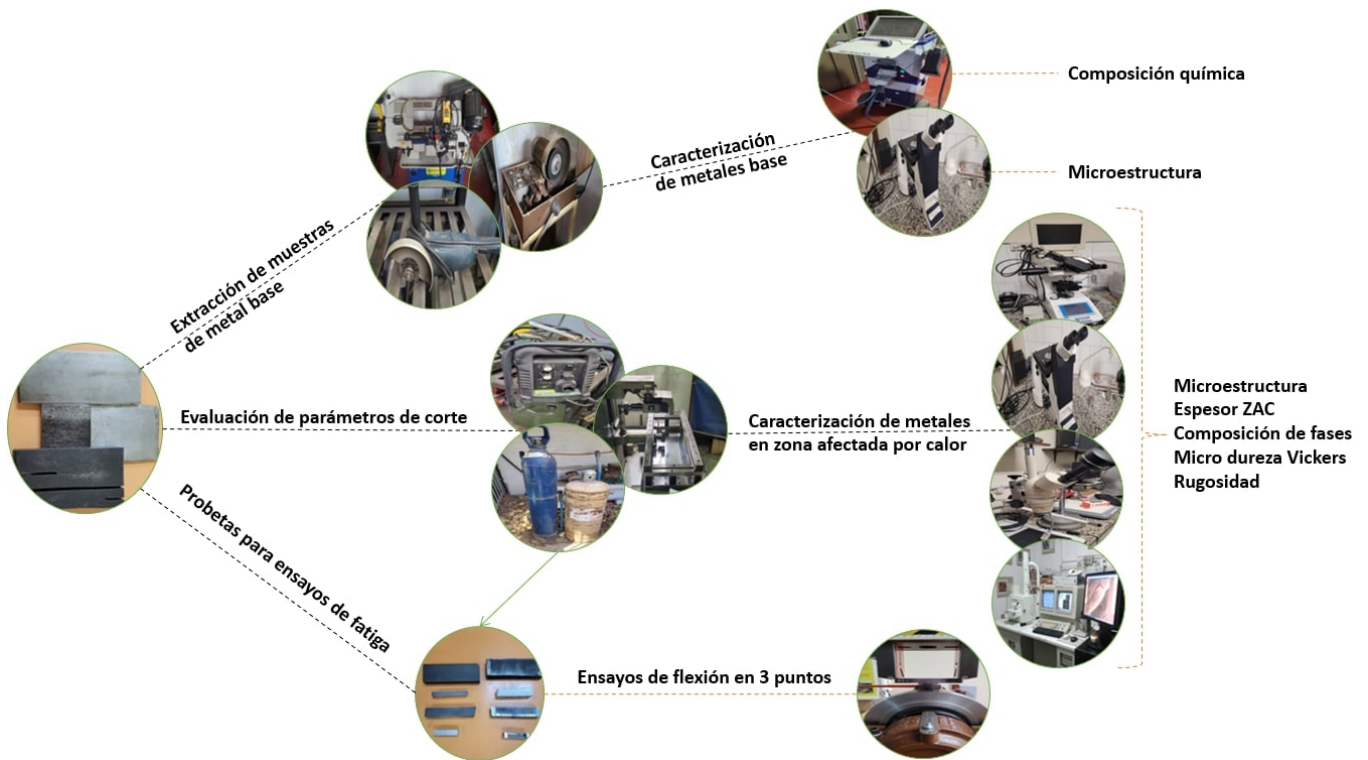


Figura 4.1. Síntesis de etapas y técnicas utilizadas en el proyecto integrador profesional.

## 2 Materiales utilizados

La denominación de los metales base utilizados, se listan en la Tabla 4.1. Estos materiales se encontraban a disposición en el Laboratorio de Metalografía y Soldadura (LMTyS) de la Facultad de Ingeniería (FaIn). En la selección de materiales, se buscó abarcar una gama de materiales que contenga: un acero de baja aleación, un acero de alta aleación, un acero inoxidable y un metal no ferroso. El espesor de las chapas estuvo restringido a los espesores disponibles en la FaIn.

Material	Denominación	Espesor de chapa
Acero inoxidable dúplex	2205	6 mm
Aluminio	Serie 1xxx	6 mm y 10 mm
Acero al carbono	ASTM A36	12,7 mm
Acero aleado	AISI 4140	25.4 mm

Tabla 4.1. Materiales utilizados para realizar cortes térmicos, con su respectivo espesor.

Para obtener la composición química de los materiales ferrosos y comparar con las que brindan las diferentes bibliografías, se realizaron ensayos con un espectrómetro de emisión

óptica por OES (del inglés, *Optical Emission Spectroscopy*) marca Oxford Instrument, modelo Foundry Master Pro. En el caso de la aleación de aluminio, se utilizó un detector de EDS (del inglés, *Energy Dispersive Spectroscopy*) para determinar la composición química de la misma, debido a que no se cuentan con los patrones para poder realizar la medición con el espectrómetro. Los porcentajes en peso de cada elemento químico, para cada material, se listan en las Tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, en conjunto con las composiciones químicas que brindan las referencias bibliográficas.

[WT %]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Por OES	0,03	0,335	1,74	0,016	0,0030	21,9	3,02	5,07
(Lippold y Kotecki, 2012)	0,03	1,00	2,00	0,03	0,02	22,00 - 23,00	2,5 - 3,5	4,5 - 6,5

Tabla 4.2. Composición química de acero inoxidable dúplex 2205.

[WT %]	Al	C	O	Fe	Si	Cu
Por EDS	87,80	9,51	2,61	0,25	-	-
(Handbook, 1990)	99,6	-	-	0,4	0,2	0,2

Tabla 4.3. Composición química de aluminio serie 1xxx.

[WT %]	C	Si	Mn	P	S	Cu
Por OES	0,119	0,143	0,776	0,0094	0,0043	0,0032
(ASTM, 2000)	0,25	0,4	-	0,04	0,05	0,2

Tabla 4.4. Composición química de acero al carbono ASTM A36.

[WT %]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Por OES	0,427	0,243	0,622	0,0137	0,008	0,933	0,179
(Handbook, 1990)	0,38- 0,43	0,15- 0,35	0,75- 1,00	0,035	0,04	0,8 - 1,1	0,15- 0,25

Tabla 4.5. Composición química de acero aleado AISI 4140.

### 3 Métodos y parámetros de corte

En primer lugar, se obtuvieron muestras de metal base a través de métodos de corte, tales como amoladora, sierra sinfin y cortadora metalográfica, para así caracterizar materiales de partida.

Por otro lado, se realizaron cortes de cada material utilizando los métodos térmicos descritos en el Capítulo 3. Luego, se modificaron las condiciones de corte con el objetivo de evaluar el efecto sobre la ZAC, para cada material y método utilizado.

Los cortes térmicos fueron realizados con las distintas máquinas que tiene a disposición la Universidad Nacional del Comahue en el LMTyS. Estas se resumen en la Tabla 4.6, y se pueden visualizar en la Figura 4.2:

Técnica	Modelo de máquina	Característica
Corte por plasma	VICTOR CutMaster 52	Manual
Oxicorte	Tubos de oxígeno y acetileno	Manual
Corte por hilo	FST-250CZT	CNC

Tabla 4.6. Máquinas a disposición en el LMTyS

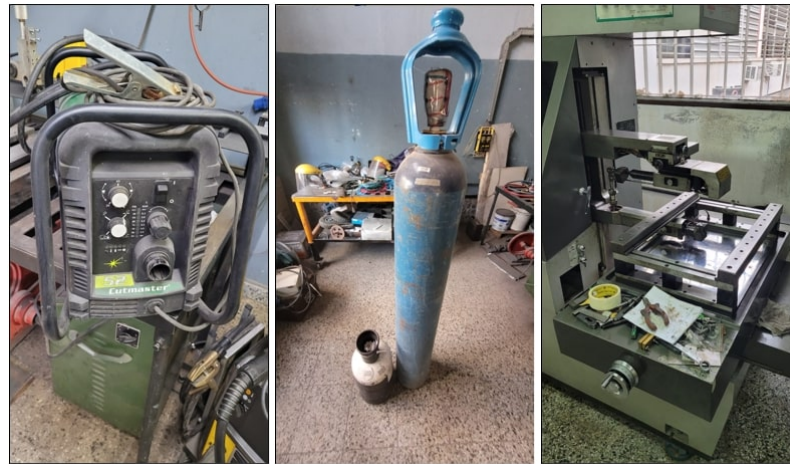


Figura 4.2. Máquinas de corte no convencional a disposición en el LMTyS.

Para poder automatizar los cortes por plasma y oxicorte, se utilizó el RAILTRAC marca ESAB modelo FW1000, también perteneciente al LMTyS (Figura 4.3). Este instrumento brinda la posibilidad de controlar la velocidad de corte de las máquinas y dar repetitividad a los ensayos.





Figura 4.3. Railtrac utilizado para automatizar los cortes por plasma y oxicorte.

### 3.1 Parámetros de corte óptimos

Con el fin de evaluar el comportamiento a fatiga de cada uno de los cortes y en cada uno de los materiales, se realizaron un total de 5 probetas utilizando los parámetros de corte óptimos. Las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 muestran los valores óptimos empleados para cada material, según el tipo de corte.

Material	Velocidad corte	Corriente	Stick out
Acero inoxidable dúplex 2205	120 cm/min	60 A	3 mm
Aluminio serie 1xxx	70 cm/min		4.8 mm
Acero ASTM A36	50 cm/min		
Acero AISI 4140	10 cm/min		

Tabla 4.7. Parámetros óptimos de corte por plasma para cada material.

Material	Velocidad corte	Corriente	Tiempo de pulsos	Intervalo entre pulsos
Acero inoxidable dúplex 2205	20 $\mu\text{m/s}$	1.5 A	20 $\mu\text{s}$	16 $\mu\text{m/s}$
Aluminio serie 1xxx				
Acero ASTM A36				
Acero AISI 4140				

Tabla 4.8. Parámetros óptimos de corte por hilo para cada material.

Material	Velocidad corte	Presión del oxígeno	Presión del gas
Acero ASTM A36	35 cm/min	5 kg/cm <sup>2</sup>	0.3 kg/cm <sup>2</sup>
Acero AISI 4140	30 cm/min		

Tabla 4.9. Parámetros óptimos de oxicorte para cada material.

Sobre la Tabla 4.8, se observa que los parámetros óptimos de corte por hilo para aluminio, son iguales que para aceros de baja aleación, alta aleación e inoxidable. Esto es poco probable que se cumpla en la realidad, por lo que resulta ser una simplificación tomada dada las limitaciones operativas de la máquina de corte por hilo que presenta la FaIn.

## 4 Preparación metalográfica

Para la preparación metalográfica, las muestras se incluyeron en resina acrílica y luego se procedió a su preparación. El mismo procedimiento, el cual se detalla a continuación, se aplicó a todos los tipos de materiales (ASTM, 2011a):

1. Inclusión de las piezas y agregado de mezcla de resina con endurecedor, en proporciones de 75 % y 25 % de cada componente, respectivamente.
2. Desbaste mecánico con lijas de granulometría 80, 120, 240, 400, 600, 1200 y 1500, hasta eliminar todas las imperfecciones.
3. Limpieza de probetas con alcohol y ultrasonido.
4. Pulido mecánico con el uso de pasta diamantada, OPS (del inglés *Oxide Polishing Suspensions*), alcohol etílico y detergente hasta obtener una superficie espejo.
5. Ataque químico por inmersión en reactivo.

Dada la diferencia en composiciones químicas entre los materiales seleccionados, fue necesario identificar qué ataque químico era conveniente para revelar la microestructura presente en cada material. La Tabla 4.10, muestra un resumen del ataque químico utilizado en cada muestra, junto con la composición química de la solución empleada y el tiempo de inmersión.

MUESTRA	SOLUCIÓN	TIEMPO
Acero inoxidable duplex	Beraha's: 100ml de $H_2O$ , 20ml de HCl y 0,7gr de $K_2S_2O_5$	3 seg.
Aleación de aluminio	Keller: 50ml de $H_2O$ , 25 ml de $HNO_3$ , 15 ml de HCl y 10ml de HF	10 seg.
Acero al carbono	Alcohol etílico y 2% de $HNO_3$	4 seg.
Acero aleado	Alcohol etílico y 4% de $HNO_3$	3 seg.

Tabla 4.10. Resumen reactivos y tiempos de inmersión para revelar la microestructura de los metales ([Internacional, 2004c](#)).

## 5 Técnicas de caracterización

### 5.1 Inspección visual y macrografía

Para realizar la inspección visual de las superficies de corte, se utilizó una cámara digital marca MSHOT modelo MSx1.

La inspección visual permitió definir, dentro del rango de velocidades utilizadas, el valor óptimo desde el punto de vista del estado superficial de la muestra. Se tomaron macrografías con diferentes magnificaciones para poder visualizar la terminación superficial que presentaba cada tipo de corte térmico.

### 5.2 Microscopía óptica

La observación de las microestructuras de las muestras se realizó en una primera instancia con microscopía óptica utilizando un equipo marca LEICA modelo DMI 3000M, para obtener imágenes digitales en los aumentos x50, x100, x200 y x500.

Además, se tomaron 5 mediciones diferentes a lo largo del borde de corte, para determinar el espesor aproximado que presenta la ZAC. Luego estas mediciones fueron promediadas para correlacionar la influencia de la velocidad de corte sobre la profundidad de la ZAC. Cabe remarcar que el espesor de la ZAC se analizó en la dirección del espesor de la chapa, en forma transversal a la dirección de corte. Se seleccionó una sección representativa de la trayectoria, tal como se puede observar en la Figura 4.4.

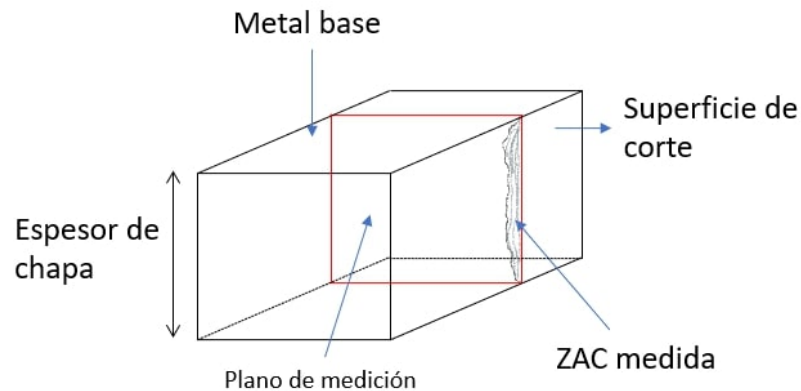


Figura 4.4. Esquema simplificado de la medición de espesor de ZAC considerado.

### 5.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Con el objetivo de observar las fases con mayor detalle y obtener información sobre la composición química de los materiales y las fases identificadas, en algunas de las muestras, se realizó un análisis de composición química semi-cuantitativa con un detector EDS. Debido a que dicha técnica no arroja valores cuantitativos, las mediciones pueden utilizarse con fines comparativos entre las distintas regiones pero no deben tomarse como valores absolutos de composición química. Para visualizar la composición de las fases se realizaron análisis puntuales, mientras que para observar gradientes a través de las capas se seleccionaron análisis lineales. La distribución espacial de los elementos se analizó mediante mapeos elementales. El equipo utilizado fue microscopio Zeiss, perteneciente a la Universidad Nacional de Río Negro.

## 6 Propiedades mecánicas

### 6.1 Medición de dureza

La microdureza de las muestras se midió utilizando un microdurómetro digital marca FUTURE-TECH modelo FM.700. En el caso de los materiales base se realizó un patrón de barrido en forma de cruz y en el caso de las muestras afectadas por el corte térmico, se realizó un barrido lineal. Se ensayaron durezas con 0.5 kgf de carga para los materiales ferrosos y 0.1 kgf de carga para el caso del aluminio, siempre en una dirección perpendicular al borde de corte afectado, para evaluar cómo varía la dureza en la profundidad de la ZAC, considerando una distancia mínima respecto al borde de corte de 0.05mm. La cantidad de improntas efectuadas se definió hasta alcanzar, en cada caso, valores de dureza similares

a los del metal base.

## 6.2 Ensayos de fatiga

### 6.2.1 Selección del método de ensayo y dimensionamiento de las probetas

Considerando que las probetas que se obtendrán de los distintos cortes térmicos, luego serán ensayados en una máquina de fatiga, se realizó una investigación en distintas fuentes bibliográficas. Se observó que las probetas que se utilizan para realizar estos ensayos con los distintos cortes convencionales, son probetas de tracción (Lipiäinen, 2021; Cicero, 2016; Garcia, 2015). Las normas relacionadas con ensayos de fatiga también reflejan lo antedicho. Entre ellas, se destacan: ASTM E466 - 96, ASTM E739 - 91, DIN 50113:1982-03 e ISO 1143:2010, entre otras. Esto resulta ser una restricción para los cortes por plasma y oxicorte, ya que no pueden alcanzar las tolerancias que exigen tales normas. Aún en el presente caso, en donde se podría prescindir de tales tolerancias a los efectos de comparar el comportamiento a fatiga de los distintos cortes, existe otra limitante relacionada con la automatización del plasma y oxicorte mediante el RAILTRAC. Este equipamiento no permite la generación de una probeta tipo hueso, como normalmente se utiliza en este tipo de estudios.

Debido a ello, y considerando que en el laboratorio de ensayos mecánicos de la FaIn se dispone de una máquina rotativa de flexión en tres puntos, se decidió utilizar este ensayo para comparar los cortes. La máquina opera a desplazamiento constante, mediante la regulación de un excéntrico. Asimismo, presenta un diseño rígido que limita el tamaño de probeta a utilizar. En función de ello, las dimensiones de las probetas se basaron principalmente en la configuración de la máquina.

Fue importante definir un criterio común a todas las probetas, de modo tal que los distintos ensayos tengan un punto de comparación. Tomando como dimensión predominante el espesor ( $t$ ) de la chapa, se optó por estandarizar el ancho ( $w$ ) que presentarán la probeta, el cual será de 15 mm. Este criterio se consideró, con la idea de que las chapas más finas no sean muy esbeltas durante el ensayo, y que las chapas gruesas no resulten en tensiones elevadas para desplazamientos bajos del excéntrico. Sumado a esto, la fisura que se presente durante cada ensayo, deberá recorrer una distancia mínima de 15 mm hasta fracturar la pieza. Los tamaños de probetas de flexión vistos en diferentes bibliografías, como por ejemplo la norma ASTM D790 - 2017, presenta valores similares a los obtenidos bajo este criterio.

La Figura 4.5, muestra un esquema simplificado de las dimensiones mencionadas, indicando el borde afectado térmicamente.

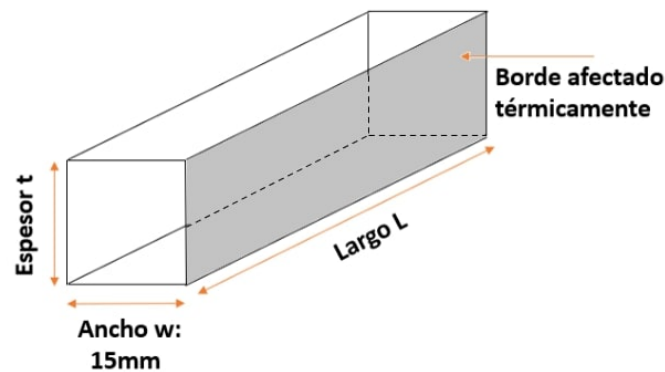


Figura 4.5. Esquema simplificado de las dimensiones de las probetas para ensayos de flexión en 3 puntos.

Teniendo definidos el espesor y el ancho, el procedimiento de cálculo consiste en determinar la tensión máxima de la viga en flexión, considerando una viga simplemente apoyada con una carga en el centro, como se aprecia en la Figura 4.6. A partir del desplazamiento máximo del excéntrico y de las cargas máximas de la máquina, se puede determinar la longitud de cada probeta, con la finalidad de poder alcanzar los distintos valores de la curva S – N de Wöhler para cada material.

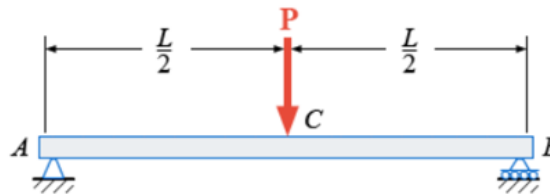


Figura 4.6. Esquema de viga simplemente apoyada bajo una carga axial concentrada en el centro.

Las ecuaciones utilizadas para definir cada parámetro, se encuentran en el Anexo I (A).

La Tabla 4.11 presenta un resumen de las dimensiones definidas para cada material, en conjunto con el desplazamiento máximo permisible, considerando que la flexión en 3 puntos se debe realizar dentro del límite elástico de cada material, es decir, la tensión máxima admisible deberá ser menor que la tensión de fluencia del material de partida.

	<b>Dúplex 2205</b>	<b>Al Serie 1xxx (chapa fina)</b>	<b>Al Serie 1xxx (chapa gruesa)</b>	<b>ASTM A36</b>	<b>AISI 4140</b>
Espesor t [mm]	6,8	6	10	12,7	25,4
Ancho w [mm]	15	15	15	15	15
Largo L [mm]	55	60	75	115	135
Tensión de fluencia $\sigma_y$ [MPa]	450	35	35	250	655
Resistencia última a la tracción $\sigma_{UTS}$ [MPa]	620	90	90	550	1020
Límite de fatiga $S_e$ [MPa]	310	N/A	N/A	275	510
Desplazamiento máx. $\delta_{max}$ [mm]	0,08	1	1	0,18	0,65

Tabla 4.11. Resumen de las dimensiones de cada probeta para cada material

### 6.2.2 Funcionamiento de la máquina rotativa

La Tabla 4.12, muestra las características que presenta la máquina de flexión en tres puntos a disposición, las cuales fueron de utilidad para el cálculo dimensional de las probetas.

<b>Características</b>	<b>Pre - fisuradora 1997</b>
Excentricidad [mm]	0 a 1
Carga máxima [kN]	50
Frecuencia [Hz]	20 a 50
SPAN mínimo [mm]	60
Precisión excéntrico [mm]	0,05

Tabla 4.12. Características de la máquina de fatiga del laboratorio de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería

Por otro lado, en la Figura 4.7 se puede visualizar la máquina rotativa, tanto la parte frontal como la lateral, en dónde se indican con flechas los componentes principales de la misma.

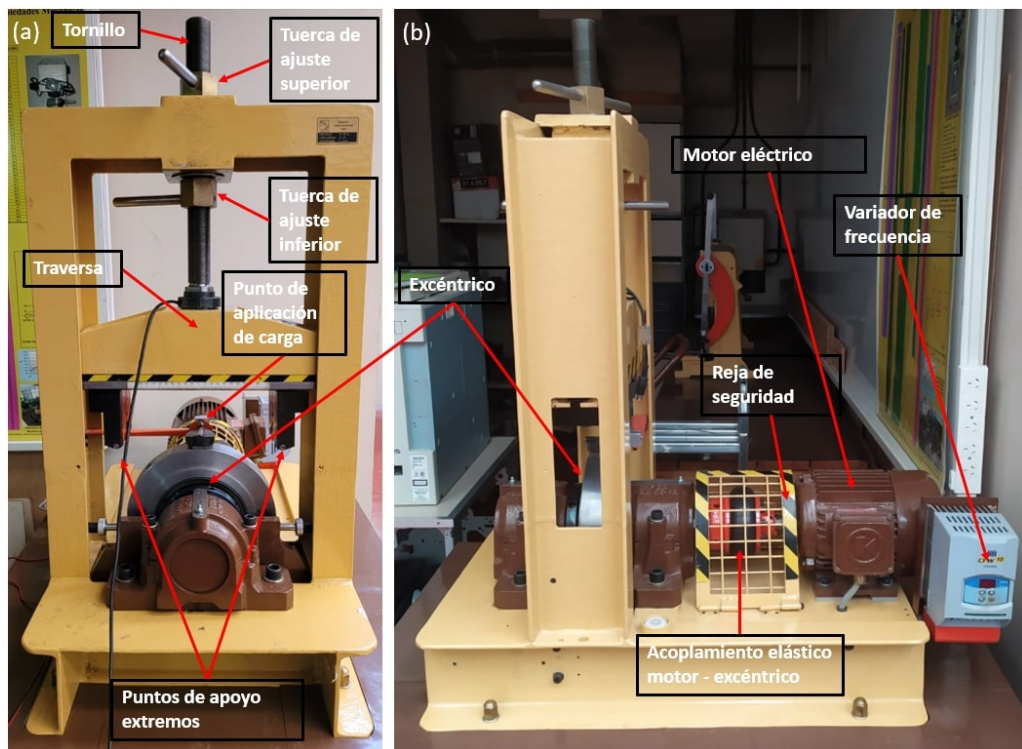


Figura 4.7. Máquina rotativa de flexión en tres puntos a disposición en el laboratorio de ensayos mecánicos de la FaIn.(a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

Para llevar a cabo un ensayo de fatiga por flexión sobre la máquina rotativa, en primer lugar se debe regular el excéntrico que brinda el desplazamiento constante a la probeta mediante el motor eléctrico. Luego se ajusta el SPAN de la máquina (distancia entre apoyos), según el largo de probeta a ensayar, a través de los dos puntos de apoyos extremos indicados en la Figura 4.7 (a). Esto, en conjunto con el punto de apoyo intermedio, serán los 3 puntos de apoyo a utilizar para ensayar la probeta.

Mediante la regulación de las tuercas de ajuste superior e inferior (Ver Figura 4.7 (a)), se brinda el movimiento lineal del tornillo que proporcina la elevación o el descenso de la travesa, la cual será la que fije la probeta a ensayar sobre los puntos de apoyo extremos.

Luego de que la probeta fue montada y sujeta a través del propio peso de la travesa, se realiza la precarga de la misma mediante la tuerca de ajuste inferior. Esta tuerca de ajuste permite afirmar la probeta y evitar que se desajuste luego de varios ciclos de ensayo.

A los fines de verificar la precarga a la cual se sometió la probeta, durante el montaje se utilizó un comparador externo con precisión de  $1 \mu\text{m}$ , situado sobre la parte superior de la travesa, de modo tal de medir cuanto se desplaza hacia abajo.

Por último, mediante el variador de frecuencia y el motor eléctrico indicados en la



Figura 4.7 (b), se comienza el ensayo, seteando el variador a la frecuencia deseada.

Es importante destacar que la máquina se encontraba en desuso hace varios años, lo cual hizo necesario el control de su funcionamiento. Además, el diseño original de la máquina rotativa contempla ensayos de prefisuración en probetas entalladas, como puede ser el caso de una probeta de Charpy - V.

La selección de esta máquina rotativa se basó, además de lo ya mencionado en la subsección 6.2.1, en la frecuencia de ensayo que permite desarrollar, la cual es mucho mayor a la máquina servohidráulicas disponible en la Fain (30 Hz vs 5 Hz, aproximadamente). Esto resulta ser muy conveniente dada la necesidad de realizar un número elevado de ensayos en el período de duración del PIP.

### 6.2.3 Corrección de puntos de apoyo en probetas

Las probetas realizadas mediante corte por plasma y oxicorte, fueron corregidas en 3 puntos de apoyos: dos extremos y el centro, que luego se situaron en los puntos de apoyos indicados en la Figura 4.7 (a). Esto se debe a que dada la irregularidad en la superficie resultante que brindan estos tipos de corte (y en el caso del PAC, también la conicidad del corte), no permite obtener puntos de apoyo rectos y paralelos para realizar el ensayo de flexión. La Figura 4.8 muestra dos probetas cortadas con plasma, luego de ser corregidas. Cabe remarcar la importancia de mantener el paralelismo en estas caras mecanizadas, a los fines de generar un buena apoyo de los rodillos de la máquina.

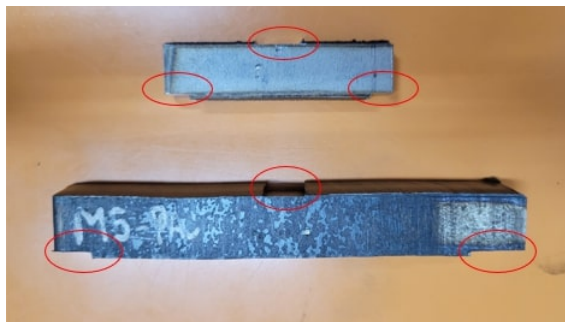


Figura 4.8. Probetas de acero inoxidable dúplex (arriba) y acero A36 (abajo), cortadas con plasma y corregidas en los puntos de apoyo.

La corrección de las probetas se realizó con la fresadora marca FURNALANETTO, modelo Venier FU - 2, la cual se muestra en la Figura 4.9. En cuanto a las herramientas de corte, se utilizaron fresas de acero rápido y metal duro de 10mm y 12.5mm, respectivamente, con 4 dientes, utilizando las velocidades recomendadas en la bibliografía ([Casillas](#),

1997).



Figura 4.9. Fresadora universal Venier FU-2.

Para el caso del acero aleado AISI 4140, se optó por realizar la corrección mediante electroerosión por hilo (Ver Figura 4.2). Si bien esté método lleva más tiempo que un mecanizado convencional como el fresado, dada la alta dureza que se presentó en el borde de corte de este material a causa de los cambios microestructurales, resultó ser más conveniente utilizar un método no convencional cuyo único requisito es que el material sea conductor eléctrico. Además, dado que la máquina de corte por hilo está automatizada mediante control numérico, se obtiene mucha mayor precisión y paralelismo entre las caras.

#### 6.2.4 Strain gage y LVDT

Con el objetivo de verificar el funcionamiento de la máquina de fatiga y configurar el sistema, se realizaron ensayos con tres probetas de dimensiones presentadas en la Tabla 4.13, a las cuales se les rectificó uno de sus lados para poder adherir galgas extensométricas sobre esta cara. De este modo, las variaciones del excéntrico generan deformaciones diferentes que se traducen en tensiones máximas en el borde instrumentado. Ello permitirá contrastar con los resultados teóricos de una viga simplemente apoyada bajo cargas de flexión en 3 puntos. En la Tabla 4.13 se muestran las dimensiones de las probetas, mientras que en la Figura 4.10 se observan las probetas con las galgas extensométricas ya adheridas.

	Largo L	Ancho w	Espesor t
Probeta 1	130 mm	15 mm	12,7 mm
Probeta 2	90 mm	21 mm	10 mm
Probeta 3	55 mm	15 mm	14 mm

Tabla 4.13. Dimensiones de probetas para ensayar el funcionamiento de la máquina de fatiga.

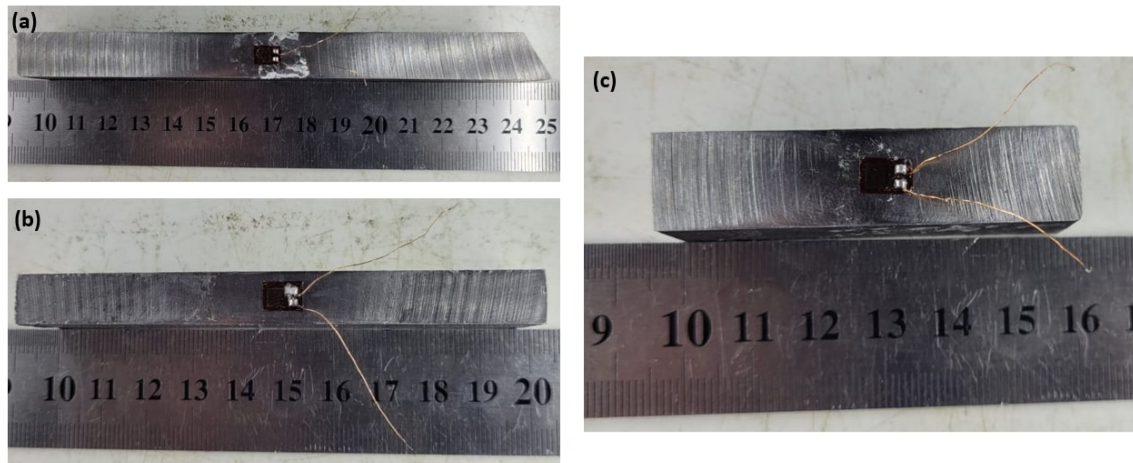


Figura 4.10. Dimensiones utilizadas para probetas con strain gage adherido. (a) Probeta 1; (b) Probeta 2; (c) Probeta 3.

En la Figura 4.11 se visualiza el montaje de la probeta 1 sobre la máquina de fatiga con el cableado eléctrico correspondiente realizado.

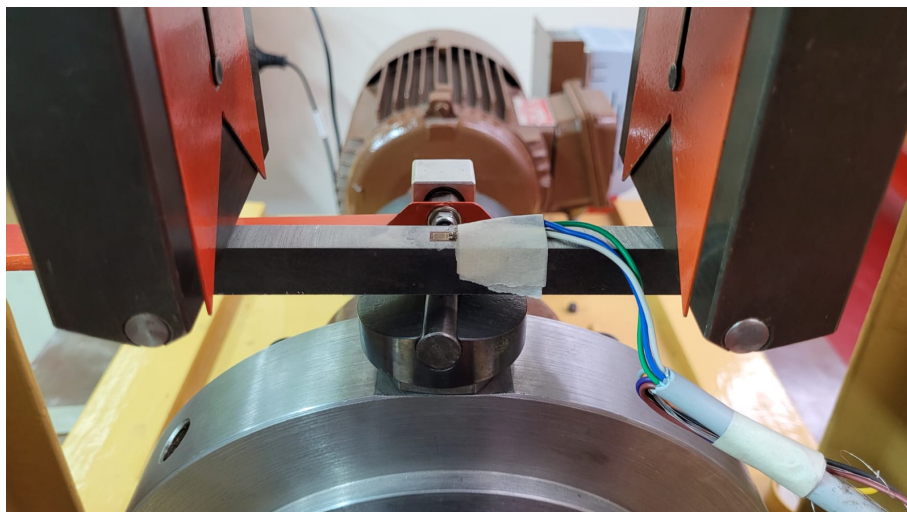


Figura 4.11. Montaje de probeta 1 con conexión eléctrica realizado sobre máquina de fatiga.

A su vez, para verificar que la excentricidad que brinda la máquina es correcta, se realizaron mediciones mediante un LVDT (del inglés, *linear variable differential transformer*), el cual es un transductor de desplazamiento lineal variable que permite corroborar que el desplazamiento que se indica en la escala del excéntrico es correcta.

En la figura 4.12 se muestra el montaje de este instrumento sobre la máquina, junto con la escala que presenta la máquina para el desplazamiento del excéntrico.

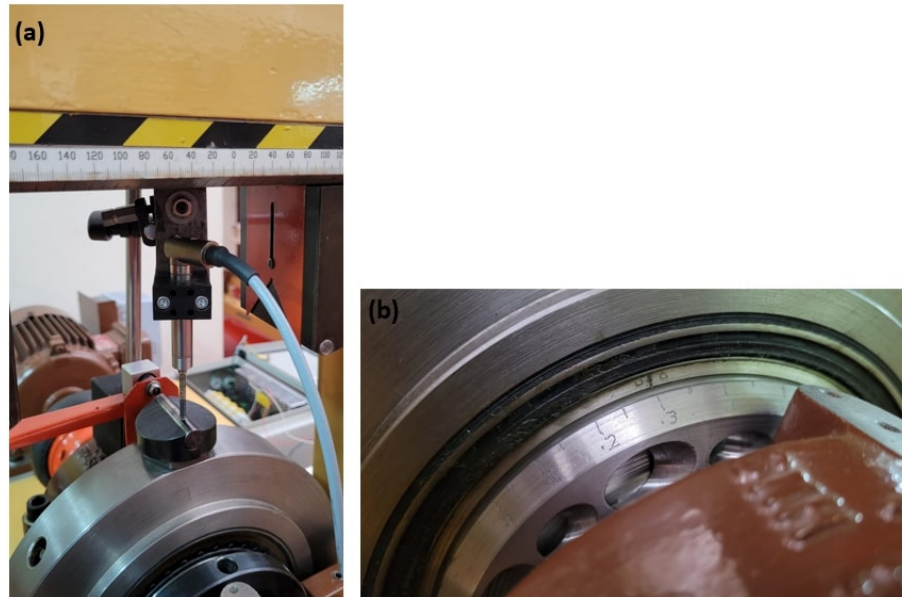


Figura 4.12. (a) Montaje del LVDT en máquina de fatiga para medición de desplazamiento; (b) Escala de desplazamiento de excéntrico de máquina de fatiga

### 6.2.5 Ensayos de flexión en 3 puntos

Finalmente, el ensayo de flexión en tres puntos se realizó con el fin de examinar el comportamiento a la vida de fatiga de los distintos materiales ante los efectos que brindan los cortes térmicos sobre el borde de corte. Se utilizó la máquina cuyas características se mencionaron en la Tabla 4.12, y que se muestra en la Figura 4.7.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Este capítulo, consta de 3 secciones:

1. Caracterización de los materiales de partida;
2. Evaluación de los parámetros de corte, donde se estudia el efecto térmico de cada método de corte sobre el borde seccionado de cada material y;
3. Ensayo de flexión en 3 puntos, dónde se estudia la relación entre la variación geométrica, microestructural y la performance a la fatiga.

### 1 Caracterización de los materiales de partida

En las subsecciones siguientes, se mostrarán las microestructuras obtenidas a partir de cortes longitudinales y/o transversales al sentido de laminación de cada material, previo a ser afectado térmicamente por el corte, para poder inferir los efectos del aumento local de temperaturas durante el corte.

#### 1.1 Acero inoxidable dúplex

La Figura 5.1, representa la microestructura obtenida a través de un corte transversal del acero DSS (del inglés, *Duplex Stainless Steel*), en aumento de x500.

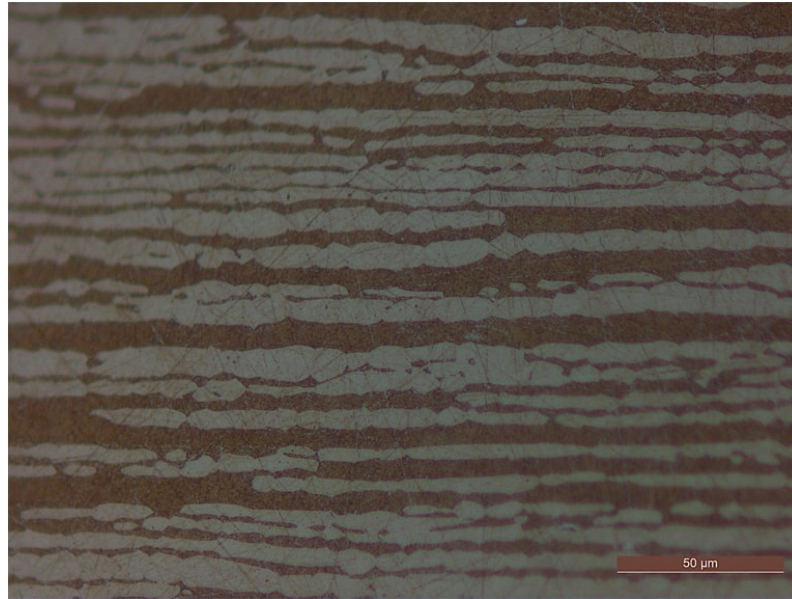


Figura 5.1. Microestructura transversal de acero inoxidable dúplex 2205, en aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's.

De la figura anterior, se observa una microestructura dúplex de ferrita (fase color marrón) y granos elongados de austenita (fase blanca), típica en un material de éstas características. Además, se puede observar los diferentes bordes de grano que se presentan en la fase ferrita ([Lippold y Kotecki, 2012](#)).

## 1.2 Aleación de aluminio

A partir de la Figura 5.2, se puede visualizar la microestructura alcanzada a través de un corte transversal en la aleación de aluminio, con una magnificación de x500

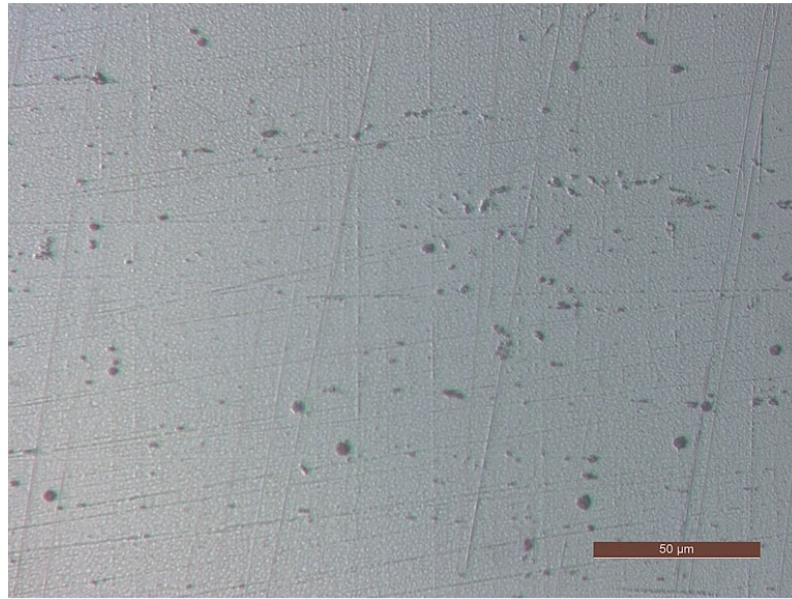


Figura 5.2. Microestructura transversal de aleación de Aluminio serie 1xxx, en aumento de x500. Ataque químico: Keller.

En la Figura anterior, se muestra una microestructura esperada para una aleación de aluminio de la serie 1xxx, la cual son aluminios de alta pureza ( $>99\%$  Al) que no presentan ningún tipo de aleantes. Por tal motivo, para este tipo de aleaciones se espera una matriz de Al.

### 1.3 Acero al carbono

En la Figura 5.3, se muestra la microestructura del acero al carbono, en un corte transversal, con aumento de x500.

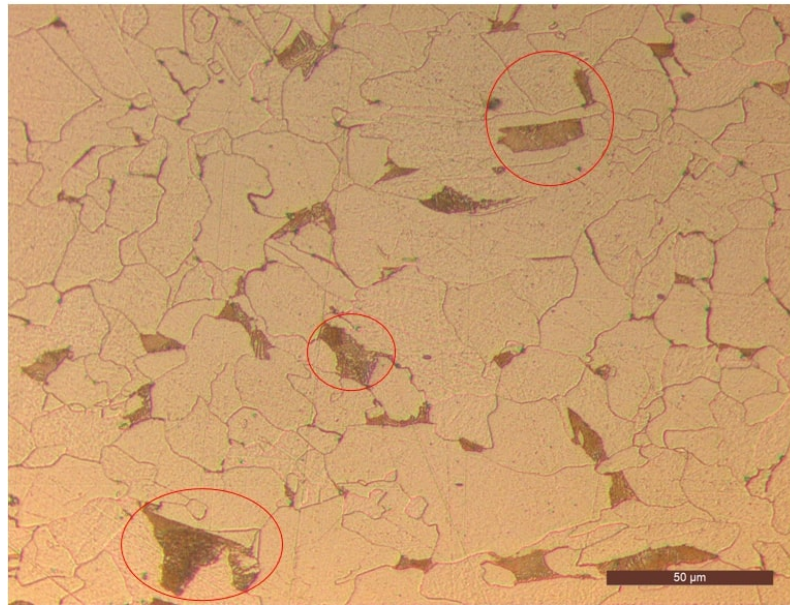


Figura 5.3. Microestructura transversal de acero ASTM A36. Ataque químico: Nital al 2 %

De acuerdo con la metalografía anterior, se puede observar la microestructura típica de un acero hipo – eutectoide, la cual consiste en ferrita (fase clara) y perlita (fase oscura) indicadas con círculos color rojo sobre la Figura 5.3 ([Callister Jr y Rethwisch, 2018](#)).

#### 1.4 Acero aleado

La Figura 5.4, representa la microestructura del acero aleado en una magnificación de x200, sobre la cual se observa que la microestructura se encuentra alargada en el sentido de laminación del proceso de conformado.



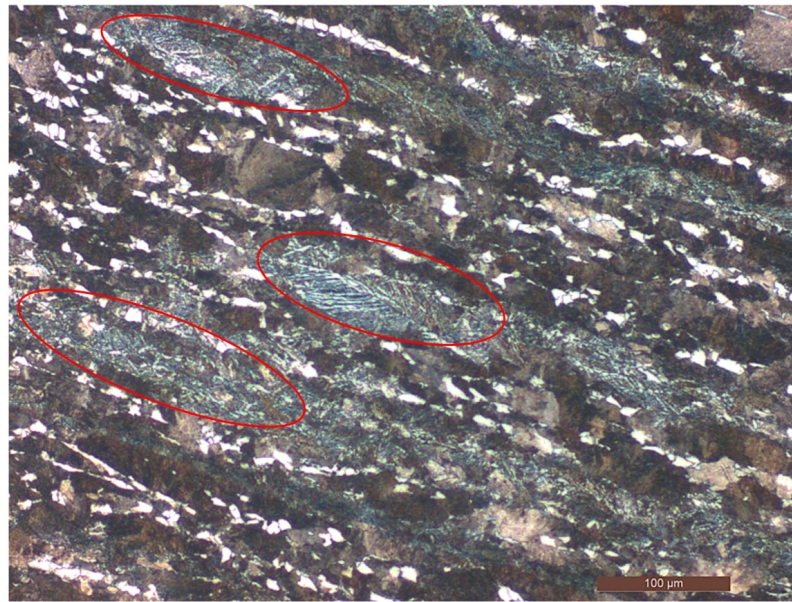


Figura 5.4. Microestructura longitudinal de acero AISI/SAE 4140, en aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%.

Sobre la Figura 5.4, se puede visualizar una microestructura de ferrita + perlita, dónde las regiones blancas representan la ferrita y las regiones oscuras, la perlita. Este tipo de microestructuras es el resultado esperado cuando se realiza un tratamiento térmico de normalizado sobre un material con esta cantidad y tipo de aleantes, dónde se busca obtener perlita fina (Yilmaz y Kesti, 2020).

Por otro lado, en la misma figura se indica en óvalos color rojo, algunas zonas heterogéneas observadas en la chapa, probablemente como consecuencia de microsegregación.

## 2 Evaluación de parámetros de corte

Se realizaron cortes con 3 o 5 velocidades de avance diferentes, para cada método. Las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, resumen las diferentes velocidades de corte utilizadas para cada material. A partir de esto, y mediante la inspección visual de la terminación superficial obtenida en cada muestra, se determinó la velocidad de corte óptima con la que luego se realizaron las probetas para el ensayo de flexión. Anteriormente, en las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9, se resumieron las velocidades óptimas seleccionadas, en conjunto con otros parámetros característicos de cada corte.

<b>Materiales</b>	<b>Velocidades de corte evaluadas en PAC</b>				
DSS	120 cm/min	140 cm/min	150 cm/min		
Aluminio	70 cm/min	80 cm/min	90 cm/min		
ASTM A36	40 cm/min	45 cm/min	50 cm/min	60 cm/min	70 cm/min
AISI 4140	10 cm/min	15 cm/min	20 cm/min		

Tabla 5.1. Velocidades de corte evaluadas en PAC.

<b>Materiales</b>	<b>Velocidades de corte evaluadas en OXICORTE</b>		
ASTM A36	30 cm/min	35 cm/min	40 cm/min
AISI 4140	25 cm/min	30 cm/min	35 cm/min

Tabla 5.2. Velocidades de corte evaluadas en OXICORTE.

<b>Materiales</b>	<b>Velocidades de corte evaluadas en WEDM</b>		
DSS	20 $\mu\text{m/s}$	30 $\mu\text{m/s}$	40 $\mu\text{m/s}$
Aluminio			
ASTM A36			
AISI 4140			

Tabla 5.3. Velocidades de corte evaluadas en WEDM.

Las diferentes velocidades de corte utilizadas, dependen de la capacidad que posee cada máquina para poder realizar efectivamente el corte. En el caso del corte por plasma, velocidades de corte muy bajas pueden provocar que no se forme adecuadamente el arco eléctrico, así cómo también una cantidad excesiva de escoria sobre el material, mientras que velocidades de corte muy elevadas, pueden provocar que la penetración sobre el material sea ineficiente (Corporation, 2012). En el caso de oxicorte, velocidades de corte elevadas provocan que la parte inferior del corte reaccione químicamente más lento, provocando que la cara de corte se curve por detrás de la torcha (Internacional, 2004b). Por último, para el corte por hilo, las velocidades de corte están limitadas por la posibilidad de rotura del hilo.

## 2.1 Inspección visual y macrografía

A continuación, se presentan las macrografías obtenidas de los estados superficiales resultantes en cada material luego de cada corte térmico. A partir de estas figuras, se puede analizar con mayor detalle el tipo de superficie que deja cada método no convencional: arrastre del jet de plasma o de la llama oxidante en PAC y oxicorte, respectivamente, y las marcas del hilo de Mo en WEDM. La finalidad de la inspección visual fue definir

la velocidad que brinda el mejor estado superficial sobre cada material. Debe destacarse que este análisis no reemplaza la medición directa de rugosidad mediante un rugosímetro, aunque puede considerarse una primera aproximación del estudio de la rugosidad.

### 2.1.1 Corte por plasma

Las terminaciones superficiales obtenidas para los materiales en estudio, según cada velocidad de corte utilizada en el corte por plasma, se presentan en las Figuras 5.5 (a) - (c), 5.6 (a) - (c), 5.7 (a) - (e) y 5.8 (a) - (c), para acero DSS, aleación de aluminio, ASTM A36 y AISI 4140, respectivamente.

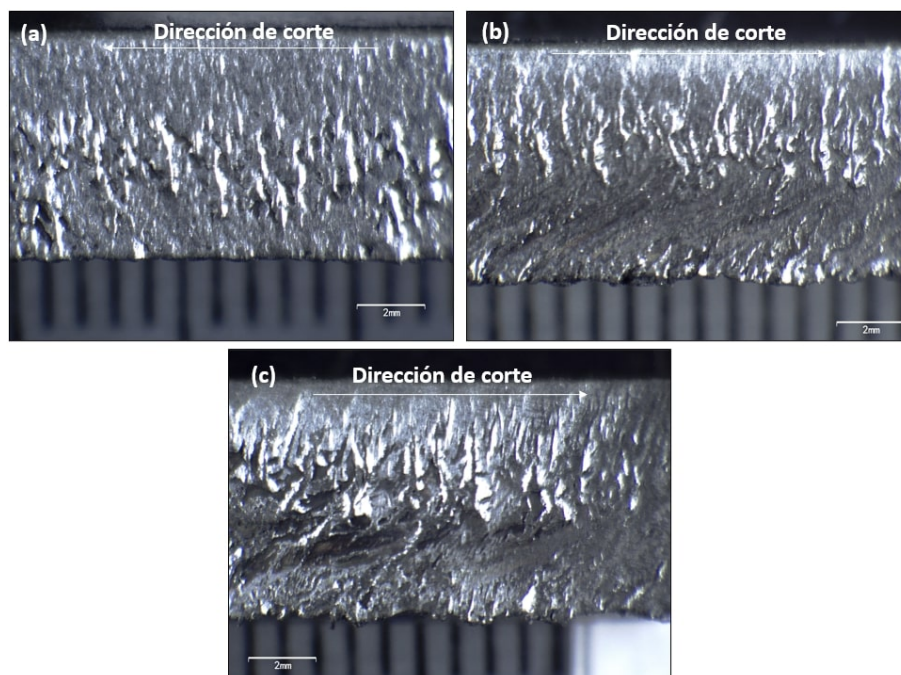


Figura 5.5. Terminación superficial obtenida en acero DSS para velocidades de corte por plasma de: (a) 120 cm/min, (b) 140 cm/min y (c) 150 cm/min.

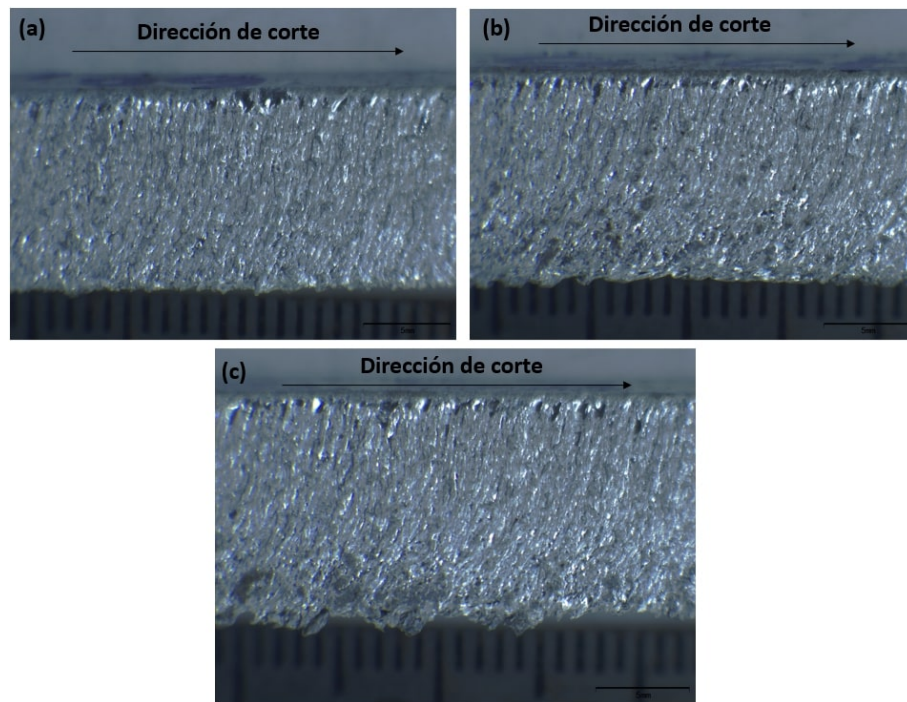


Figura 5.6. Terminación superficial obtenida en aleación de Aluminio para velocidades de corte por plasma de: (a) 70 cm/min. (b) 80 cm/min y (c) 90 cm/min.

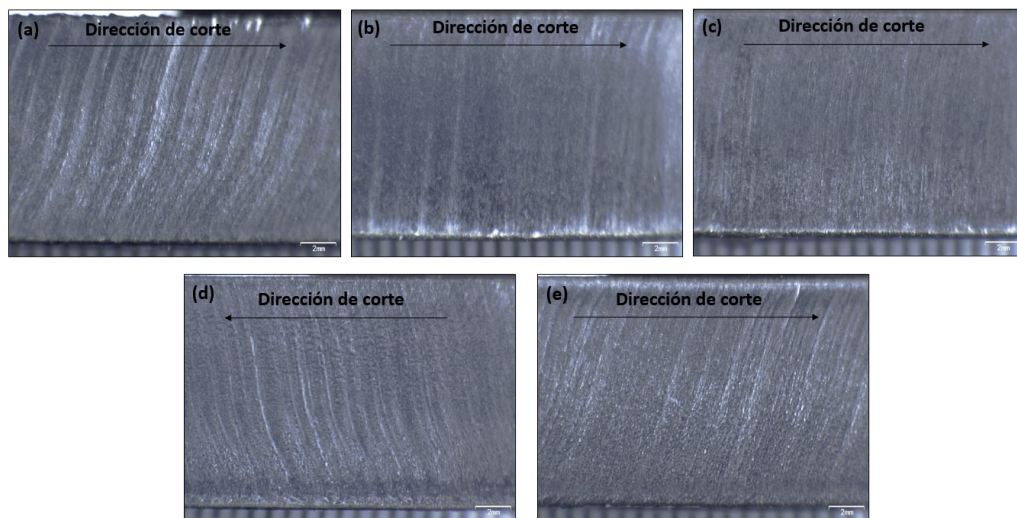


Figura 5.7. Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de corte por plasma de: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min, (d) 60 cm/min y (e) 70 cm/min.

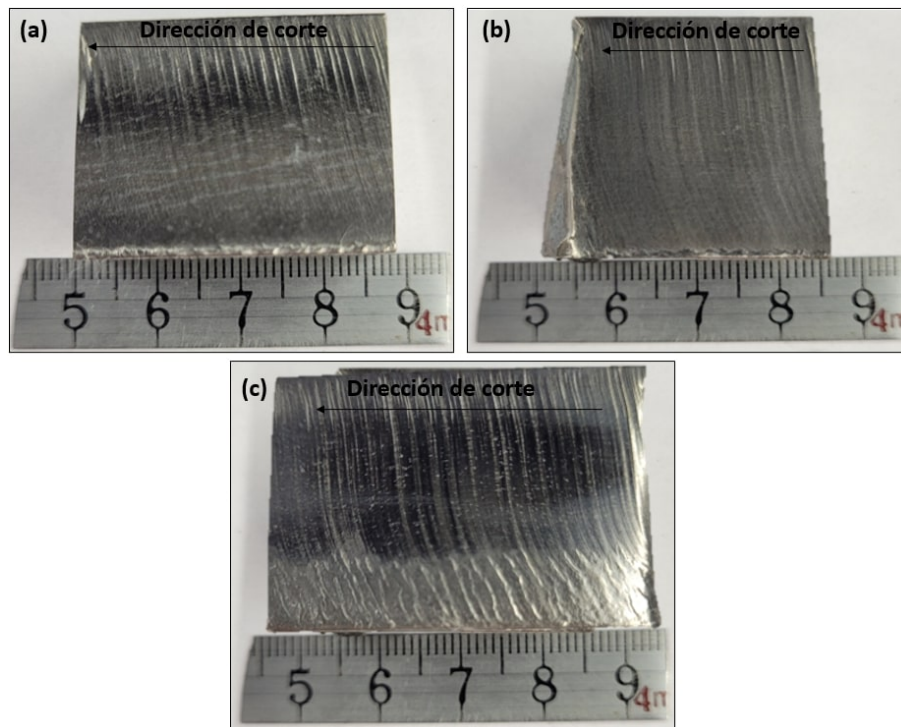


Figura 5.8. Terminación superficial obtenida en acero 4140 para velocidades de corte por plasma de: (a) 10 cm/min, (b) 15 cm/min y (c) 20 cm/min.

En la Figura 5.5 (a), se observa un patrón de líneas paralelas respecto a la dirección del chorro de plasma. A pesar de ello, es notoria la alta rugosidad de la superficie cortada, posiblemente por cuestiones relacionadas con la conductividad eléctrica del material, y la dificultad que presenta el material para romper con la capa de cromo (Lippold y Kotecki, 2012). En las Figuras 5.5 (b) y (c), se ve con mayor claridad como la velocidad de corte empieza a influir en la calidad del corte. Aproximadamente a la mitad del espesor de la chapa, las líneas de arrastre comienzan a desviarse hacia atrás con una inclinación muy pronunciada.

Para el caso de la aleación de aluminio, se observó una superficie resultante muy rugosa, con una clara inclinación de las líneas de arrastre. En la Figura 5.6 (a), se visualiza que la inclinación de las líneas de arrastre aumenta con la velocidad de corte, como se puede apreciar en las Figuras 5.6 (b) y (c).

En los materiales ferrosos, Figuras 5.7 (a) - (e) y 5.8 (a) - (c), las superficies obtenidas resultaron ser las típicas que se esperarían en este método de corte. La topografía de la superficie en el corte por arco de plasma está definida por la desviación del plasma, la rugosidad superficial y la ondulación. La desviación se origina por la curvatura del plasma y se determina por el arrastre y el paso entre líneas de arrastre, a menudo caracterizado por

los parámetros  $n$  (desviación de línea de arrastre) y  $f$  (distancia entre líneas de arrastre), según algunos autores. Esto es una característica específica del método de corte por arco de plasma, ya que durante la interacción con el material, el chorro de plasma pierde su energía cinética y cambia su forma (Gostimirović, 2020).

La Figura 5.9, muestra un esquema de lo que sería el corte ideal, esperado y no deseado para este método, en conjunto con los parámetros  $n$  y  $f$  previamente mencionados.

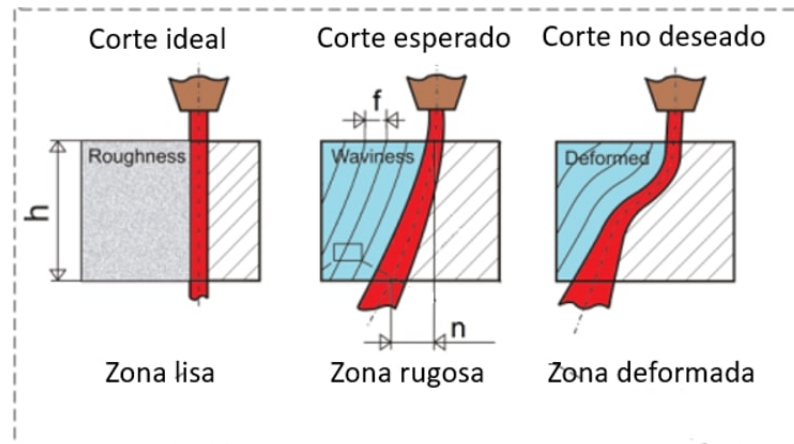


Figura 5.9. Cortes ideal, esperado y no deseado en el método de corte por plasma, junto con los parámetros de arrastre y paso entre líneas (Gostimirović, 2020)

A continuación, en las Figuras 5.10 y 5.11, se presentan las gráficas que muestran la influencia de la velocidad de corte en la desviación del jet de plasma (parámetros  $n$  y  $f$ ), tanto para el acero A36 y el 4140.

Para el caso del acero A36, Figura 5.10, los valores de  $n$  y  $f$  menores se obtuvieron para las velocidades de corte de 45 cm/min y 50 cm/min, por ende, las líneas de arrastre para estos casos resultan casi paralelas al jet de plasma. Por otro lado, para el caso del acero 4140, Figura 5.11, el menor valor de ambos parámetros se obtuvo para la menor velocidad de corte, es decir, 10 cm/min.

### 2.1.2 Oxicorte

A continuación, en las Figuras 5.12 (a) - (c) y 5.13 (a) - (c), se presentan las terminaciones superficiales obtenidas tanto para el ASTM A36 como para el AISI 4140, luego de seccionarlas con distintas velocidades mediante oxicorte.

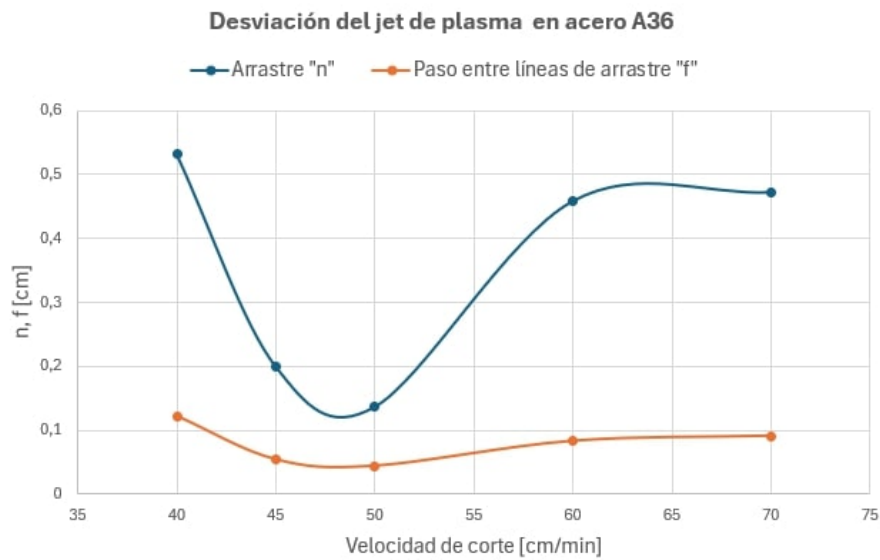


Figura 5.10. Influencia de la velocidad de corte en la desviación del jet de plasma para el acero A36.

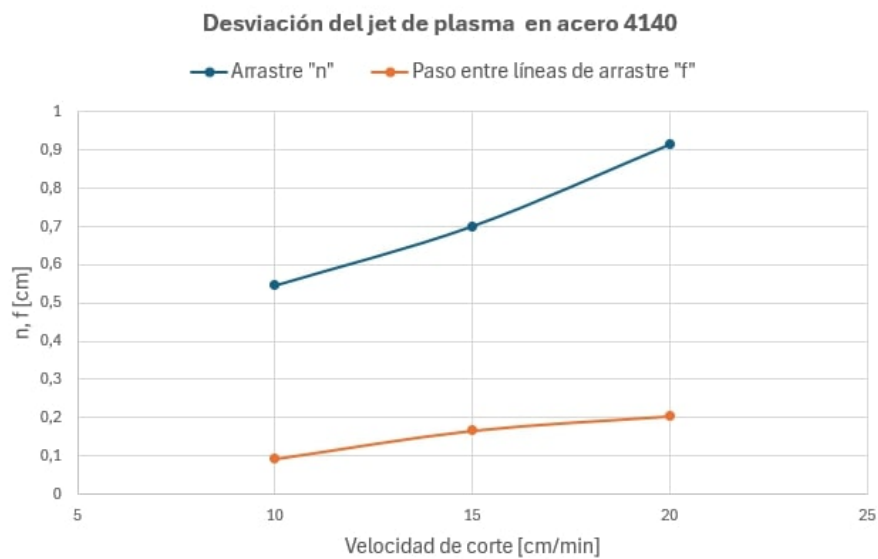


Figura 5.11. Influencia de la velocidad de corte en la desviación del jet de plasma para el acero 4140.

La calidad de corte óptimo para este método, se obtiene cuando el arrastre es nulo. El flujo de oxígeno entra y sale del corte en una línea recta a lo largo del eje de la punta de corte. Aumentar la velocidad de corte, o reducir el caudal de oxígeno, provoca que haya menos oxígeno disponible al final del corte, causando que la parte inferior del corte se curve por detrás del corte superior ([Internacional, 2004b](#))

En primer lugar, es interesante detallar que si bien en la teoría el método de corte de gas

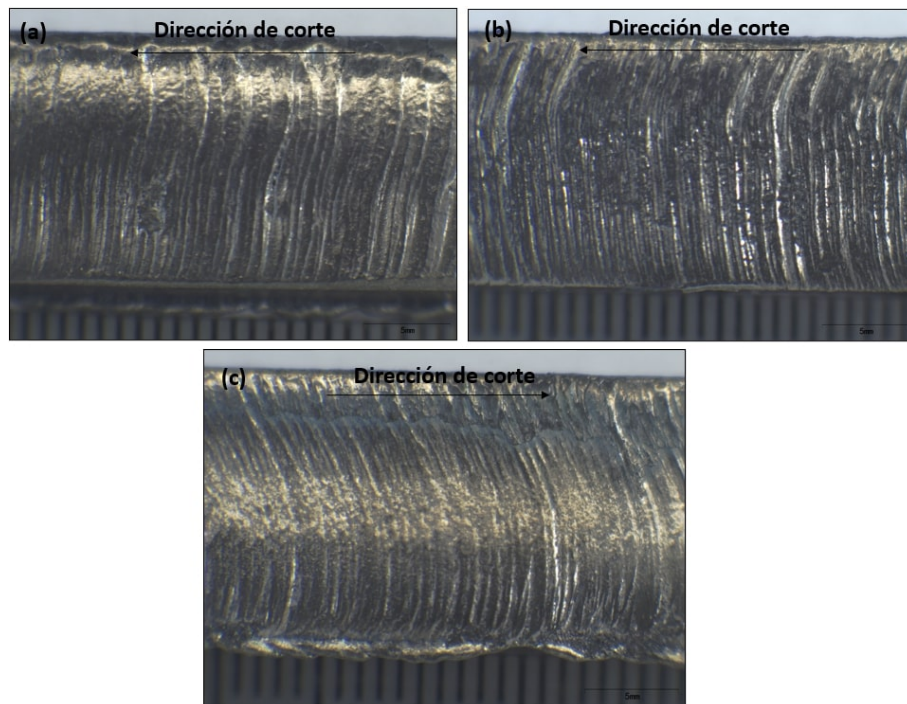


Figura 5.12. Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de oxicorte de: (a) 30 cm/min, (b) 35 cm/min y (c) 40 cm/min.

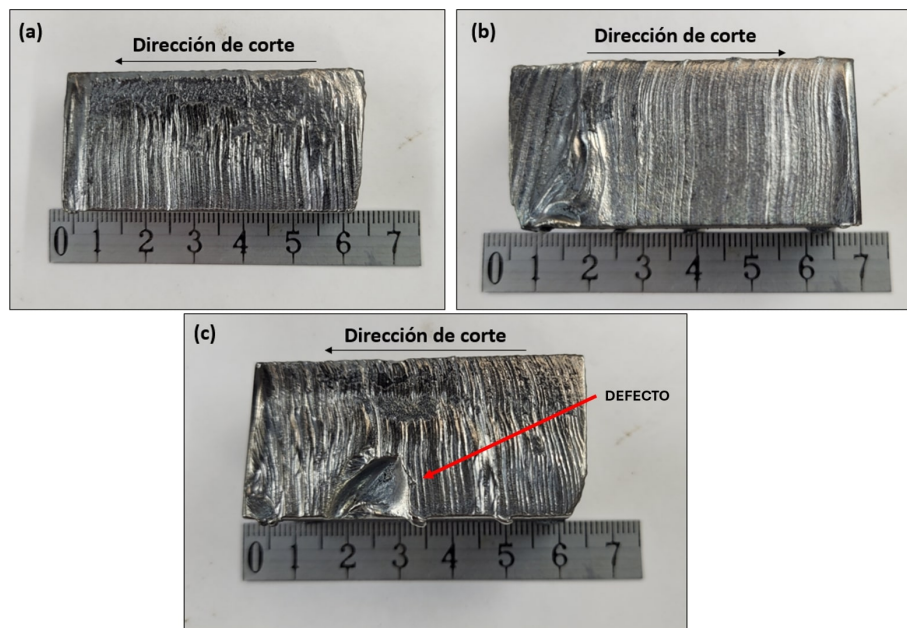


Figura 5.13. Terminación superficial obtenida en 4140 para velocidades de oxicorte de: (a) 25 cm/min, (b) 30 cm/min y (c) 35 cm/min.

y oxígeno suele generar una superficie de corte deficiente y con tolerancias dimensionales mucho menores que el arco por plasma, se visualiza que, mediante la automatización del proceso a través de railtrac ESAB, se obtiene un estado superficial aceptable, en el cual



las líneas de arrastre van en concordancia con el sentido de la llama de corte. Para el caso del acero al carbono, Figuras 5.12 (a) - (c), para las velocidades de 30 y 35 cm/min, se observa un desvío de las líneas de arrastre aceptable sobre el final del corte, un factor que se podría mejorar modificando la velocidad de corte o bien realizando un precalentamiento más efectivo de la pieza. Para el caso de la Fig 5.12 (c), ya resulta mucho más notoria la inclinación de las líneas de arrastre, lo cual indican una mala calidad del corte.

En el caso del AISI 4140, se utilizaron velocidades similares a las de un acero al carbono, que a pesar de las diferencias de composición química y espesor respecto al material anterior, se obtuvo un corte limpio y de buena calidad principalmente para la velocidad de 30 cm/min, Figura 5.13 (b). Para la velocidad mínima, Figura 5.13 (a), se observa que en la parte superior del corte hay una zona de fusión de material, dónde posiblemente por exceso de precalentamiento, se pierde el patrón de las líneas de arrastre, dejando una parte de material refundido. Por último, para la máxima velocidad, se visualiza que el patrón de las líneas de arrastre pierde regularidad, e incluso presenta un defecto indicado con flecha color rojo.

### **2.1.3 Corte por hilo**

En las Figuras 5.14 (a) - (c), 5.15 (a) - (c), 5.16 (a) - (c) y 5.17 (a) - (c), se visualiza el estado de la superficie de cada material luego del corte por hilo, para las 3 velocidades posibles.

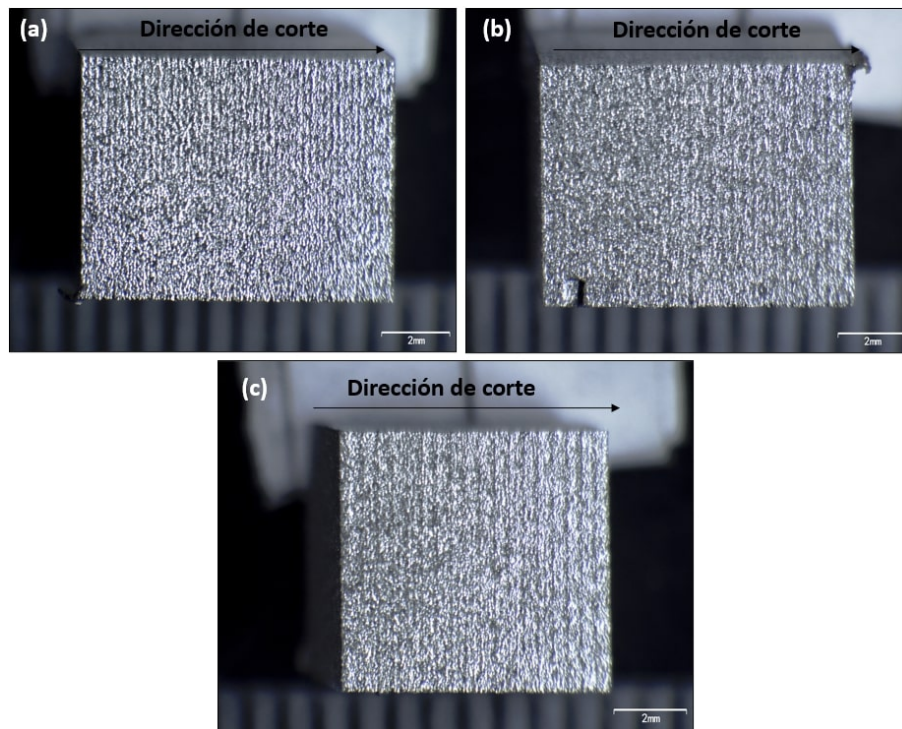


Figura 5.14. Terminación superficial obtenida en acero DSS para velocidades de corte por hilo de: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$  y (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ .

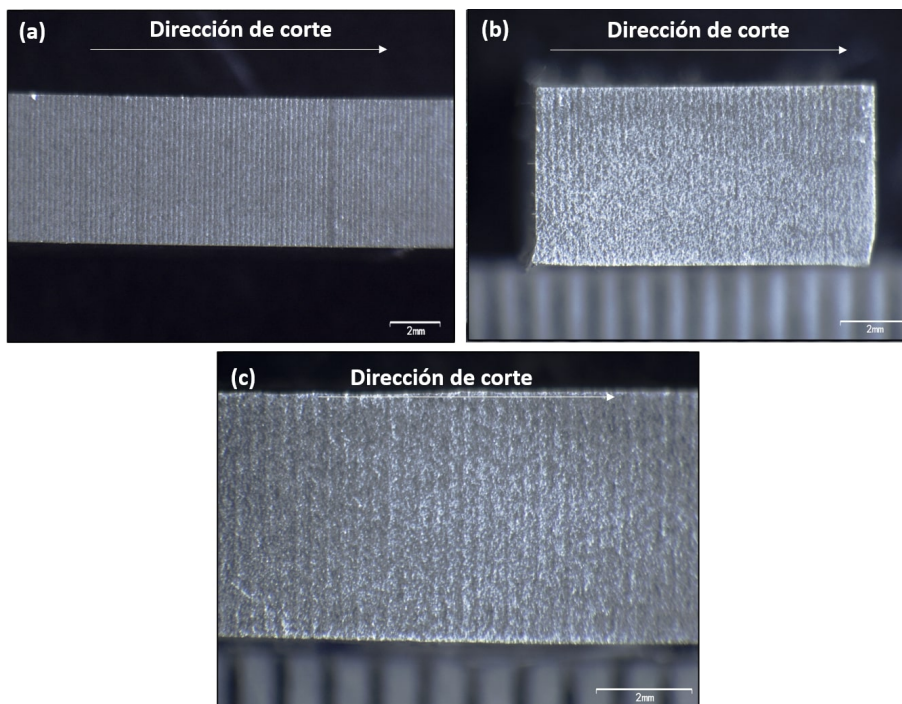


Figura 5.15. Terminación superficial obtenida en aleación de aluminio para velocidades de corte de hilo de: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$  y (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ .

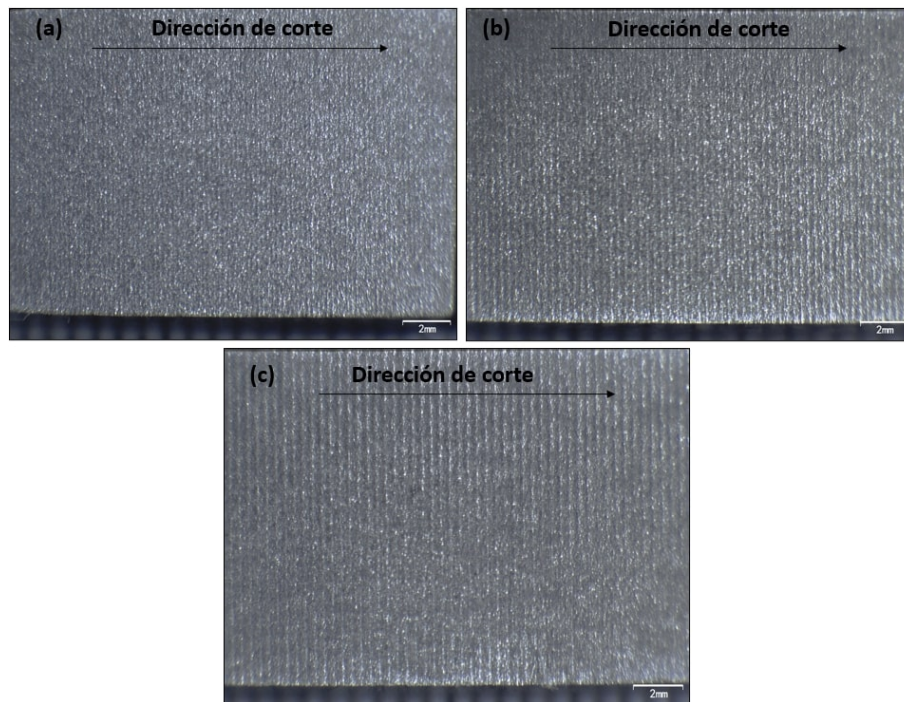


Figura 5.16. Terminación superficial obtenida en acero A36 para velocidades de corte por hilo de: (a)  $20 \mu\text{m}/\text{seg}$ , (b)  $30 \mu\text{m}/\text{seg}$  y (c)  $40 \mu\text{m}/\text{seg}$ .

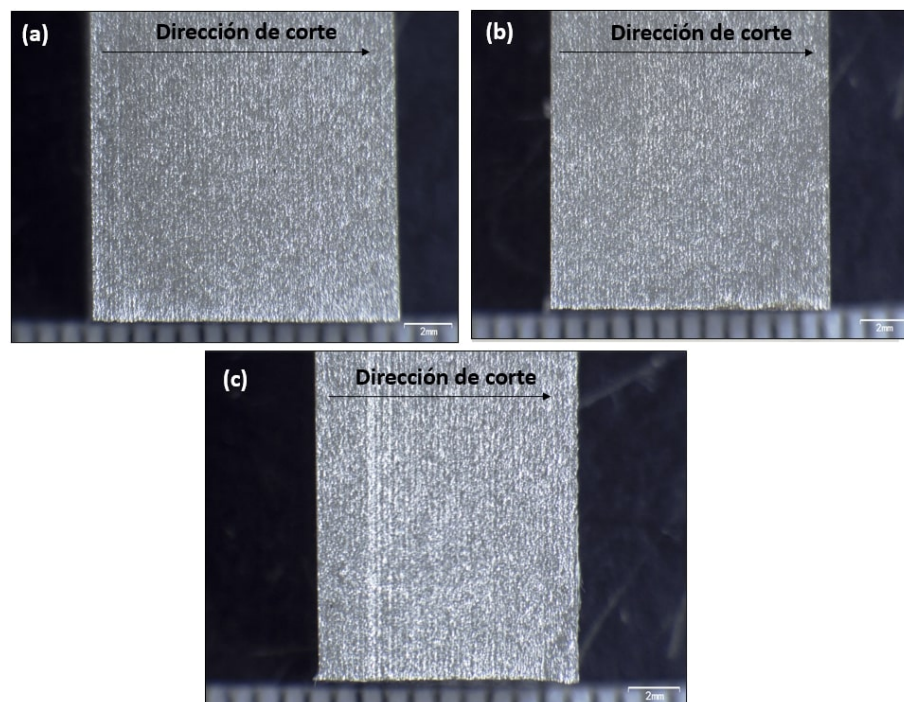


Figura 5.17. Terminación superficial obtenida en acero 4140 para velocidades de corte de: (a)  $20 \mu\text{m}/\text{seg}$ , (b)  $30 \mu\text{m}/\text{seg}$  y (c)  $40 \mu\text{m}/\text{seg}$ .

Se observa que los estados superficiales son similares entre sí, independientemente de

los materiales base. Esta similitud son las líneas en sentido perpendicular a la dirección del corte, dónde se visualiza el efecto de la fusión localizada del material producto del propio hilo. Además, este patrón es totalmente independiente del espesor de chapa, donde había un espesor mínimo de 6 mm y un espesor máximo de 25,4 mm.

Otro factor a analizar es cómo la velocidad de corte influye en la terminación superficial de la muestra, observándose líneas de corte más cercanas a velocidades mínimas y una mayor separación a velocidades máximas.

## **2.2 Caracterización microestructural de la zona afectada térmicamente por el corte**

En esta subsección, se realizará el análisis del espesor de la ZAC de cada material, a partir de las imágenes obtenidas en el microscopio LEICA. Por otro lado, se desarrollará el análisis de los resultados obtenidos sobre el borde afectado de cada material, a través del microscopio electrónico de barrido. Por último, se analizará la correlación que se presenta entre la ZAC y la velocidad de corte.

### **2.2.1 Acero inoxidable duplex**

En este material, sólo se pudieron realizar seccionamientos mediante corte por plasma e hilo, dado que estos eran favorecidos por la conductividad eléctrica del mismo, mientras que el corte por oxígeno y gas combustible no es recomendable y, en algunos casos, incluso posible, dada la dificultad de romper la capa de óxido de cromo. A continuación, se presentan las variaciones de microestructura para cada caso.

**2.2.1.1. Corte por plasma** Las Figuras 5.18 (a) - (c), muestran la variación que tuvo la microestructura de acero inoxidable dúplex luego de ser cortada con plasma mediante velocidades de 120, 140 y 150 cm/min, respectivamente. A su vez, la Figura 5.19, muestra en detalle la microestructura del acero DSS para una velocidad de corte de 140 cm/min.

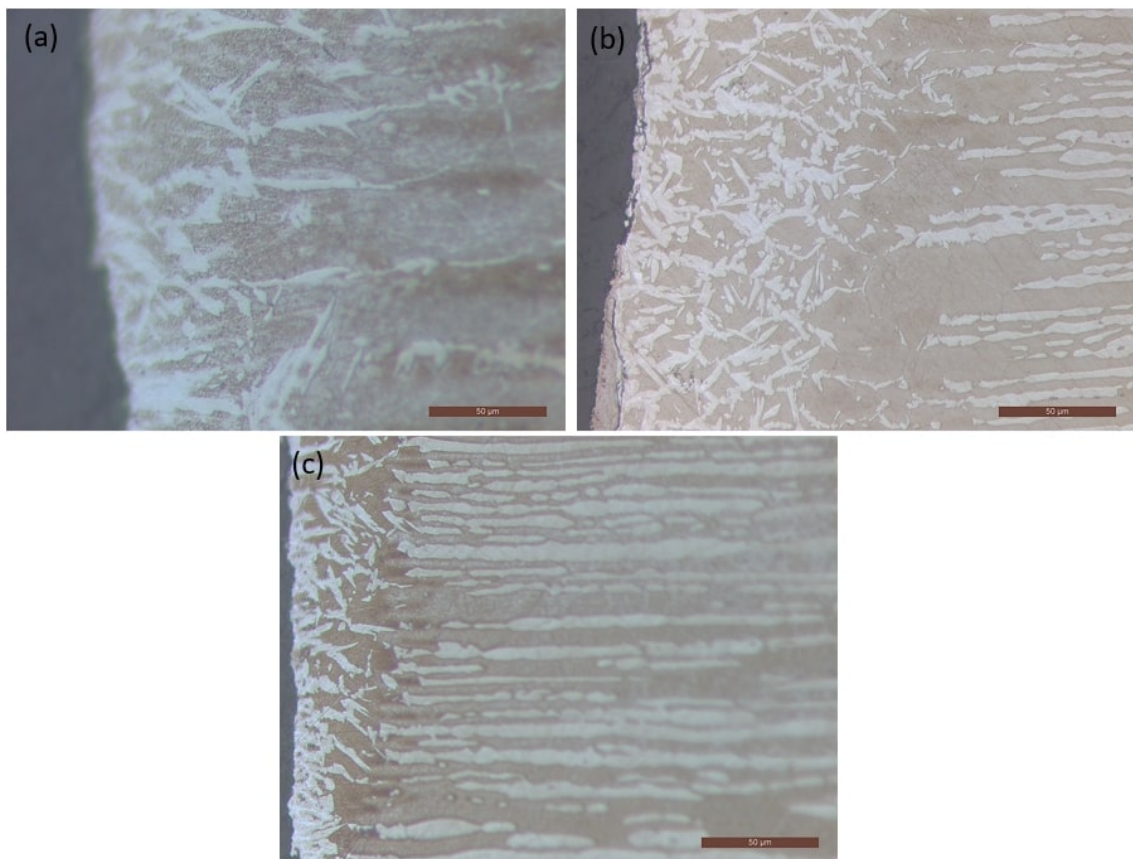


Figura 5.18. ZAC en muestras de DSS cortadas mediante plasma: (a) 120 cm/min; (b) 140 cm/min; (c) 150 cm/min. Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's.

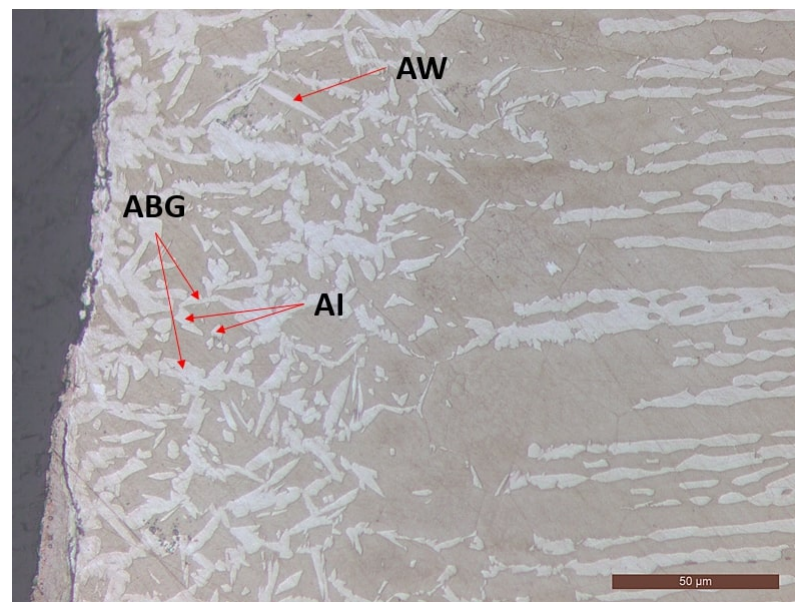


Figura 5.19. ZAC en muestra de DSS cortada mediante plasma para una velocidad de 140 cm/min. Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's.

Dado que el proceso implica un aumento de temperatura hasta la temperatura de fusión, a medida que la pieza comienza a enfriarse, comienza a transformarse a una microestructura totalmente ferrítica. Luego de pasar la temperatura de solvus para esta fase, se inicia la transformación de austenita en los bordes de grano (ABG) ferríticos. La naturaleza de la recristalización de estos granos dependerá tanto de la composición, como del rango de enfriamiento de la pieza (Lippold y Kotecki, 2012).

Este fenómeno de crecimiento de la fase austenita ocurre por un proceso de nucleación y crecimiento que concluye con una total cobertura del borde de grano ferrítico. En este caso, dado que la velocidad de enfriamiento es elevada, no fue posible alcanzar una cobertura total de la fase austenita en los bordes de grano.

Adicionalmente, se puede ver cómo se formó austenita adicional, en forma de agujas hacia los costados del borde de grano, también llamada austenita Widmanstätten (AW). Este crecimiento de fase puede ser orientado en placas hacia los costados del borde de grano, e incluso puede desarrollar un crecimiento de austenita intergranular (AI) (Lippold y Kotecki, 2012).

Es interesante resaltar el contraste en cuanto a la orientación de los granos. Los granos equiaxiales que se observan en el borde afectado por el corte, se deben al proceso de ferritización (Lippold y Kotecki, 2012). Es notoria la diferencia que se presenta con respecto a la orientación dada por el sentido de laminación de la pieza. En tal sentido, el acero inoxidable duplex se procesa de forma tal de mantener un porcentaje lo más equilibrado posible de ambas fases (50-50 %).

**Análisis de estudios obtenidos a través de SEM** Para evaluar posibles fases secundarias que se pueden haber formado a causa del impacto térmico sobre el acero DSS, como puede ser una fase sigma (compuesto intermetálico Fe - Cr - Mo), se realizó un mapeo de composición química sobre la microestructura resultante, luego de ser cortada por plasma a una velocidad de corte de 120 cm/min.

En la Figura 5.20, se puede visualizar la distribución de los elementos químicos, mientras que en la Figura 5.21 se pueden observar los elementos de aleación por separado.

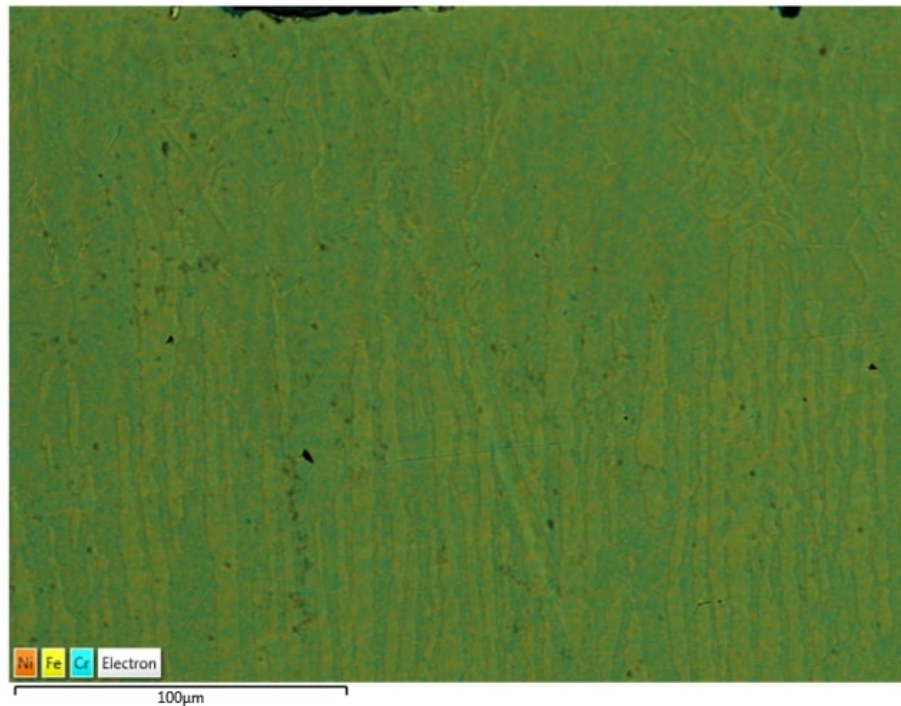


Figura 5.20. Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar distribución de elementos de aleación. Naranja = Ni; Amarillo = Fe; Celeste = Cr. Aumento x1000.

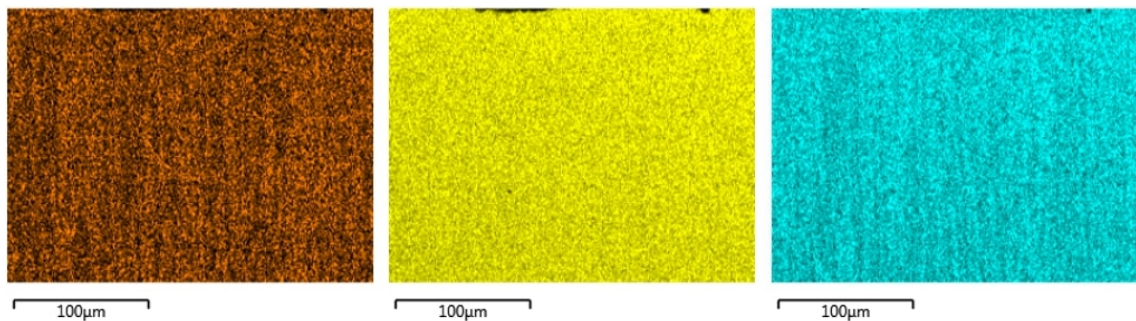


Figura 5.21. Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Naranja = Ni; Amarillo = Fe; Celenste = Cr. Aumento x1000.

Como se puede observar, no se presentan zonas con mayor concentración de los elementos que caracteriza la fase sigma, por lo que no fue posible visibilizar fases no deseadas.

**Análisis velocidad de corte vs espesor de ZAC** En las Figuras 5.22 (a) - (c), se observan las 5 mediciones tomadas en cada caso para la medición de espesor de ZAC, para velocidades de 120, 140 y 150 cm/min, respectivamente. El criterio para definir el límite de la zona afectada térmicamente, se basó en considerar hasta el punto dónde se vuelve a observar una orientación de los granos de ferrita y austenita, acorde al sentido de laminación de la pieza.

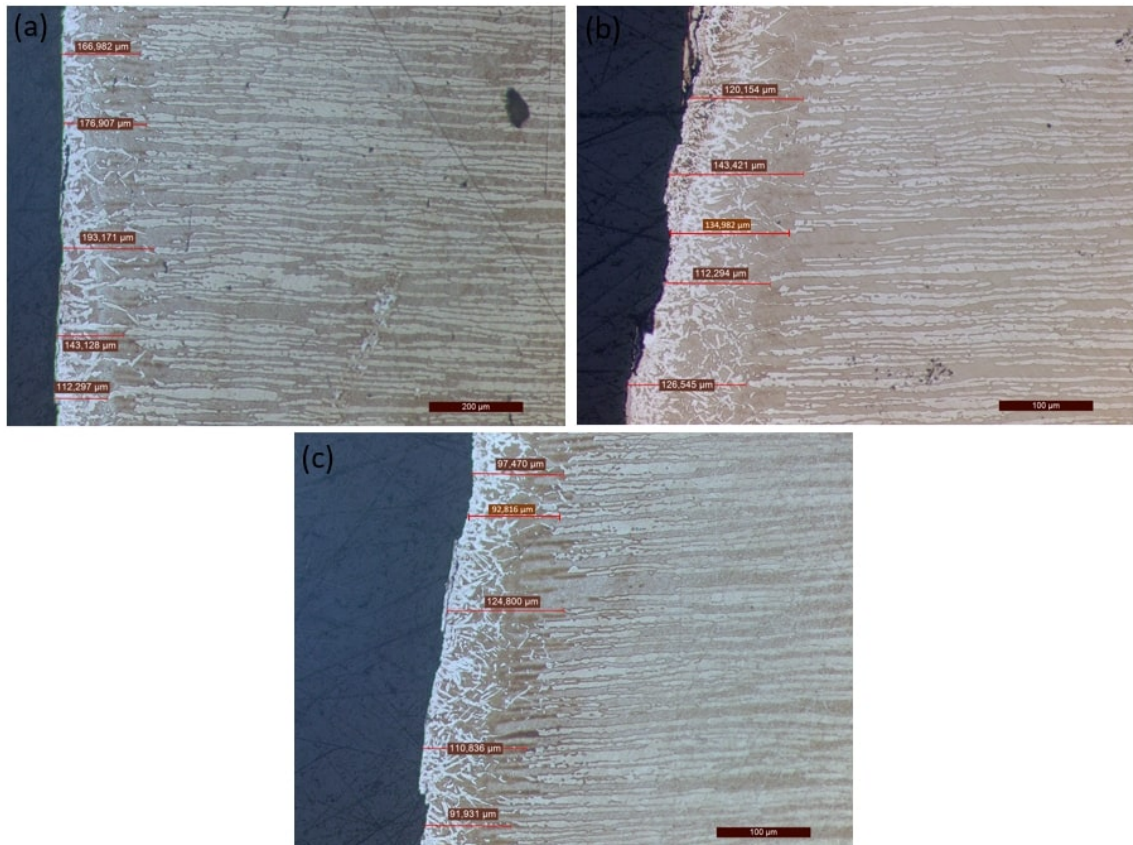


Figura 5.22. Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para las distintas velocidades de corte en DSS: (a) 120 cm/min, en aumento de x100; (b) 140 cm/min, en aumento de x200; (c) 150 cm/min, en aumento de x200.

La Tabla 5.4 muestra las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC del DSS luego del corte por plasma, con las respectivas variables estadísticas de promedio y desvío estándar, mientras que en la Figura 5.23 se visualiza la gráfica que correlaciona la velocidad de corte con el espesor de ZAC, con las barras de desvío estándar correspondientes.



M1) 120 cm/min		M2) 140 cm/min		M3) 150 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	166,982	1	143,421	1	97,470
2	143,146	2	112,294	2	124,800
3	176,907	3	126,545	3	91,931
4	112,297	4	120,154	4	110,836
5	193,171	5	134,982	5	92,816
<b>Promedio</b>	158,50	<b>Promedio</b>	127,48	<b>Promedio</b>	103,57
<b>DS</b>	31,56	<b>DS</b>	12,20	<b>DS</b>	14,07

Tabla 5.4. Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma en DSS, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

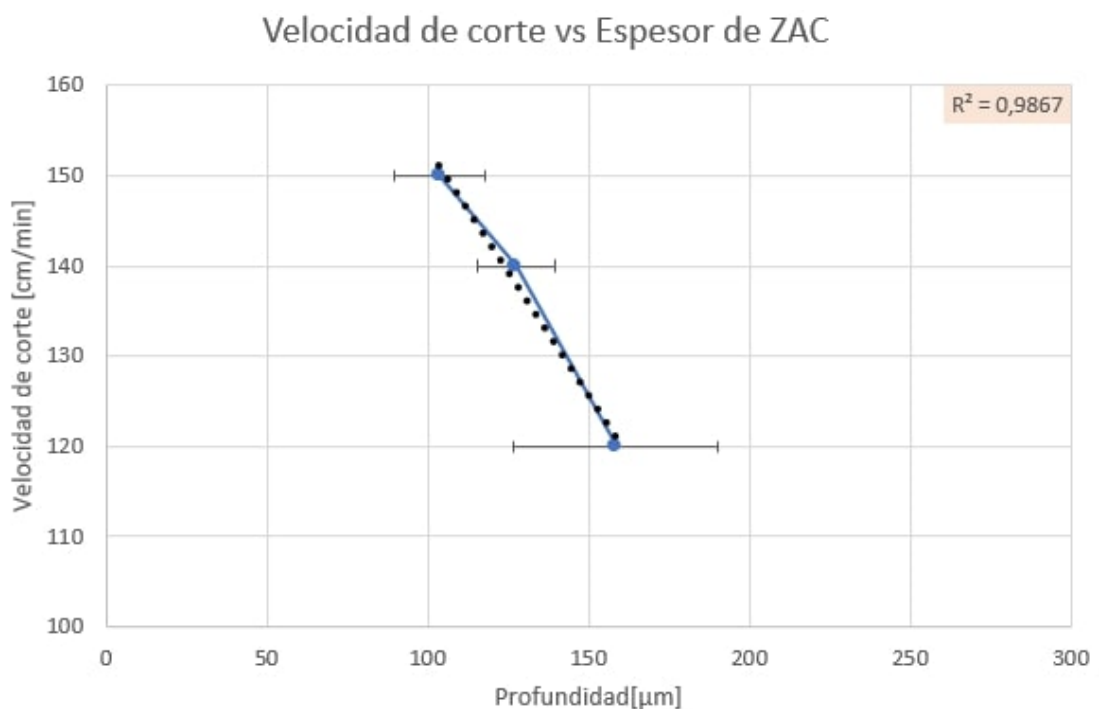


Figura 5.23. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para DSS cortado mediante corte por plasma.

La tendencia en la microestructura es clara, a mayor velocidad de corte, menor es el espesor de la ZAC. El aporte de calor generado por el corte por plasma, a medida que aumenta la velocidad de corte, disminuye el tiempo y el volumen de material a temperatura elevada (en relación con las temperaturas necesarias para cambios de fase)

Sobre la gráfica obtenida, se muestra en línea punteada negra la recta interpolada que aproxima los tres puntos obtenidos según la velocidad de corte y la profundidad de ZAC. Cómo se puede ver, la correlación obtenida se aproxima en gran medida a una relación lineal, obteniendo un  $R^2$  próximo a 1.

**2.2.1.2. Corte por hilo** Las Figuras 5.24 (a) - (c) muestra la variación que tuvo la microestructura de acero inoxidable dúplex luego de ser seccionada mediante corte por hilo, utilizando velocidades de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente. Estas velocidades son considerablemente menores a las que se pueden realizar en un corte por plasma.

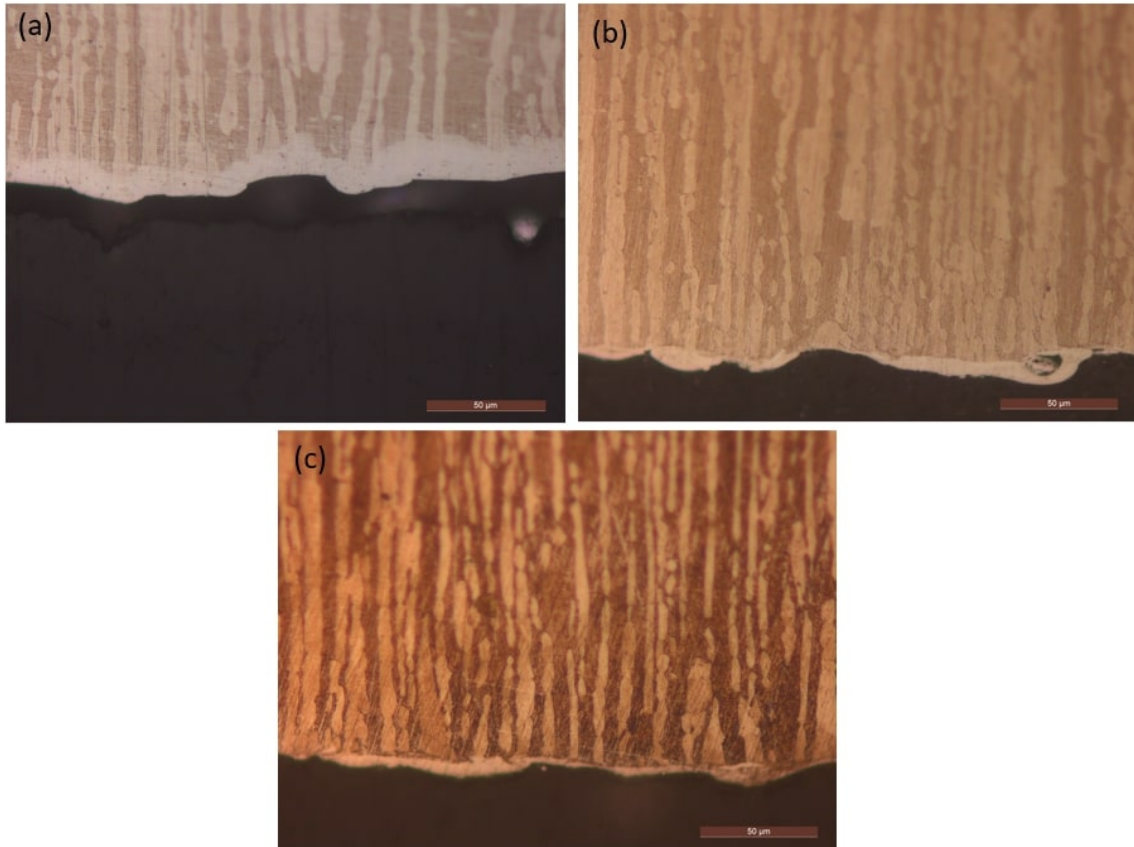


Figura 5.24. ZAC en muestra de DSS cortada mediante corte por hilo: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Beraha 's.

Como se puede observar en las figuras anteriores, no se detectaron granos equiaxiales en el material, posiblemente debido a que el tiempo y temperatura en el que el material permanece caliente, no es suficiente para ferritizar. La calidad de corte respecto del corte por plasma es ampliamente mejor. Sin embargo, se detectó una capa blanca delgada, que no fue afectada por el reactivo químico. Esta evidencia coincide con algunos resultados de la bibliografía (Najm, 2018) (Ver Sección 2.3.4).

**Análisis de estudios obtenidos a través de SEM** En la Figura 5.25, se muestra en aumento de x5000, la microestructura del DSS luego del corte por hilo. Dado que la microestructura del material bajo este método térmico no se vió afectada, el enfoque estuvo puesto en analizar la capa blanca que se observó en las Figuras 5.24 (a) - (c). En la Tabla

5.5, se detallan los valores obtenidos para cada elemento.

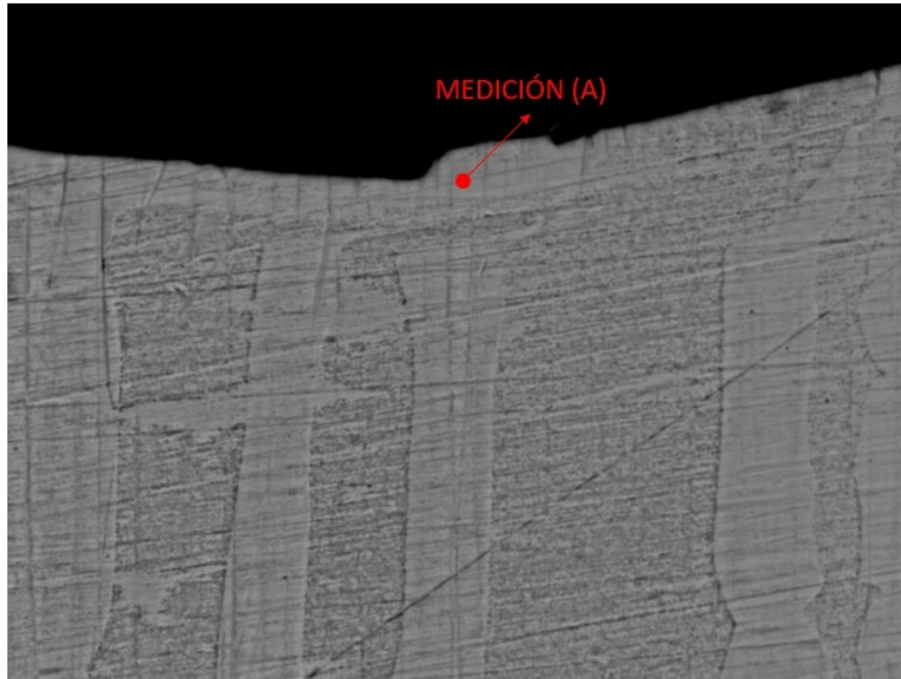


Figura 5.25. Microestructura DSS en borde afectado térmicamente por WEDM, con la respectiva medición de composición química en la capa blanca. Aumento x5000.

	<b>Fe</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>
MEDICIÓN (A)	69,51	24,78	4,88	0,84

Tabla 5.5. Medición de composición química en capa blanca de DSS cortado con WEDM, en wt[%].

Como se puede observar, los elementos de aleación presentes en la capa blanca, no difieren de lo que se espera para un material de estas características.

**Análisis velocidad de corte vs espesor de ZAC** Las mediciones de ZAC se puede visualizar para cada caso en las Figuras 5.26 (a) - (c), que representan velocidades de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente. Si bien, las variaciones de velocidades fueron elevadas (entre la primera muestra y la última se duplicó la velocidad, lo cual implica la mitad del tiempo de trabajo), el aumento del espesor de la ZAC fue un promedio menor a 10  $\mu\text{m}$ .

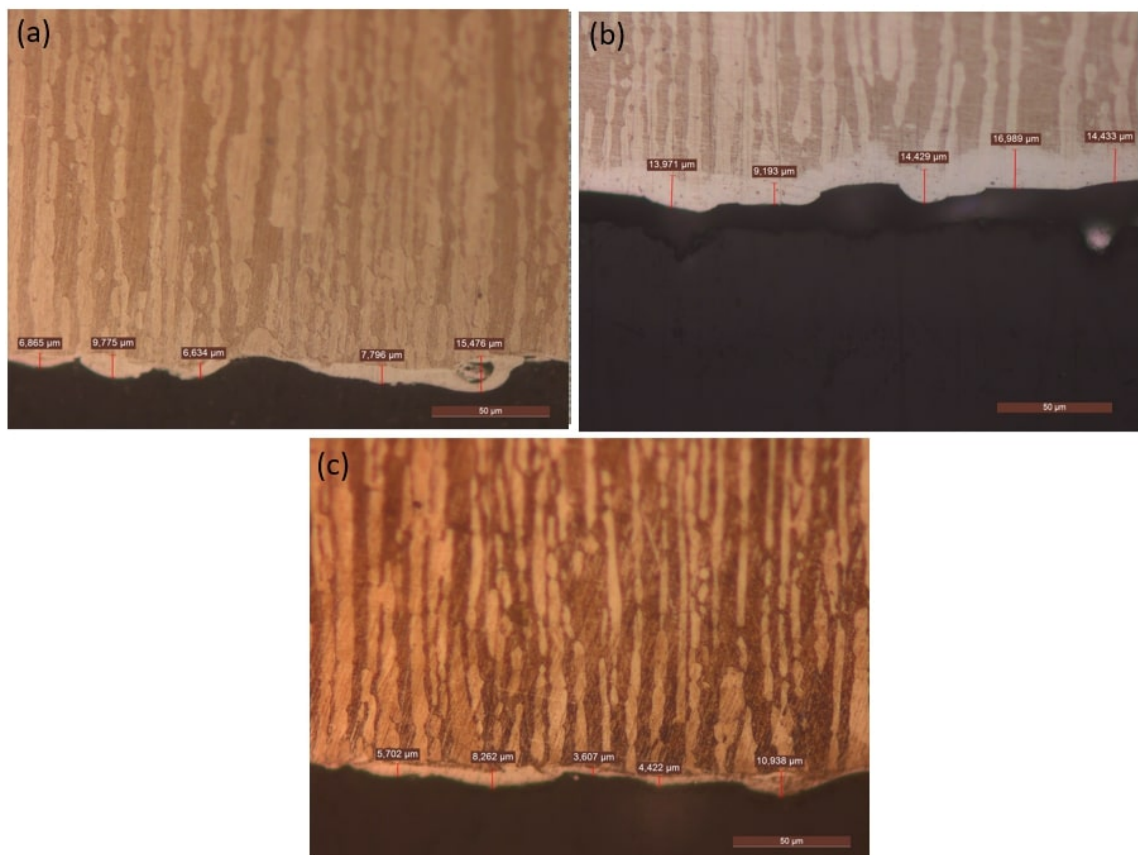


Figura 5.26. Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para DSS: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500.

A continuación, la Tabla 5.6 detalla las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC del DSS luego del corte por plasma, en conjunto con las respectivas variables estadísticas de promedio y desvío estandar. Por otro lado, la Figura 5.27, muestra la gráfica obtenida a partir de la velocidad de corte y el espesor de ZAC resultante, con las respectivas barras de desvío estándar para cada caso.

M1) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$		M2) 30 $\mu\text{m}/\text{min}$		M3) 40 $\mu\text{m}/\text{min}$	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	13,971	1	6,865	1	5,702
2	9,193	2	9,775	2	8,262
3	14,429	3	6,634	3	3,607
4	16,989	4	7,796	4	4,422
5	14,433	5	15,476	5	10,938
<b>Promedio</b>	13,80	<b>Promedio</b>	9,31	<b>Promedio</b>	6,59
<b>DS</b>	2,84	<b>DS</b>	3,66	<b>DS</b>	3,00

Tabla 5.6. Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por hilo en DSS, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

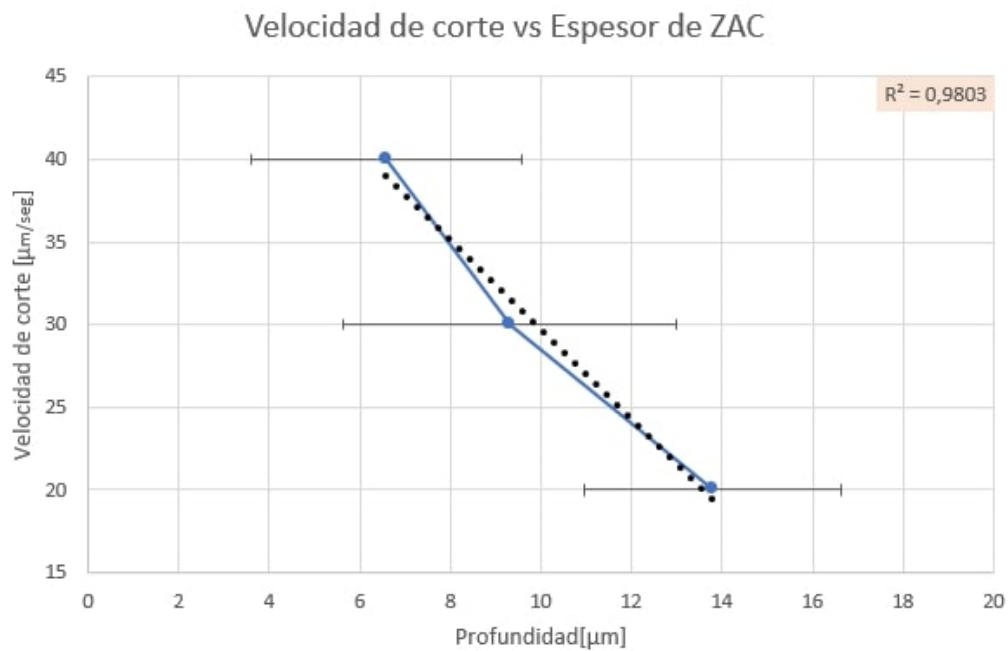


Figura 5.27. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para DSS cortado mediante corte por hilo.

Similar a lo visto en la Figura 5.23, se puede visualizar un  $R^2$  próximo a uno, indicando una correlación lineal de las variables.

En cuanto a los desvíos estándar, en el corte por plasma el espesor de la ZAC resultó ser mayor pero mucho más uniforme que en el corte por hilo y esto se debe al principio físico del corte. En el corte por hilo se presenta un tipo de corte discreto, lo cual brinda una superficie más irregular.

## 2.2.2 Aleación de aluminio

Similar al caso del acero DSS, sobre este material sólo se pudieron realizar cortes mediante plasma e hilo. Al no ser un material ferroso, el método de oxicorte no es aplicable para este material. A continuación, se muestran las microestructuras resultantes luego de cada método de corte térmico.

**2.2.2.1. Corte por plasma** Las Figuras 5.28 (a) - (c) muestran las consecuencias del impacto térmico provocado por el corte por plasma sobre la microestructura en el borde de corte del aluminio, luego de ser seccionado con velocidades de 70, 80 y 90 cm/min, respectivamente.

Se puede visualizar que para las tres velocidades utilizadas, se presentaron zonas afec-

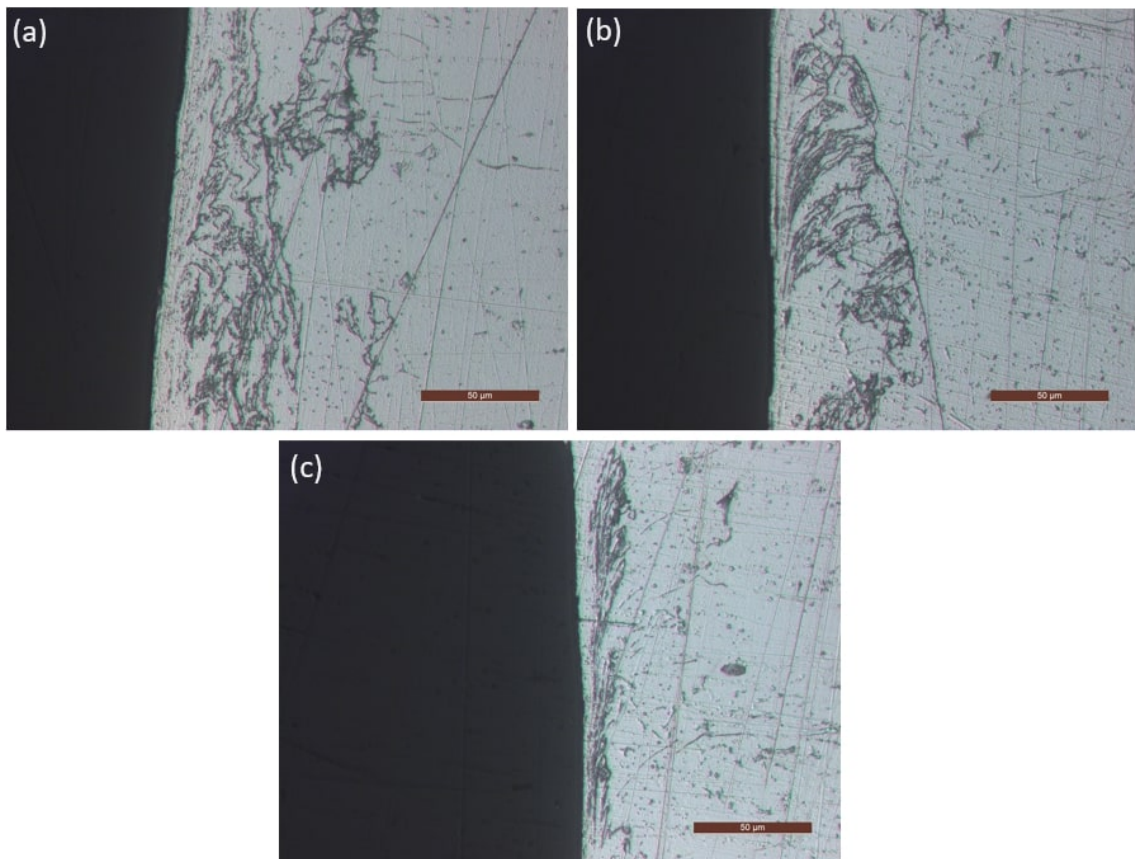


Figura 5.28. ZAC en muestra de aluminio serie 1xxx cortada mediante plasma: (a) 70 cm/seg; (b) 80 cm/seg; (c) 90 cm/seg. Aumento de x500. Ataque químico: Keller

tadas por el corte, aún así, no se alcanza a distinguir con claridad la microestructura resultante del proceso de fusión propio del corte. Por otra parte, la zona afectada no resultó ser homogénea, sino que abarcaba zonas aisladas a lo largo del borde de corte. A medida que la velocidad de corte aumenta, la superficie alterada a causa del corte térmico disminuye.

**Análisis de estudios obtenidos a través de SEM** Dado que mediante microscopía óptica no fue posible distinguir con claridad la zona afectada por calor en las muestras de aluminio, se realizó un mapeo de composición química para visualizar la distribución de los elementos de aleación. La Figura 5.29 muestra el mapa de colores sobre la microestructura en aumento x1000, mientras que en la Figura 5.30 se pueden visualizar los elementos de aleación por separado.

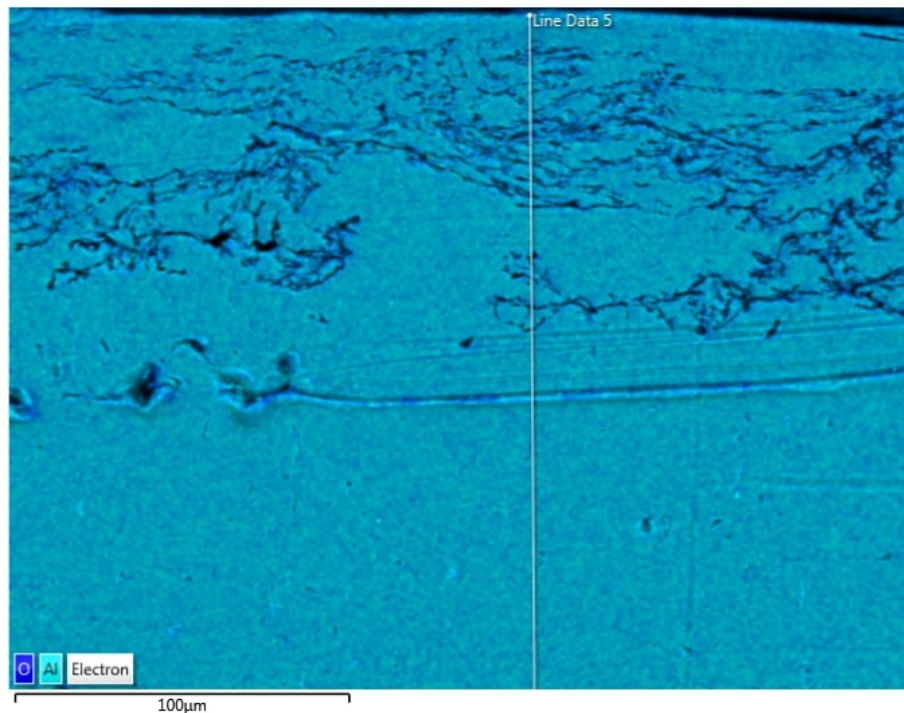


Figura 5.29. Microestructura aluminio serie 1xxx en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar distribución de elementos de aleación. Celeste = Al; Azul = O. Aumento x1000

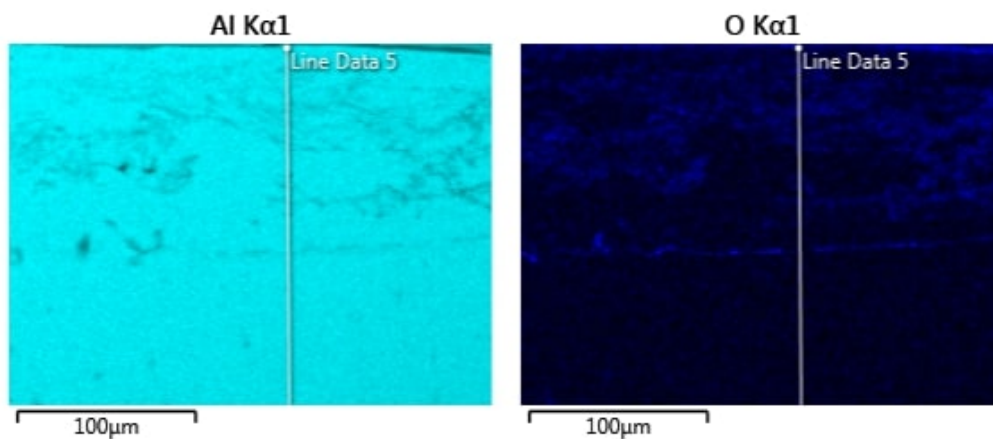


Figura 5.30. Microestructura aluminio serie 1xxx en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Celeste = Al; Azul = O. Aumento x1000

Del análisis de las figuras anteriores, se puede observar que los elementos predominantes son el Al y el O. Debido a la alta reactividad del aluminio con el oxígeno, es probable que en la ZAC exista alúmina ( $Al_2O_3$ ) defectuosa, dada la distribución del elemento químico oxígeno alrededor de la zona más oscura observada en la microscopía óptica de la Figura 5.28.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** Tal y cómo se pudo observar por medio de la microscopía óptica, mediante el ataque químico recomendado para dicha aleación no fue posible revelar una interfaz claramente definida que permita realizar una medición confiable del espesor de ZAC. Por el mismo motivo, no fue posible armar un gráfico que relacione velocidad de corte y espesor de material afectado, aunque cualitativamente se observa que el espesor de la capa afectada por el corte es menor a medida que aumenta la velocidad de corte.

**2.2.2.2. Corte por hilo** Las Figuras 5.31 (a) - (c), muestran la microestructura obtenida en el aluminio serie 1xxx, luego de ser seccionada mediante velocidades de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente.

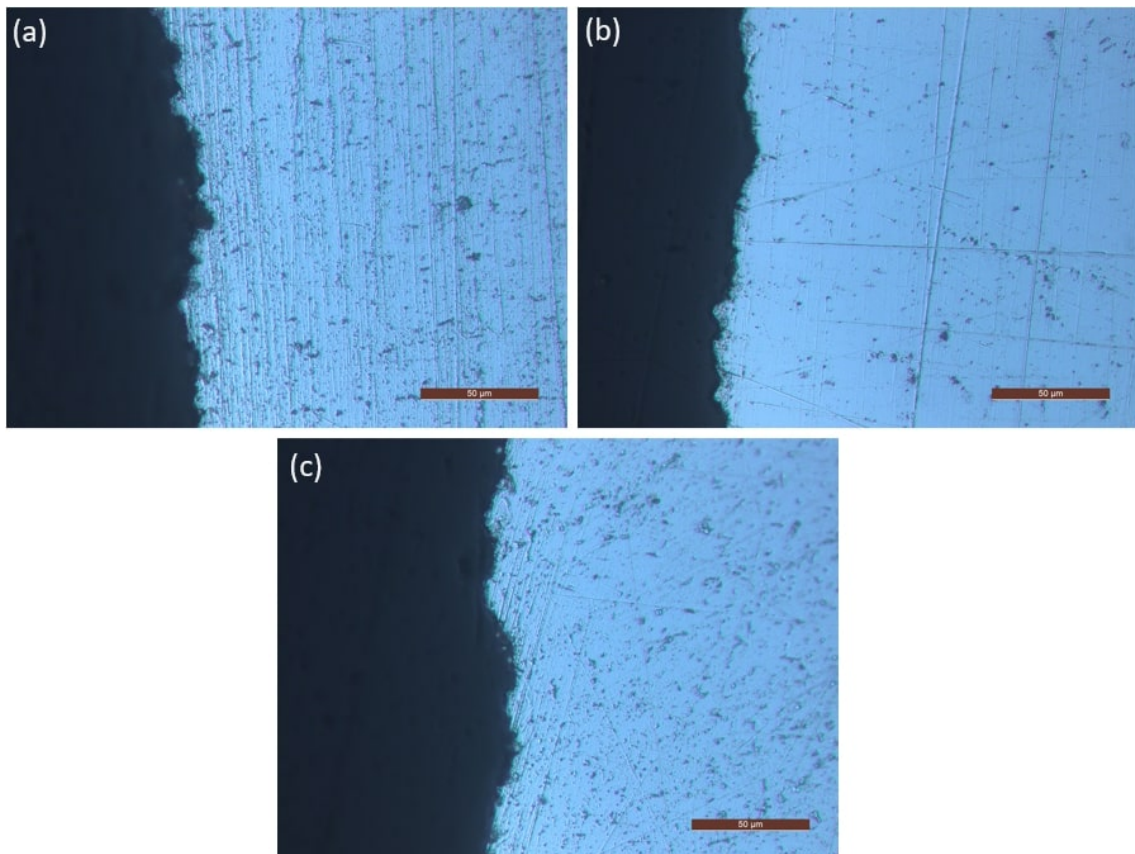


Figura 5.31. ZAC en muestra de aluminio serie 1xxx cortada mediante hilo: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Keller.

En la Figura 5.31 no se observa con claridad una capa superficial afectada microestructuralmente por el corte. Estas observaciones son esperables debido a las características del corte por hilo y la alta conductividad eléctrica y térmica del metal. (Callister Jr y Rethwisch, 2018).



Otra característica a remarcar, es que dado el principio de funcionamiento del corte, se obtuvo una superficie con una terminación superficial más defectuosa e irregular que para el caso de corte por plasma, lo cual puede ser consecuencia de la fusión localizada en intervalos de tiempo discreto o bien a causa de la conductividad eléctrica y térmica que presenta el material (Akkurt, 2015).

**Análisis de estudios obtenidos a través de SEM** El análisis mediante microscopía electrónica de barrido no fue realizado debido a que no se detectaron cambios microestructurales en el análisis mediante microscopio óptico.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** No fue posible identificar material afectado térmicamente que permita realizar un análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC.

### 2.2.3 Acero al carbono

El acero al carbono, al ser un material ferroso y buen conductor eléctrico, pudo ser seccionado por todos los métodos de corte en estudio. A su vez, dado que se tenía disponibilidad de material y el espesor de chapa era tal que se permitían hacer variaciones de velocidad más amplias, se pudo obtener un rango más extenso de resultados sobre el método de corte con plasma. Las siguientes subsecciones muestran los resultados microestructurales obtenidos en este material, luego de ser afectados térmicamente.

**2.2.3.1. Corte por plasma** En las Figuras 5.32 (a) - (e), se puede ver en aumento x200, cómo fue el impacto térmico en una microestructura de matriz completamente ferrítica con poco contenido de carbono, con velocidades de 40, 45, 50, 60 y 70 cm/min respectivamente. Luego en la Figura 5.33, se muestra de manera ampliada la ZAC resultante para una velocidad de corte de 60 cm/min, en aumento x200.

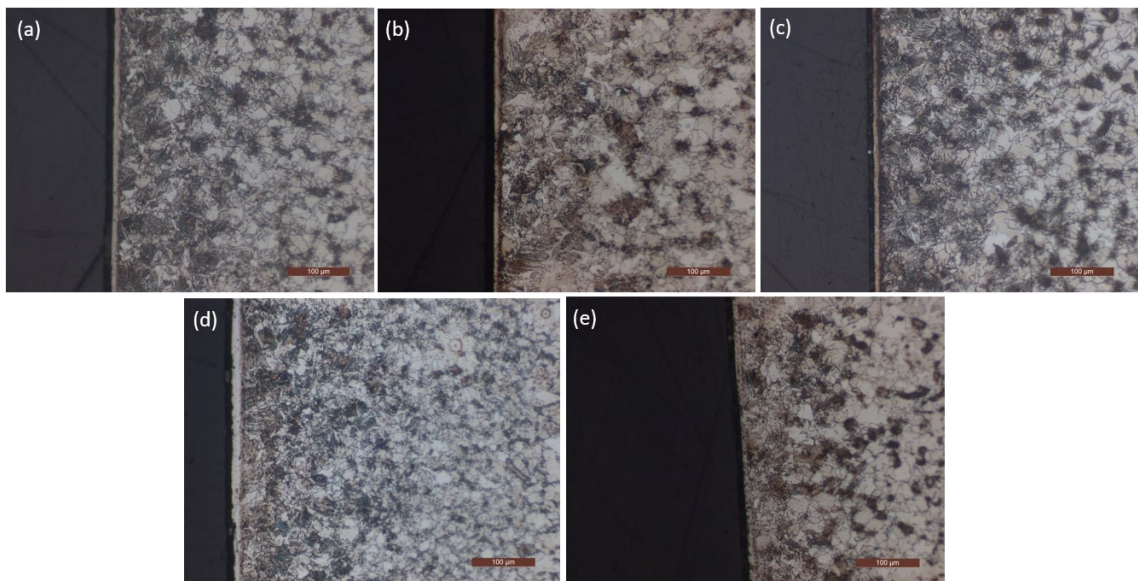


Figura 5.32. ZAC en muestra de A36 cortada mediante plasma: (a) 40 cm/min; (b) 45 cm/min; (c) 50 cm/min; (d) 60 cm/min; (e) 70 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 2%

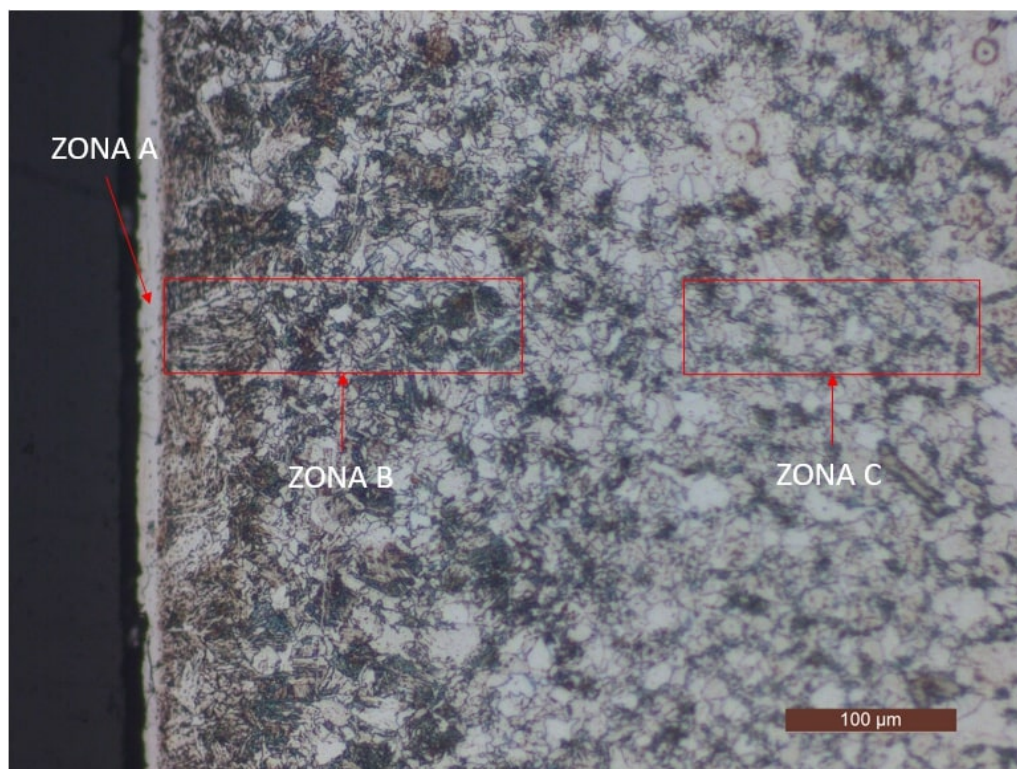


Figura 5.33. ZAC en muestra de A36 cortadas mediante plasma para una velocidad de 60 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 2%.

Es importante remarcar que los aceros que presentan un contenido de carbono menor a 0.25 %, no suelen ser tratados térmicamente para formar martensita dado que las tasas de enfriamiento requeridas para alcanzar esta microestructura son tan rápidas que no suelen ser prácticas (Callister Jr y Rethwisch, 2018).

El análisis microestructural del material reveló 3 zonas: una primera capa resolidificada (ZONA A), la cual es una capa delgada dónde se deposita el residuo del material fundido y que no fue atacada químicamente; la segunda capa (ZONA B), dónde se puede observar una microestructura conformada por ferrita de morfología tipo Widmanstatten (FW), colonias de perlita de grano gruesa (PG) y granos de ferrita (F) de mayor tamaño que en el metal base; la tercera capa (ZONA C), dónde se presentan la transición gradual de las colonias de perlita gruesa y granos gruesos de ferrita hasta el tamaño promedio de los granos finos en el metal base (Boumerzoug, 2010). La microestructura de ferrita Widmanstatten se caracteriza por presentar placas a lo largo de los granos ferríticos (Dominic, 2004). En la Figura 5.34, se muestra las zonas A y B con mayor detalle.

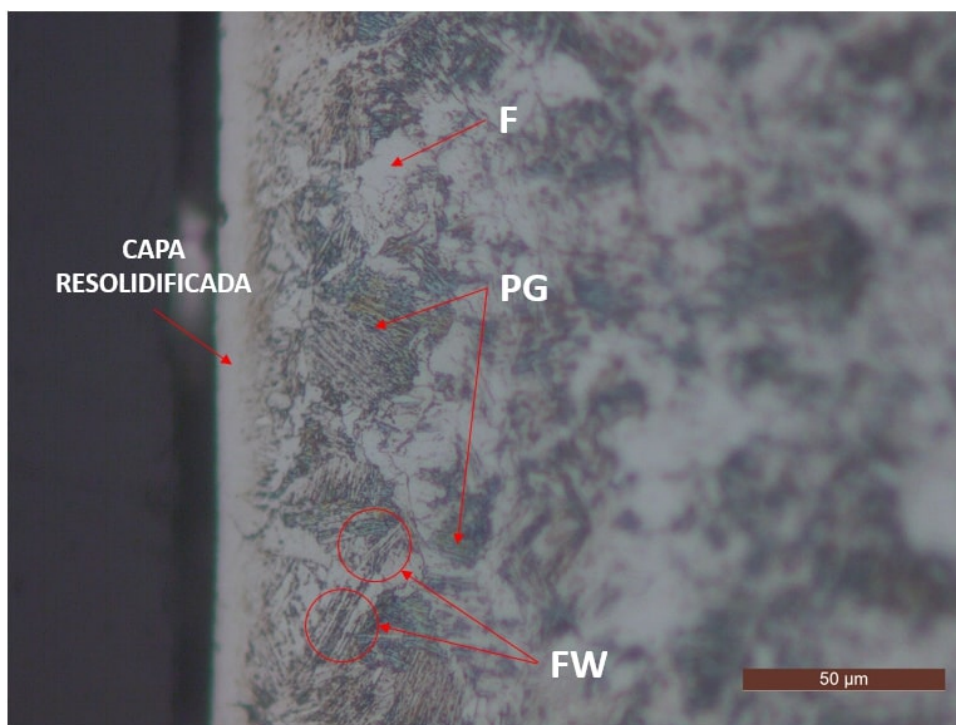


Figura 5.34. Zonas A y B de microestructura resultante en A36 luego del corte por plasma para una velocidad de 60 cm/min. Aumento de x500.

A medida que se incrementa la velocidad de corte, no se observa una variación notoria del espesor de la capa resolidificada, pero sí se puede ver con claridad la disminución del espesor de ZAC en las capas de cambio microestructural y transición hasta el metal base.

**Análisis de estudios obtenidos a través de SEM** Se realizó un mapeo de composición química con el fin de identificar las zonas donde hay mayor contenido de carbono. En la Figura 5.35, se observa la microestructura en aumento x1000, junto con el mapa de colores que representa el contenido de hierro (Fe), carbono (C) y manganeso (Mn), y la respectiva leyenda de cada caso. Por otro lado, la Figura 5.36, muestra el mismo análisis pero discriminando cada elemento químico.

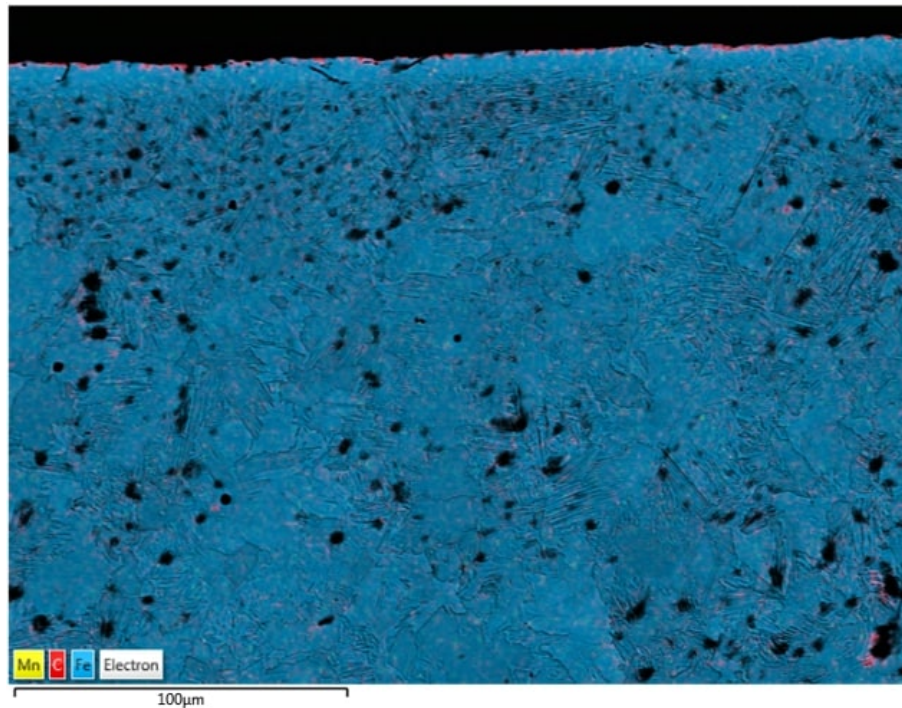


Figura 5.35. Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por PAC, con el correspondiente mapeo de colores para identificar zonas de contenido de carbono. Azul = Fe; Rojo = C; Amarillo = Mn. Aumento x1000

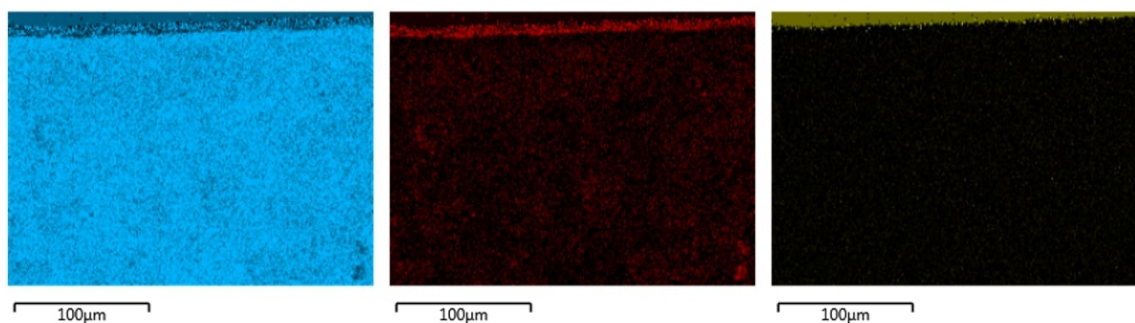


Figura 5.36. Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por PAC, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Azul = Fe; Rojo = C; Amarillo = Mn. Aumento x1000

Tal y como se puede observar en la figura anterior, el borde de corte identificado como ZONA A, presenta una zona carburizada. Si bien el método de corte por plasma no genera la carburización que provoca el oxicorte con la elevada temperatura y la atmósfera de carbono, este método también promueve la formación de óxidos de Fe, lo cual disminuye el contenido de este elemento respecto al contenido de C (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** Sobre las Figuras 5.37 (a) - (c) y 5.38 (a) y (b), se encuentran las mediciones realizadas de espesor de ZAC para cada velocidad, dónde las Figuras 5.37 (a) - (c) contienen las mediciones para velocidades de 40, 45 y 50 cm/min, y la Figura 5.38 (d) - (e), las mediciones para las velocidades de 60 y 70 cm/min, respectivamente. En este caso, el criterio para definir el límite de la zona afectada por calor no fue tan simple dado que la transición hacia el metal base no es tan clara como en el caso del acero inoxidable duplex. Debido a ello, se limitó el efecto térmico hasta el punto dónde se consideró que el crecimiento de los granos perlíticos es casi del mismo tamaño que los granos del metal base.

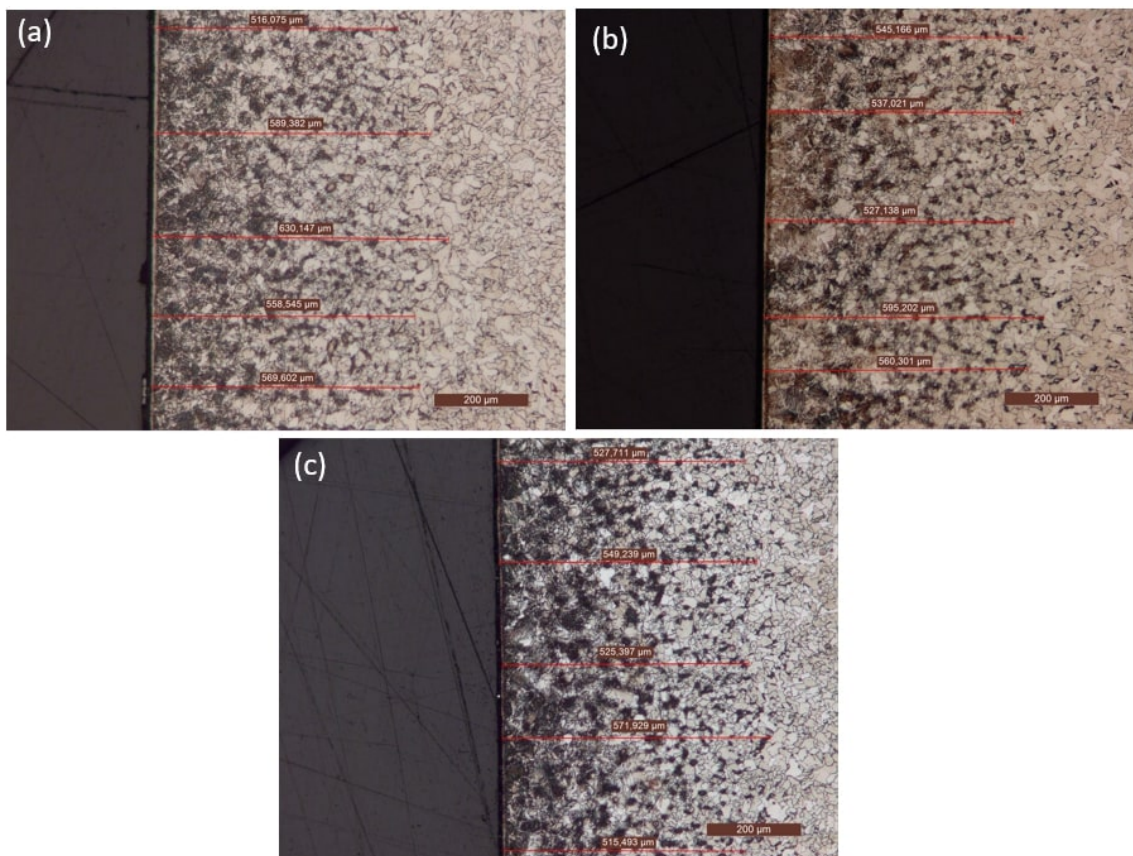


Figura 5.37. Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para acero A36: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min. Aumento x100.

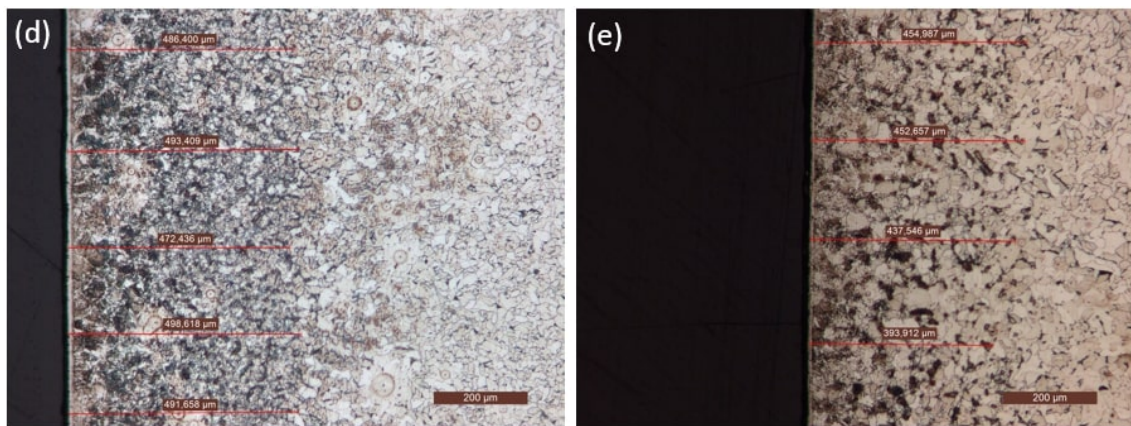


Figura 5.38. Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para: (a) 60 cm/min, (b) 70 cm/min. Aumento x100.

Las Tablas 5.7 y 5.8, muestran en detalle los valores obtenidos de las Figuras anteriores, sobre el espesor de ZAC para el acero A36 luego del corte por plasma, en conjunto con las variables estadísticas de promedio y desvío estandar. Además, en la Figura 5.39 se visualiza la gráfica obtenida de velocidad de corte vs espesor de ZAC, en conjunto con las respectivas barras de desvío estándar.

M1) 40 cm/min		M2) 45 cm/min		M3) 50 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	516,075	1	545,166	1	527,711
2	589,382	2	537,021	2	549,397
3	630,174	3	527,138	3	525,397
4	558,545	4	595,138	4	571,929
5	569,602	5	560,301	5	515,493
<b>Promedio</b>	572,75	<b>Promedio</b>	552,95	<b>Promedio</b>	537,99
<b>DS</b>	41,82	<b>DS</b>	26,53	<b>DS</b>	22,65

Tabla 5.7. Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

M4) 60 cm/min		M5) 70 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	486,400	1	454,987
2	493,409	2	452,657
3	472,436	3	437,546
4	498,618	4	393,912
5	491,658	5	486,987
<b>Promedio</b>	488,50	<b>Promedio</b>	445,22
<b>DS</b>	9,99	<b>DS</b>	33,86

Tabla 5.8. Valores obtenidos de medición de ZAC luego del corte por plasma para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

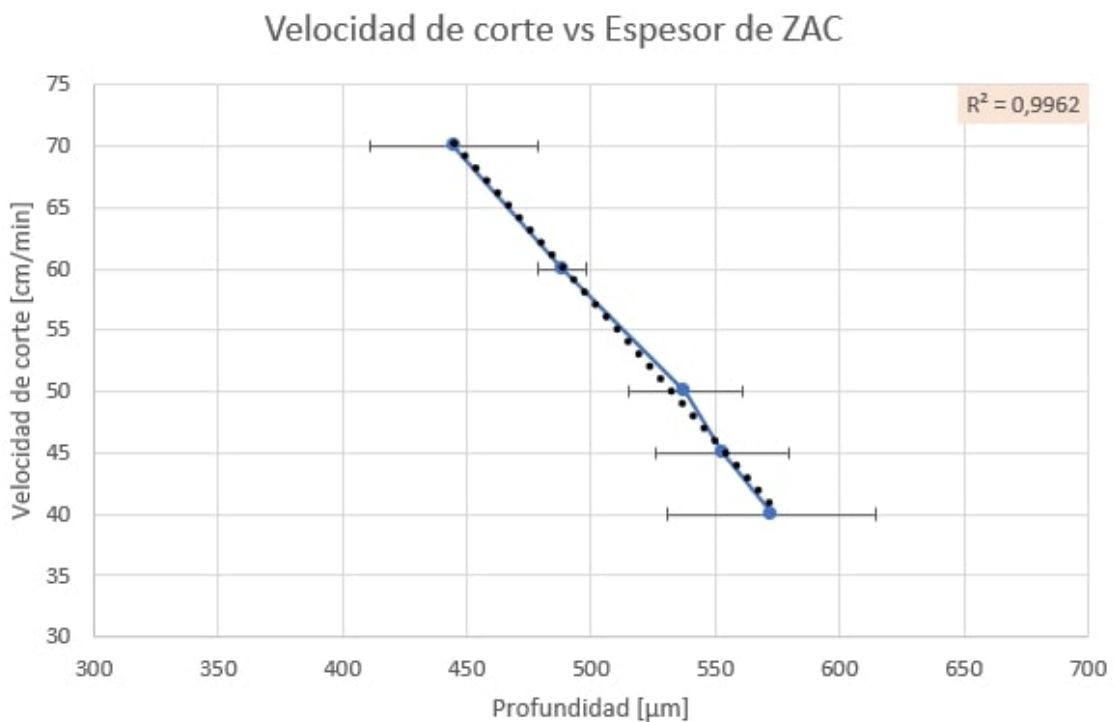


Figura 5.39. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante corte por plasma.

Tal y como se puede observar, la gráfica muestra la recta interpolada de los 5 puntos obtenidos (recta punteada negra), junto al valor de  $R^2$  muy próximo a 1, indicando una correlación lineal entre ambas variables. La profundidad de la ZAC para la velocidad mínima se encuentra alrededor de los 0,57mm, mientras que para la velocidad máxima, este espesor se disminuye, en promedio, a 0,44mm, dando una diferencia de 0,13mm lo cual resulta pequeño considerando que la velocidad máxima es casi el doble que la mínima, y esto podría reducir los tiempos de corte en un 50%. Además, desde el punto de vista

de la integridad de cada superficie, se observó una terminación superficial similar para las 5 velocidades analizadas (Ver Figura 5.7), aunque se obtuvieron valores de  $n$  y  $f$  mejores para 45 y 50 cm/min.

En cuanto a las barras de desvío estándar, se puede observar que hay una importante variabilidad de las mismas. Esto puede estar asociado al criterio asumido para la medición del espesor de la ZAC, donde las mediciones de espesor se realizaron en un plano perpendicular a la dirección del corte, tomando únicamente una zona puntual del material afectado térmicamente, causando una heterogeneidad mayor en el espesor de la ZAC (Ver Figura 4.4).

**2.2.3.2. Oxicorte** Las Figuras 5.40 (a) - (c) muestran las diferentes microestructuras resultantes del acero A36, luego de ser cortado por oxicorte con velocidades de 30, 35 y 40 cm/min, respectivamente.

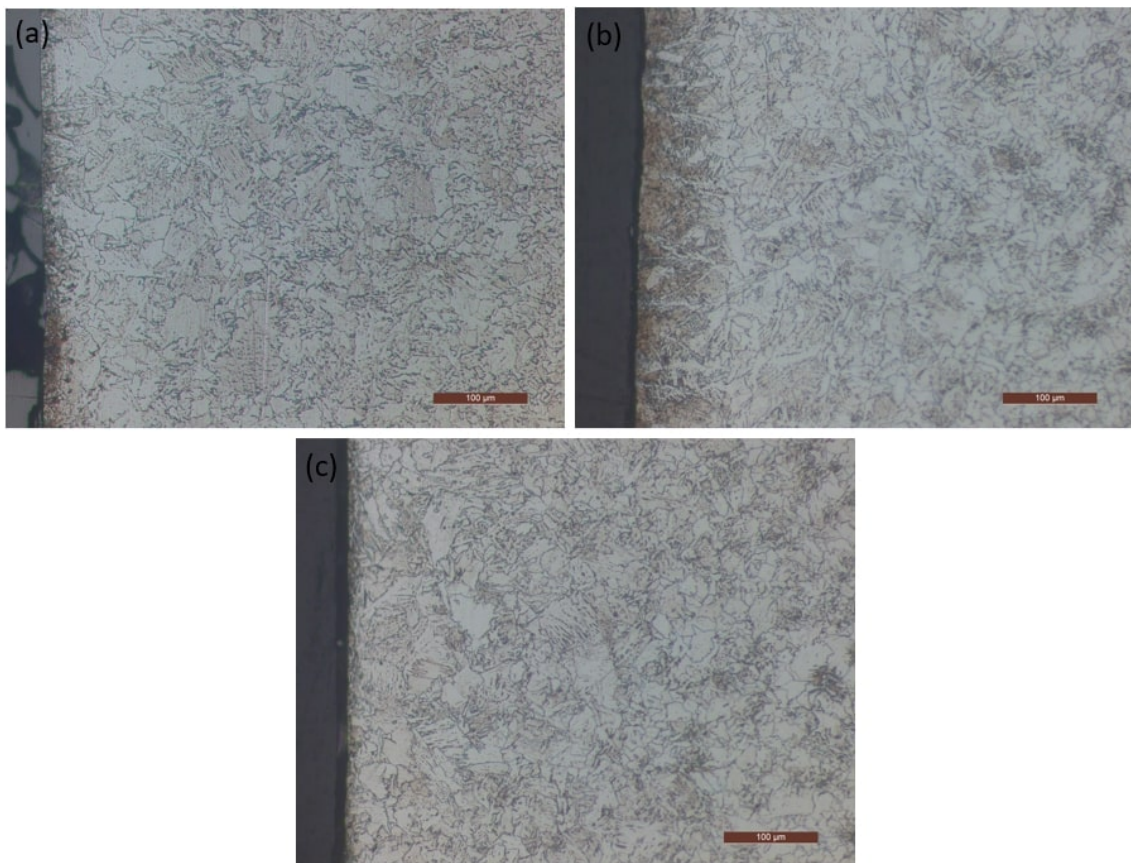


Figura 5.40. ZAC en muestra de A36 cortadas mediante oxicorte: (a) 30 cm/min; (b) 35 cm/min; (c) 40 cm/min. Aumento x200. Ataque químico: Nital al 2%.



Similar a lo observado en el análisis microestructural del corte por plasma en el mismo material, Figura 5.32, la microestructura resultante consta de ferrita Widmanstatten, colonias de perlita gruesa y granos de ferrita de mayor tamaño que el metal base. A diferencia del caso de corte con plasma, no es visible la primera capa resolidificada, posiblemente a causa de que las temperaturas de corte son menores y no funden de igual manera el metal base (Boumerzoug, 2010).

Los granos ferríticos resultan ser mucho más grandes que los obtenidos para velocidades menores en el método de corte por plasma. Además, la perlita pierde su morfología de placas, adoptando una forma globular. Luego se puede observar la transición gradual de los granos hasta alcanzar el tamaño original en el metal base, criterio que se utilizó anteriormente para definir el espesor de la zona afectada térmicamente.

**Análisis de estudios obtenidos a través del SEM** Se realizó un mapeo de composición química alrededor de la ZAC en el material afectado por oxicorte. En la Figura 5.41, se visualiza la microestructura en aumento x1000, con los respectivos colores para cada elemento químico mientras que, la Figura 5.42, muestra los elementos por separado.

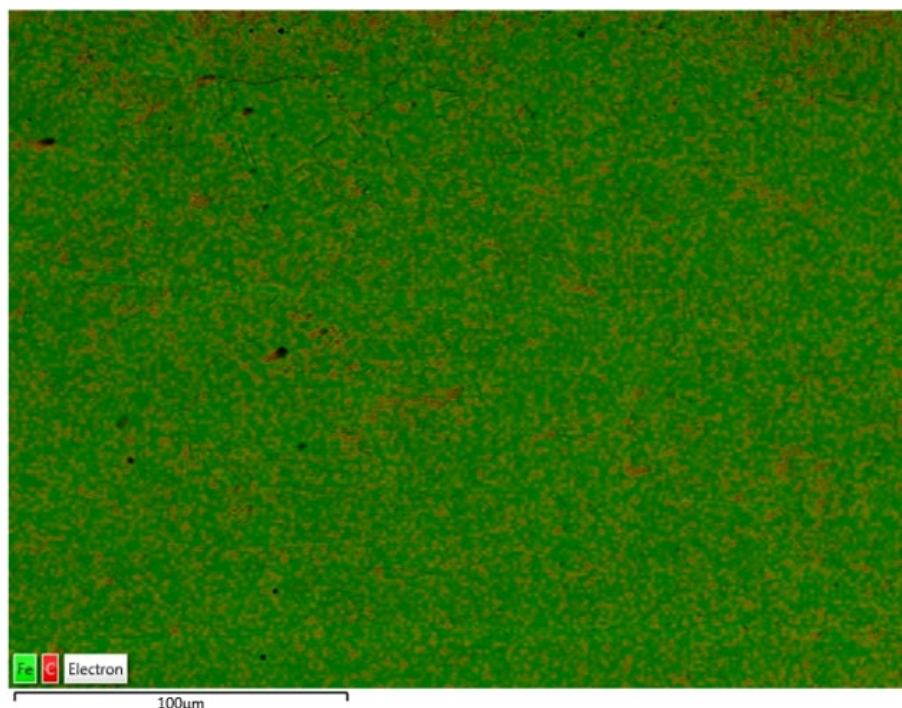


Figura 5.41. Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por oxicorte, con el correspondiente mapeo de colores para identificar zonas de contenido de carbono. Verde = Fe; Rojo = C. Aumento x1000

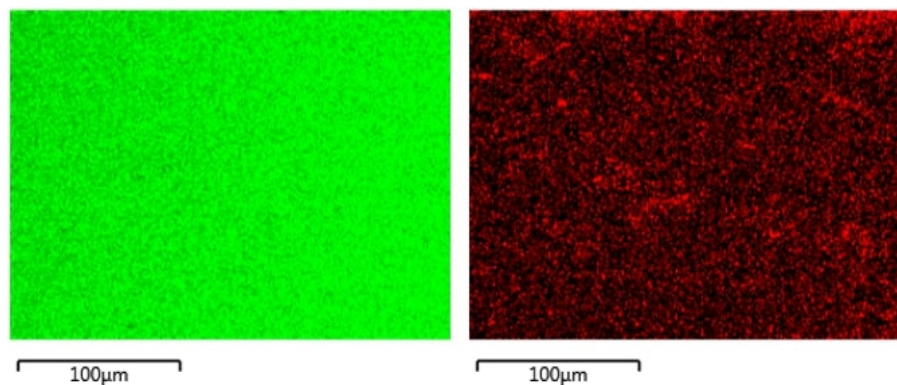


Figura 5.42. Microestructura A36 en borde afectado térmicamente por oxicorte, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Verde = Fe; Rojo = C. Aumento x1000

Diferente al resultado esperado, se puede ver en la Figura 5.42, que el contenido de hierro casi no se vió modificado en el borde de corte, mientras que el contenido de carbono se ve apenas aumentado en algunas zonas adyacentes al borde de corte, posiblemente producto de no considerar la totalidad del borde de corte a la hora de realizar el mapeo.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** En la Figura 5.43 (a) - (c), que representan las mediciones realizadas para velocidades de 30, 35 y 40 cm/min, la profundidad de la ZAC va disminuyendo a medida que se aumenta la velocidad. No se visualizó capa resolidificada en ninguna de las 3 velocidades utilizadas.

A continuación, la Tabla 5.9 muestra las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC del A36 luego del oxicorte, con las respectivas variables estadísticas de promedio y desvío estandar. Luego, la Figura 5.44, muestra la gráfica obtenida de velocidad de corte vs espesor de ZAC, la correlación hallada y las respectivas barras de desvío estándar para cada caso.

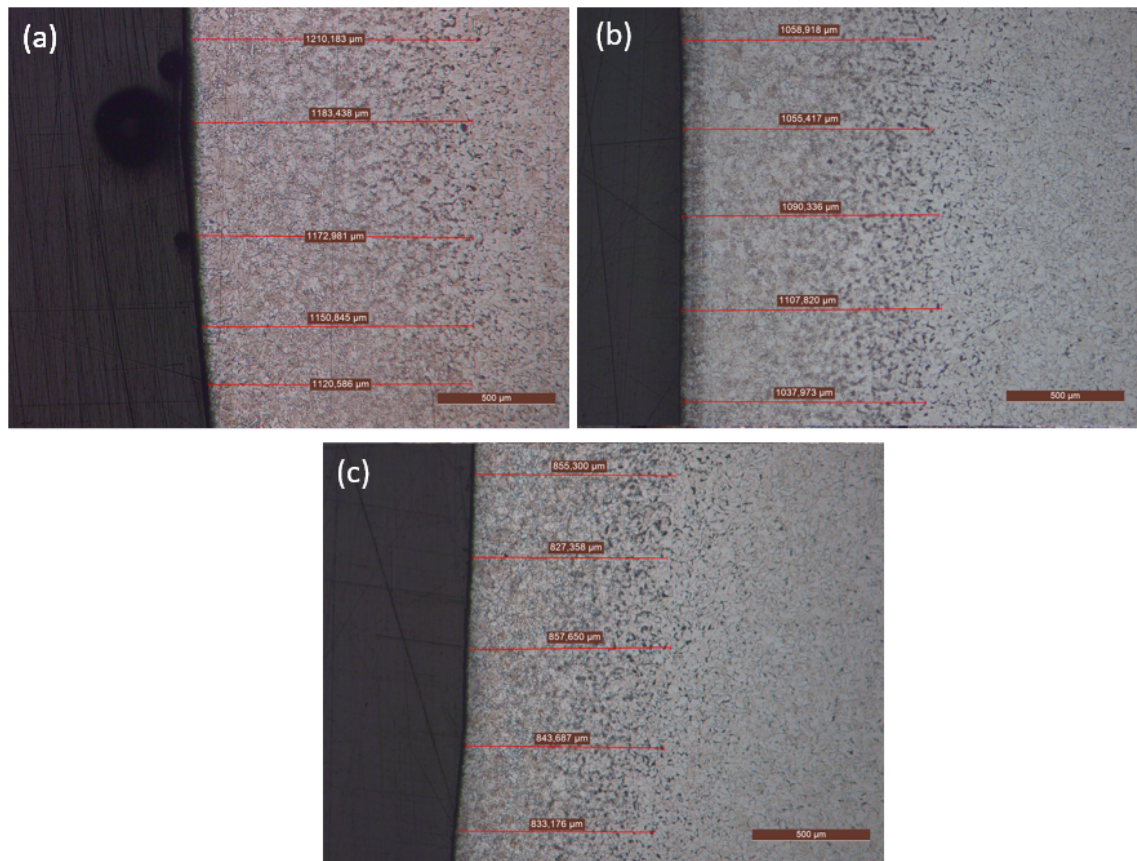


Figura 5.43. Mediciones de espesor de ZAC en oxicorte para acero A36: (a) 40 cm/min, (b) 45 cm/min, (c) 50 cm/min. Aumento x50.

M1) 30 cm/min		M2) 35 cm/min		M3) 40 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	1210,18	1	1058,92	1	855,30
2	1183,44	2	1055,42	2	827,36
3	1172,98	3	1090,34	3	857,65
4	1150,85	4	1107,82	4	843,69
5	1120,59	5	1037,97	5	833,18
<b>Promedio</b>	1167,61	<b>Promedio</b>	1070,09	<b>Promedio</b>	843,43
<b>DS</b>	33,85	<b>DS</b>	28,31	<b>DS</b>	13,29

Tabla 5.9. Valores obtenidos de medición de ZAC luego de oxicorte para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

En este método de corte, se obtuvo nuevamente una correlación lineal de velocidad de corte vs profundidad de zona afectada, esta vez no tan acertada como el caso de corte por plasma, siendo el valor de  $R^2 = 0,95$  aproximadamente. Si se compara con lo obtenido en corte por plasma, se puede ver que la velocidad de corte máxima utilizada en oxicorte, coincide con la velocidad de corte mínima utilizada en PAC. Esto resulta un buen punto de

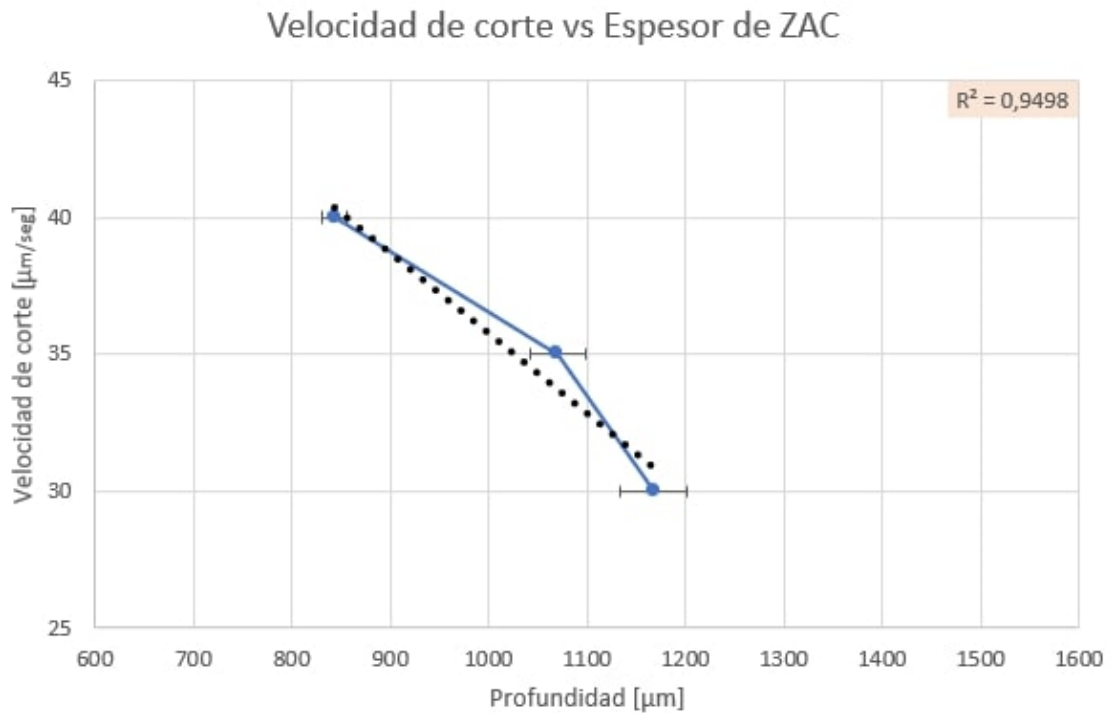


Figura 5.44. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante oxicorte.

comparación, dado que si se analiza el promedio de espesor de ZAC, en el caso de oxicorte resultó ser de 843mm, mientras que para PAC el promedio dió 572mm, lo que representa casi un 30 % menos de zona afectada térmicamente.

Según el criterio utilizado para definir el límite de la ZAC para este material, se puede visualizar cómo la varibilidad de los desvíos estándar resultaron ser mucho menores para oxicorte que para el caso de corte por plasma, como se observó en la Figura 5.39.

**2.2.3.3. Corte por hilo** Las Figuras 5.45 (a) - (c) muestran la alteración que tuvo la microestructura de acero al carbono luego del corte por hilo ante velocidades de corte de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente.

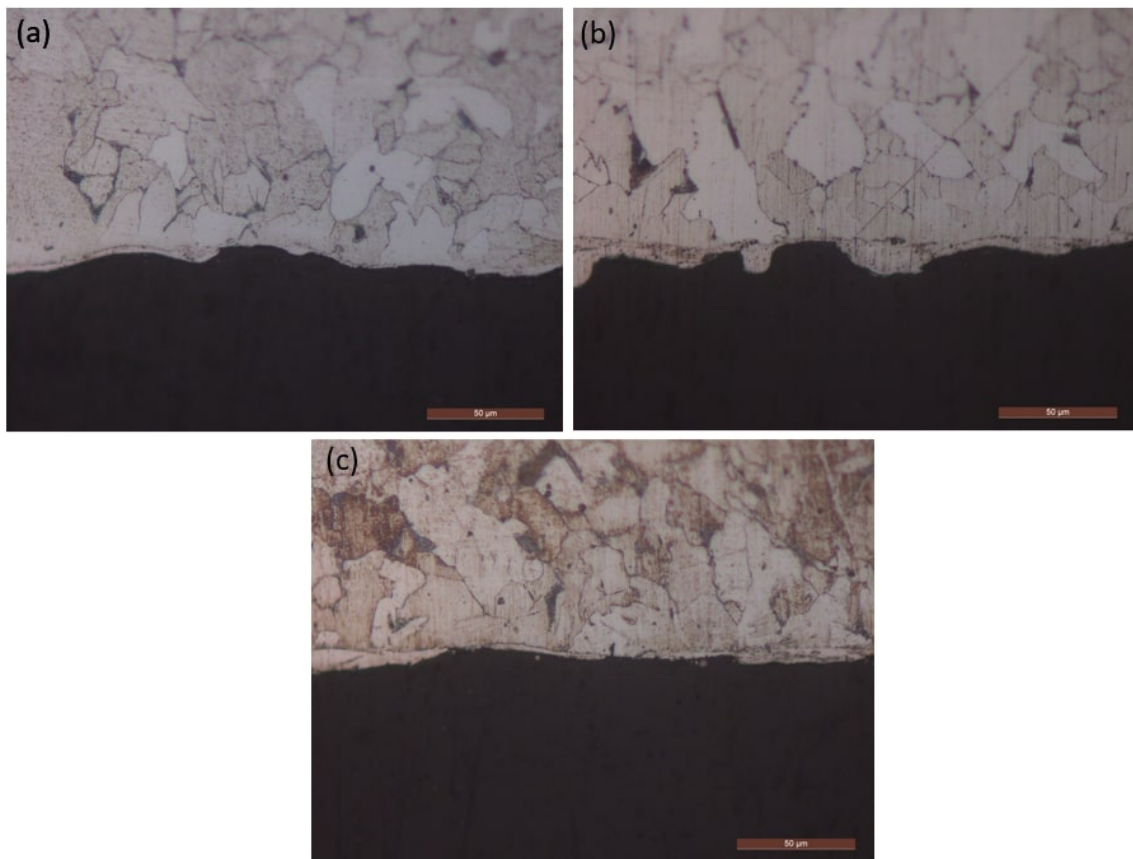


Figura 5.45. ZAC en muestra de A36 cortada mediante corte por hilo: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500. Ataque químico: Nital al 2%.

Similar a lo observado en el acero DSS, la zona afectada por calor resulta ser muy pequeña. Los granos ferríticos se ven cortados por esta pequeña capa, la cual es generada por las propias chispas causadas por el hilo.

**Análisis de resultados obtenidos a través de SEM** Dado que mediante microscopía óptica no se observó con claridad una superficie afectada térmicamente por el corte, no se realizó análisis a través de microscopía electrónica de barrido.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** Las Figuras 5.46 (a) - (c) y 5.47 (a) - (b) muestran las mediciones en el espesor de ZAC resultantes. Para las velocidades de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , fue necesario recurrir a más de una imagen para determinar el promedio de espesor de ZAC, dado que no se veía con claridad el borde afectado. A diferencia de otros materiales cortados con este método, este borde afectado sí fue atacado químicamente, lo cual dificultada denotar su límite. Por tal motivo, en la Figura 5.46 (a) y (b) se representan las mediciones de la ZAC para una velocidad de corte

por hilo de  $20 \mu\text{m}/\text{seg}$ , mientras que la Figura 5.46 (c), representa el corte a la velocidad de  $30 \mu\text{m}/\text{seg}$ . En las Figuras 5.47 (d) y (e) se muestran los valores obtenidos para una velocidad de corte de  $40 \mu\text{m}/\text{seg}$ .

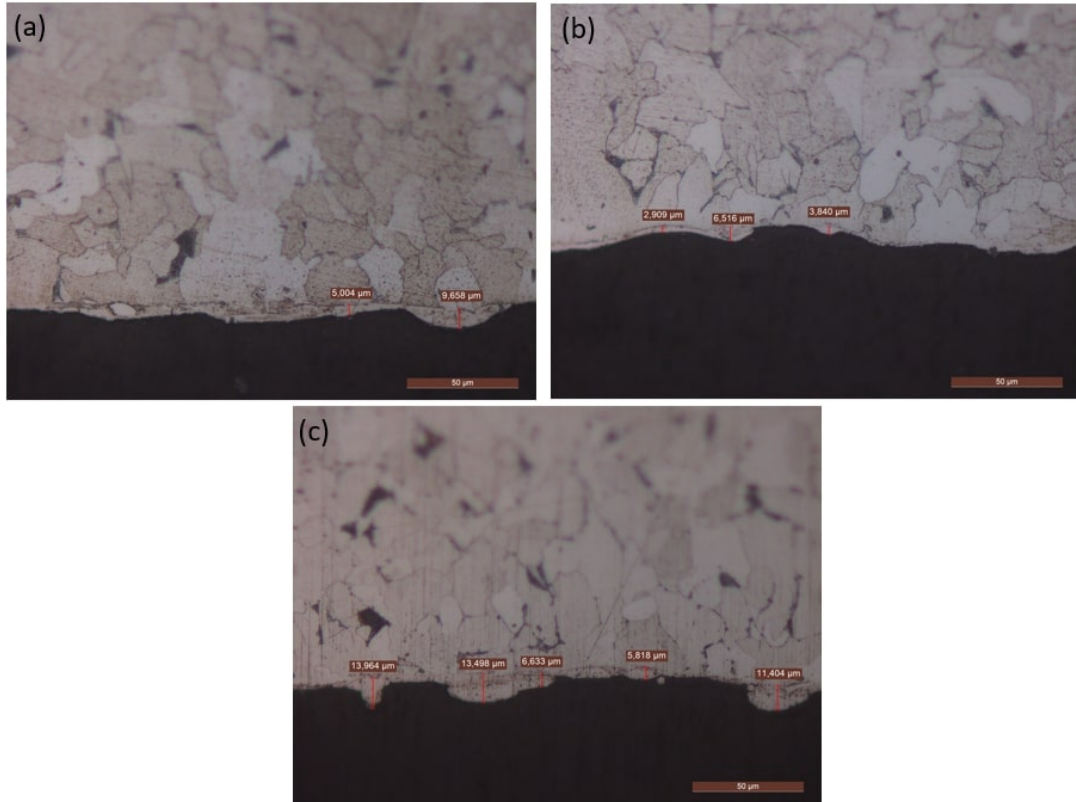


Figura 5.46. Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para acero A36: (a) y (b)  $20 \mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c)  $30 \mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500

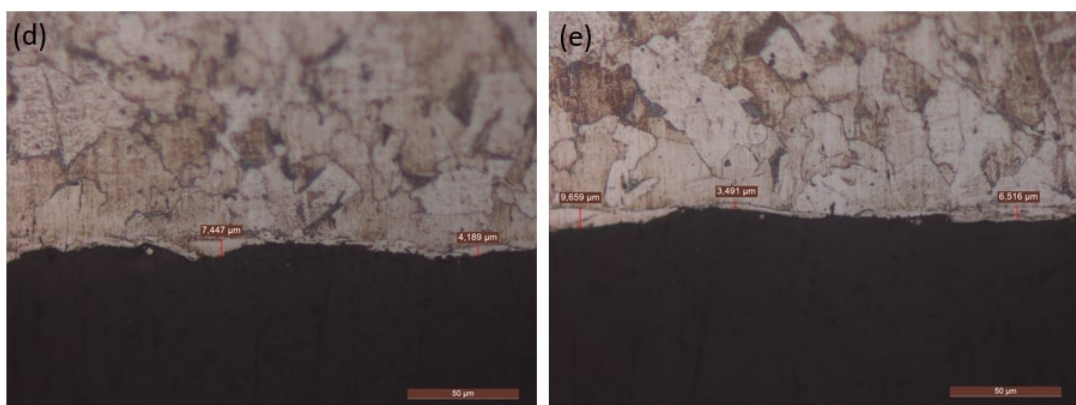


Figura 5.47. Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para acero A36: (a) y (b)  $40 \mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento x500

La Tabla 5.10, lista las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC para el acero A36 luego del corte por hilo. Dentro de la tabla, se agregan las respectivas variables

estadísticas de promedio y desvío estándar. Por otro lado, la Figura 5.48, muestra la gráfica que correlaciona la velocidad de corte vs el espesor de ZAC resultante, con las respectivas barras de desvío estándar para cada punto.

M1) 30 cm/min		M2) 35 cm/min		M3) 40 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	2,909	1	13,964	1	7,447
2	6,516	2	13,498	2	4,189
3	3,84	3	6,633	3	9,659
4	5,004	4	5,818	4	6,516
5	9,684	5	11,404	5	3,491
<b>Promedio</b>	5,59	<b>Promedio</b>	10,26	<b>Promedio</b>	6,26
<b>DS</b>	2,66	<b>DS</b>	3,82	<b>DS</b>	2,50

Tabla 5.10. Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por hilo para A36, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

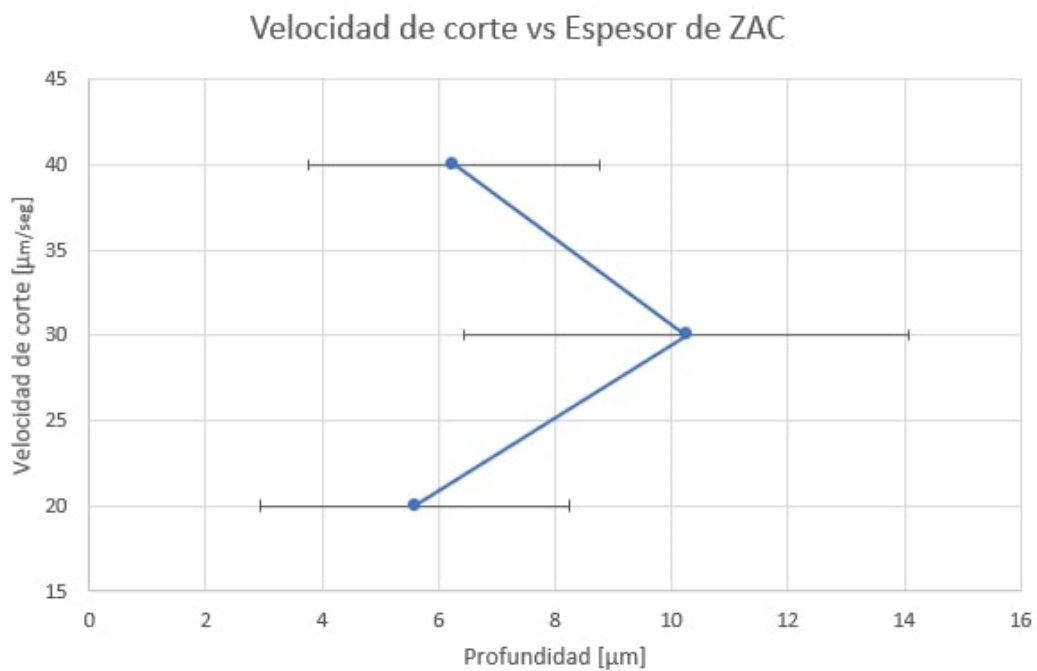


Figura 5.48. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para A36 cortado mediante corte por hilo.

En términos generales, los valores obtenidos no difieren en gran medida con los que se midieron para aceros inoxidables dúplex. Esto no es un detalle menor, no sólo por la diferencia que existe entre los materiales (composición química, microestructura, propiedades mecánicas), sino también por el espesor de chapa de cada uno, siendo el espesor de chapa del acero al carbono, el doble que la del acero inoxidable dúplex.

Se puede observar a simple vista que la gráfica no presenta correlación alguna. Se obtuvo un mayor espesor de zona afectada para la velocidad intermedia, que para la velocidad mínima, lo cual es opuesto a la tendencia que se ve en los otros dos métodos. El propio hilo que provoca la chispa que va erosionando el metal, genera una superficie irregular por el propio intervalo entre pulsos que existe, y que se puede agravar en mayor o menor medida según los defectos que presente el propio metal (inclusiones, defectos, irregularidades, etc.). Esto es una gran diferencia respecto a los otros dos métodos de corte, donde allí es indistinto si el material presenta algún defecto, dado que el corte es continuo y funde todo lo que se encuentra en la dirección del corte.

Aún así, los valores promedios de espesor de ZAC en el material resultan ser muy pequeños e insignificantes, siendo la máxima profundidad de aproximadamente  $10\ \mu\text{m}$ , y habiendo una diferencia de casi  $5\ \mu\text{m}$  entre el espesor máximo y el mínimo.

#### **2.2.4 Acero aleado**

El acero aleado, al igual que el acero al carbono, pudo ser seccionado por los 3 métodos de corte para el análisis. En este caso, dado que el espesor de chapa era de 1", se experimentaron limitaciones en la máquina de PAC a la hora de realizar los cortes. Por tal motivo, se emplearon velocidades de avance muy bajas en comparación con el resto de los materiales. El railtrac ESAB utilizado para automatizar el método, tiene como velocidad de avance mínima 10 cm/min. A continuación se presentan los resultados obtenidos para este material.

**2.2.4.1. Corte por plasma** En las Figuras 5.49 (a) - (c), se visualizan las consecuencias de la aplicación de calor en un acero de carbono medio con una cantidad de aleantes mucho mayor al de un acero A36. Las velocidades utilizados en este método de corte fue de 10 cm/min, 15 cm/min y 20 cm/min, respectivamente. Luego, en la Figura 5.50, se observa de manera ampliada la microestructura resultante, con recuadros rojos de las 3 zonas a analizar.



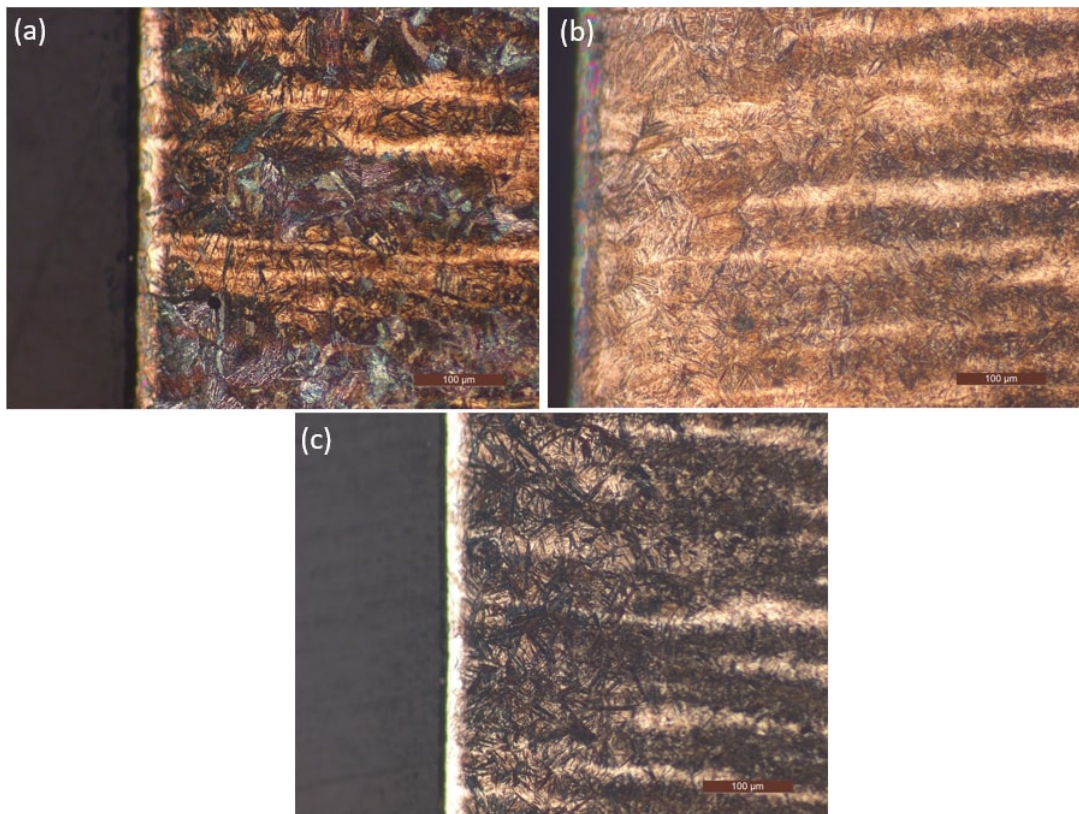


Figura 5.49. ZAC en muestras de 4140 cortadas mediante plasma: (a) 10 cm/min; (b) 15 cm/min; (c) 20 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%.

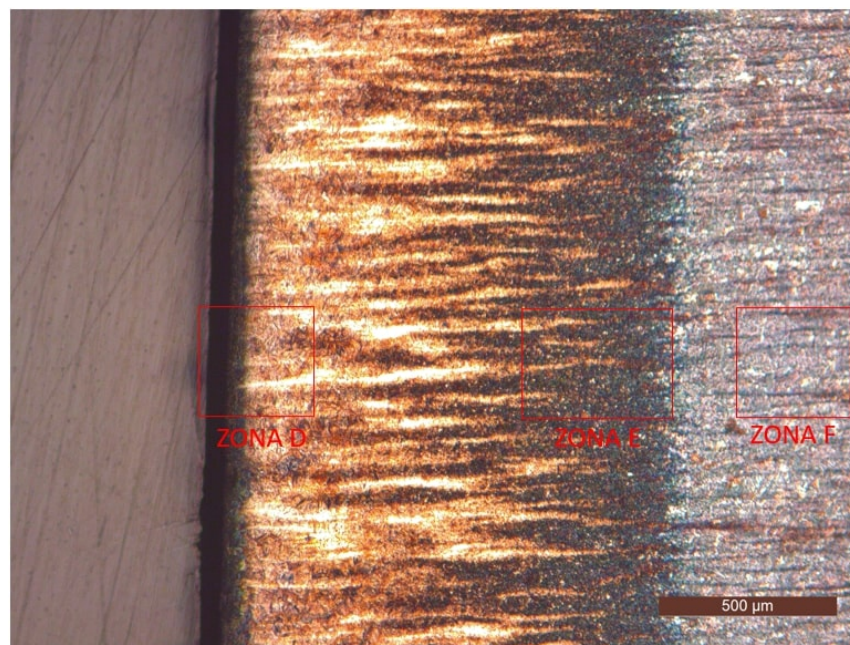


Figura 5.50. ZAC en muestra de 4140 cortada mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento de x50. Ataque químico: Nital al 4%.

Al igual que para el ASTM A36, se pueden observar 3 capas: la primer capa que pareciera ser una capa carburizada (ZONA D); una segunda zona donde se observa que cerca de la superficie, donde la velocidad de enfriamiento es mayor, se distinguen microestructuras martensíticas, y lejos de la superficie, donde la velocidad de enfriamiento es menor, se observa una transición con diferentes microestructuras que podrían corresponder a microestructuras del tipo bainíticas (ZONAS E y F) (Aldazabal, 2018). Las Figuras 5.51, 5.52 y 5.53, muestran de manera ampliada las zonas D, E y F, respectivamente.

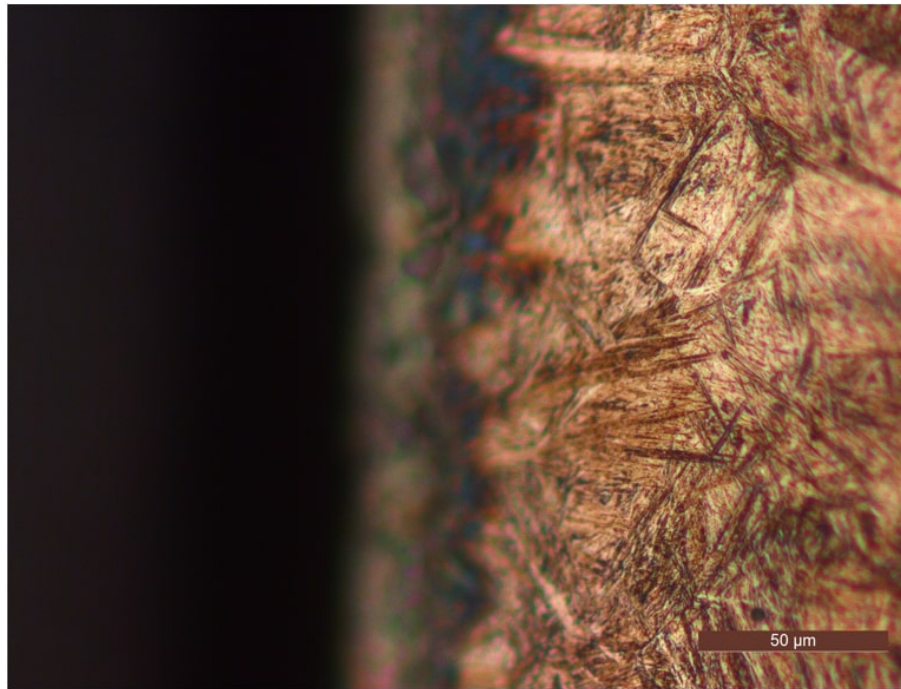


Figura 5.51. ZONA D de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500.

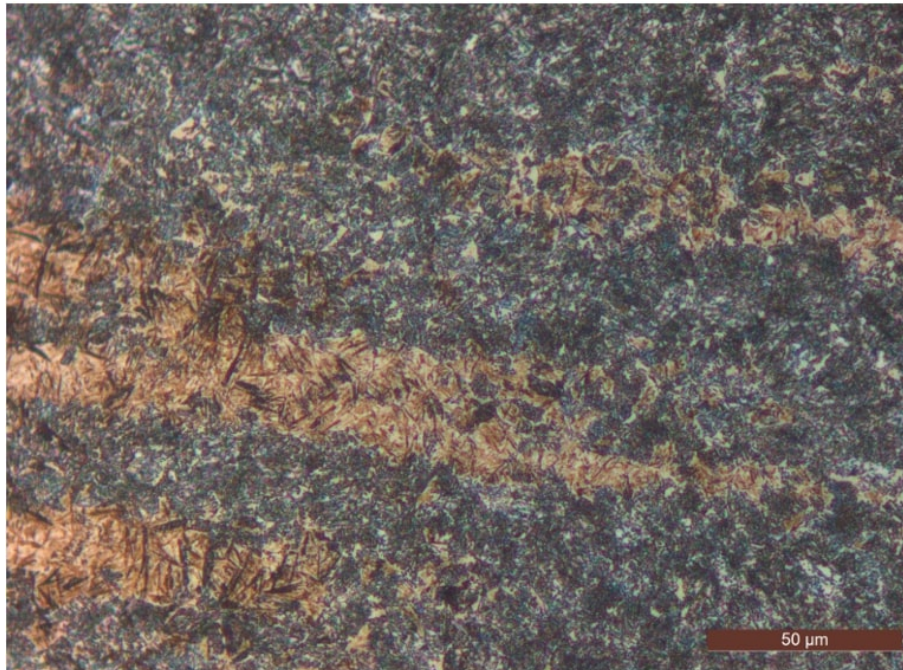


Figura 5.52. ZONA E de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500.

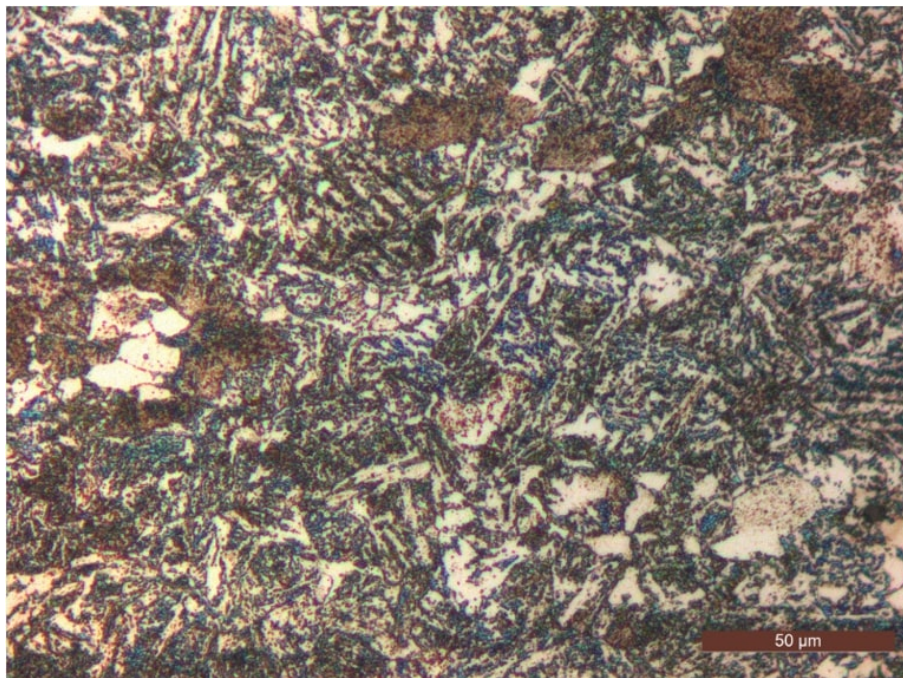


Figura 5.53. ZONA F de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante plasma para una velocidad de 15 cm/min. Aumento x500.

A diferencia de la microestructura caracterizada en la sección 1.4, sobre la ZONA F, se observa que la perlita fina se vió modificada, además de que no se observaron las bandas de microsegregación caracterizadas anteriormente (Ver Figura 5.53). La explicación de esto se debe a que, dado el espesor que presenta la pieza, el cual es muy elevado a comparación del resto de las chapas, se presenta un gradiente de temperaturas a lo largo de la muestra más elevado, y por mayor tiempo, producto del propio método de corte. Este enfriamiento es tal que, si se considera el diagrama CCT (Del acrónimo en inglés, *Continuous Cooling Transformation*) de este material, el mismo estaría pasando por encima de la nariz de transformación perlítica, a un ritmo de variación de tiempo/temperatura alto (Callister Jr y Rethwisch, 2018).

En la Figura 5.49 (a), dónde se representa el efecto térmico bajo la menor velocidad, se ve cómo la microestructura en el borde de corte presenta una combinación entre martensita en forma de aguja, y partes de estructura bainítica, por lo mencionado anteriormente (Internacional, 2004c).

Resulta interesante destacar que en las próximas dos velocidades, 5.49 (b) y (c), las consecuencias sobre el lado de corte resultaron ser más severas, dado que se observa una cantidad de microestructura martensítica mucho mayor. Esto se puede explicar dado que a mayor velocidad, y por ende, menor aporte térmico, el tiempo de exposición a altas temperaturas de la pieza es menor, lo cual son factores que favorecen la formación de martensita en forma de aguja (o en inglés, *needle martensite*)

En la sección 1.4, también se destacó dentro de la microestructura del metal base, bandas de microsegregación, los cuales tuvieron su participación en la transformación microestructural, y se pueden visualizar en bandas claras. En la Figura 5.52, se observa en detalle la transición del metal afectado térmicamente, desde la microestructura martensítica a la microestructura bainítica (Callister Jr y Rethwisch, 2018).

**Análisis de resultados obtenidos a través de SEM** Con el objetivo de identificar si la ZONA D de la Figura 5.50 es una capa carburizada, se realizó una línea de medición de composición química que cruza todo el espesor de la ZAC hasta alcanzar el metal base. La Figura 5.54 muestra la microestructura resultante y la línea de medición propiamente dicha, mientras que la Figura 5.55, muestra los resultados obtenidos de dicha medición.

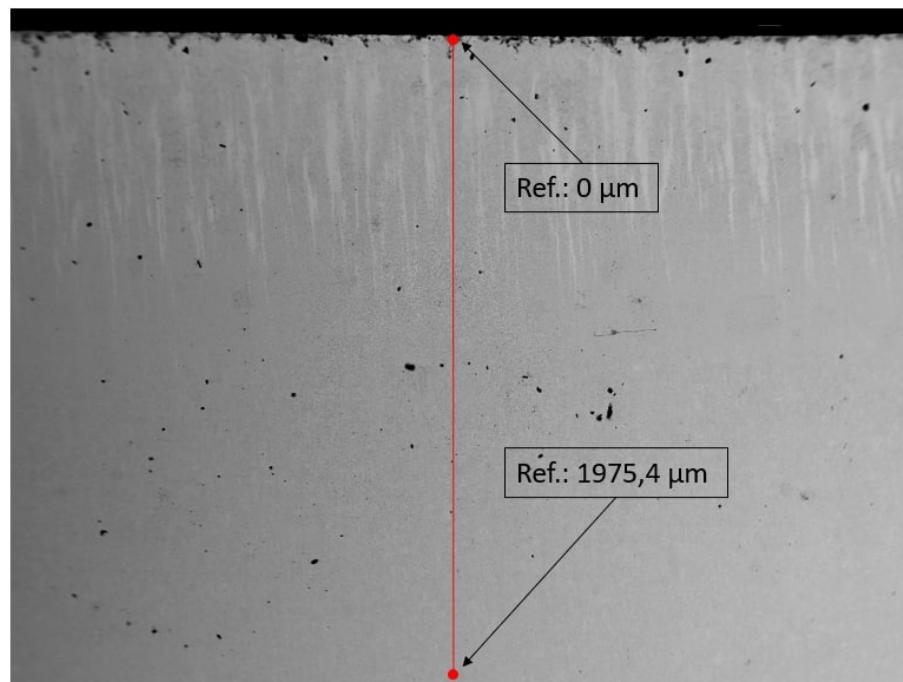


Figura 5.54. Microestructura de AISI 4140 en borde afectado térmicamente por PAC con la respectiva línea de medición de CQ. Aumento x60.

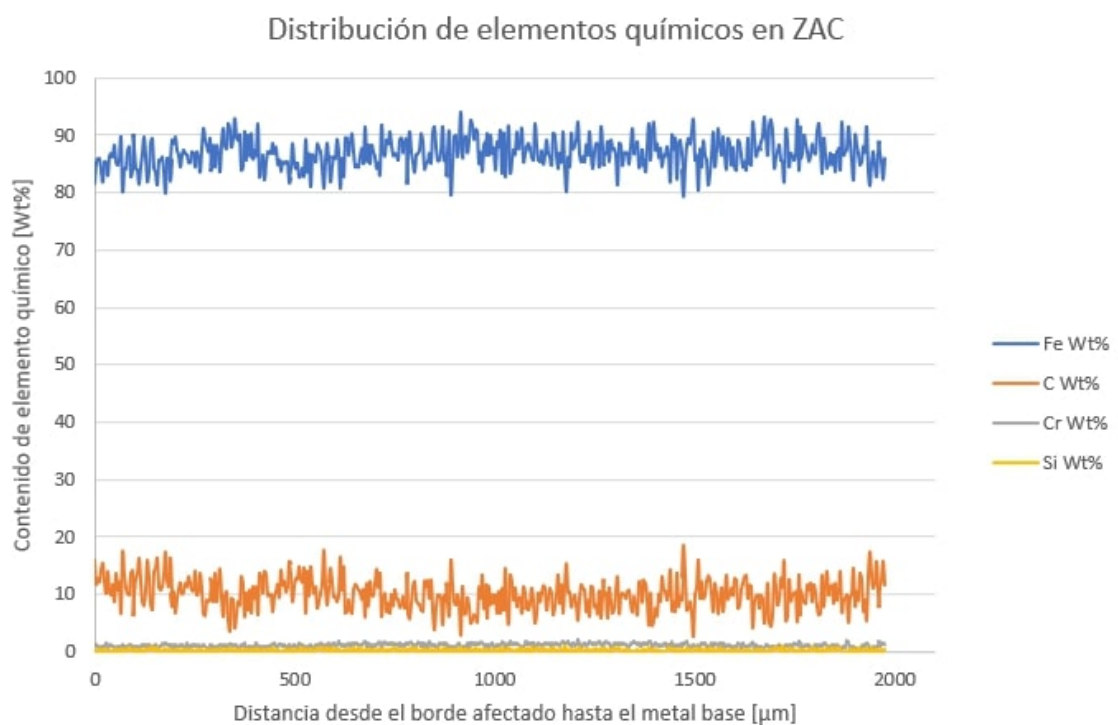


Figura 5.55. Gráfica de medición de CQ a lo largo del espesor de ZAC, para el 4140 cortado mediante PAC.

A grandes rasgos, no se ven variaciones notorias de la composición química a lo largo de la ZAC para este caso. Sí se puede observar que sobre el borde adyacente al corte, se presenta entre 0 y 400  $\mu\text{m}$ , una cantidad menor del contenido de Fe, y mayor del contenido de carbono, respecto al resto de la línea de medición. Esto se puede deber a la carburización localizada del proceso dada la alta temperatura. Nuevamente, la carburización generada por el método de corte con plasma, será mucho menor a la que se observe en el método de oxicorte, dado que no se presenta la atmósfera de gases ricos en carbono, provocando que los cambios sean mayormente microestructurales (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** Las Figuras 5.56 (a) - (c), muestran las 5 mediciones tomadas en cada caso, para cada velocidad de corte. Para este material y este método de corte, se consideró la toma de mediciones en la ZAC hasta dónde finaliza la región indicada como ZONA E.

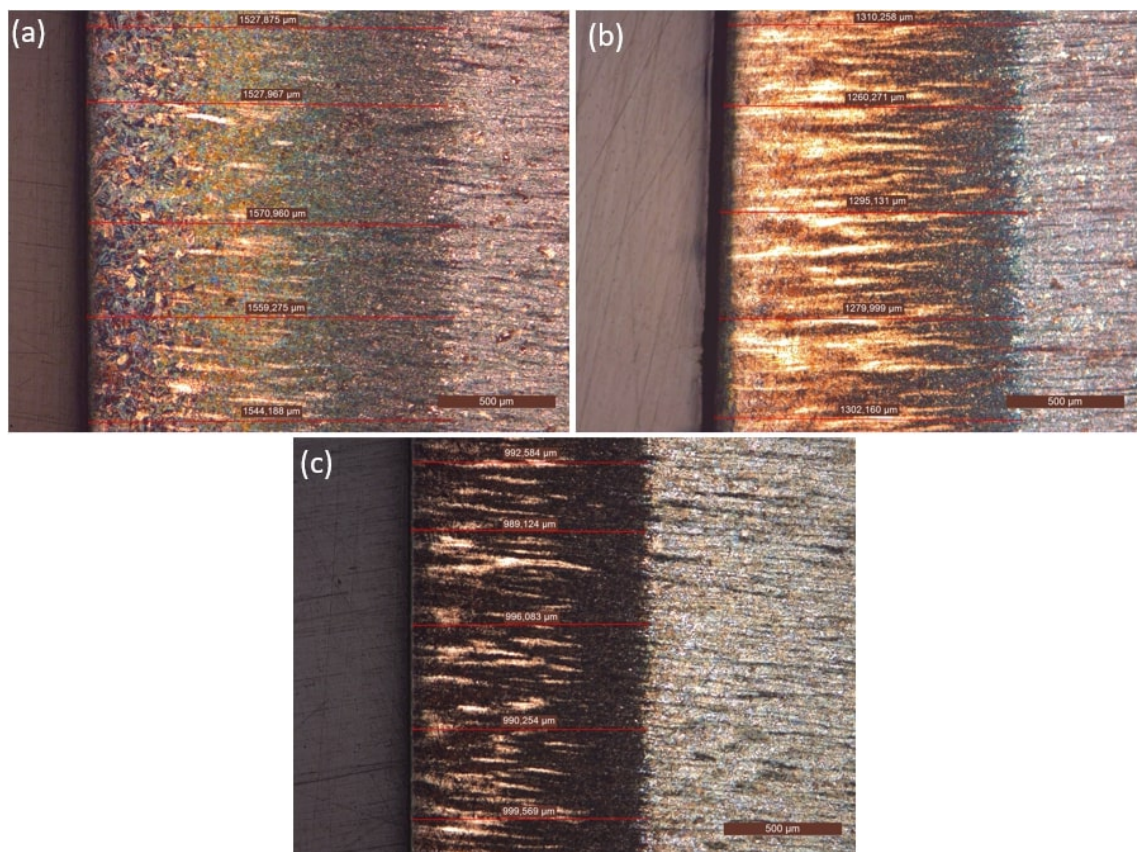


Figura 5.56. Mediciones de espesor de ZAC en corte por plasma para las distintas velocidades de corte en 4140: (a) 10 cm/min; (b) 15 cm/min; (c) 20 cm/min. Aumento x500.

Por otro lado, la Tabla 5.11, muestra los distintos valores obtenidos de las variables estadísticas, tanto de promedio como de desvío estándar. Por último, en la Figura 5.57, se visualiza la gráfica obtenida a partir de las variables de velocidad y espesor de ZAC.

M1) 10 cm/min		M2) 15 cm/min		M3) 20 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	1527,875	1	1310,258	1	992,584
2	1527,967	2	1260,271	2	989,124
3	1570,960	3	1295,131	3	996,083
4	1559,275	4	1279,999	4	990,254
5	1544,188	5	1302,160	5	3999,569
<b>Promedio</b>	1546,05	<b>Promedio</b>	1289,56	<b>Promedio</b>	993,52
<b>DS</b>	19,08	<b>DS</b>	19,80	<b>DS</b>	4,30

Tabla 5.11. Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por plasma para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

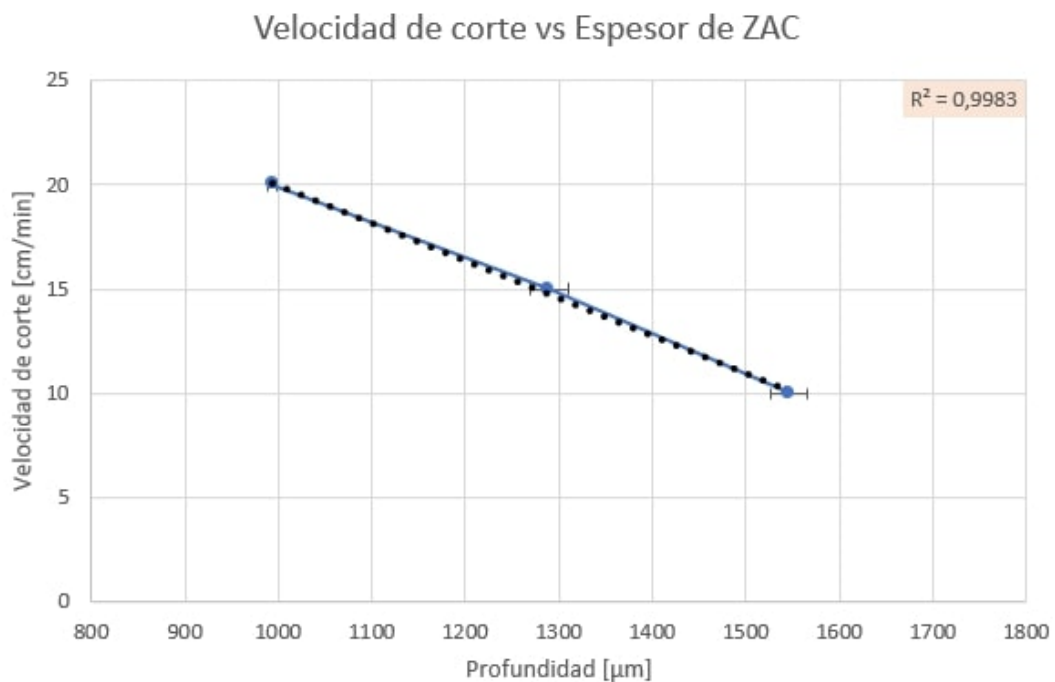


Figura 5.57. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante corte por plasma.

Nuevamente, para el método de corte por plasma, Figura 5.57, se visibilizó una tendencia lineal entre velocidad de corte y espesor de ZAC, con un  $R^2$  muy próximo a 1. No es un detalle menor que incluso, ante la velocidad de corte más elevada, y por ende, menor espesor de ZAC, el promedio dió cercano a 1 mm. Desde un punto de vista de propiedades mecánicas, y teniendo en cuenta que la martensita sin revenir presenta altos niveles

de dureza y fragilidad, esto puede ser un factor contraproducente para el desempeño del material en servicio.

Dada la uniformidad que presenta este método de corte, y la magnitud que presenta el espesor de la ZAC, las barras de desvío estándar resultaron ser muy pequeñas, indicando una variabilidad baja.

**2.2.4.2. Oxicorte** Las Figuras 5.58 (a) - (c), muestran las variaciones microestructurales obtenidas en el acero AISI 4140, luego de ser particionadas mediante oxicorte, con velocidades de 25, 30 y 35 cm/min, respectivamente. Luego, sobre la Figura 5.59, se visualiza de manera ampliada, la microestructura resultante sobre una de las muestras.

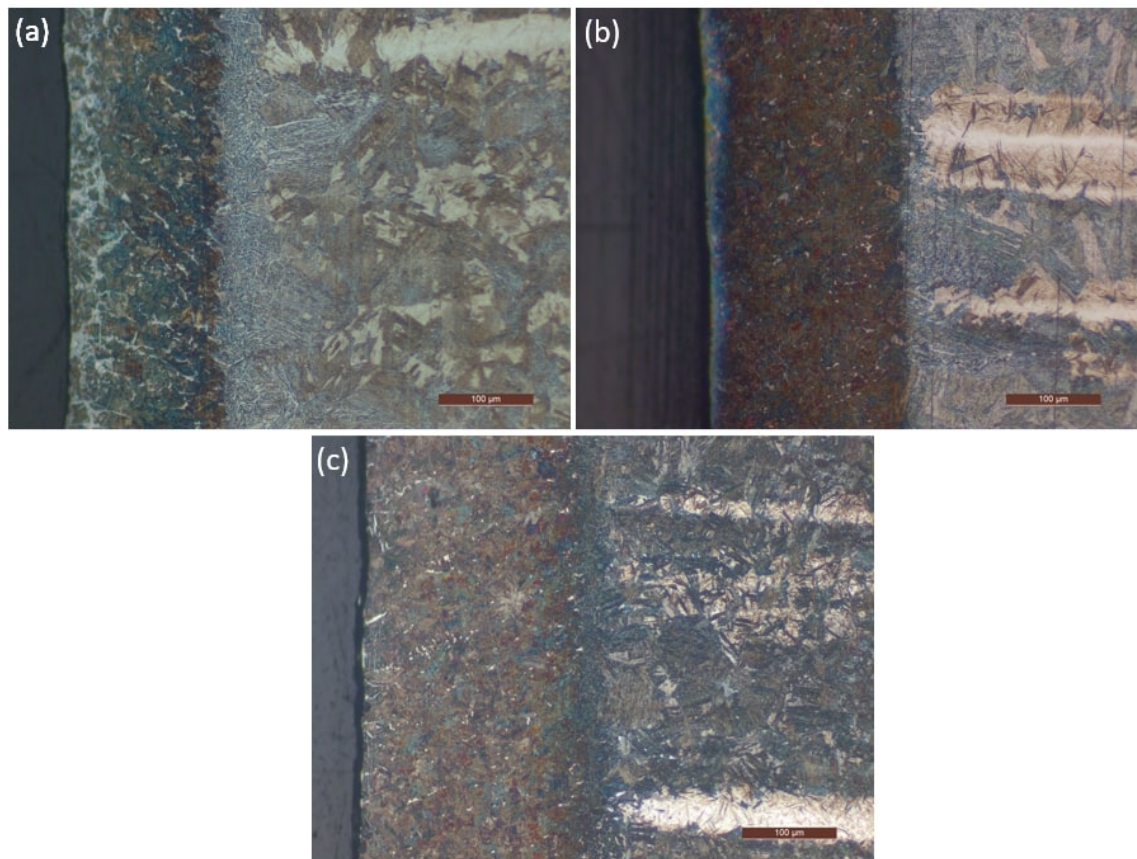


Figura 5.58. ZAC en muestras de 4140 cortadas mediante oxicorte: (a) 25 cm/min; (b) 30 cm/min; (c) 35 cm/min. Aumento de x200. Ataque químico: Nital al 4%.



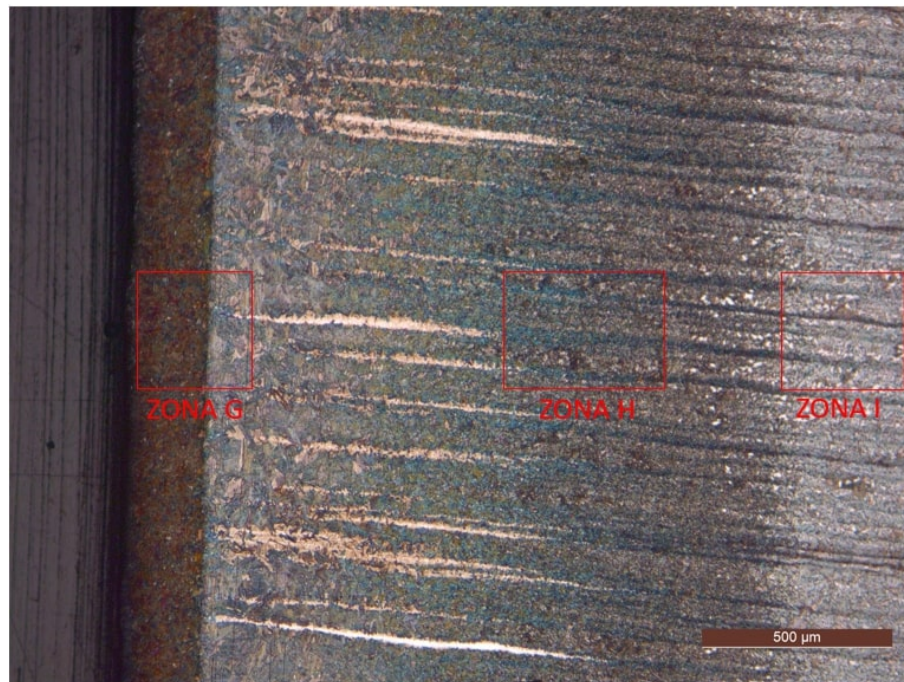


Figura 5.59. ZAC en muestras de 4140 cortada mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min. Aumento de x50. Ataque químico: Nital al 4%.

Al igual que para el caso de corte por plasma, sobre la Figura 5.59 se pueden visualizar 3 capas afectadas térmicamente: (1) una zona que pareciera estar carburizada, la cual es notablemente mayor a la obtenida en corte por plasma (ZONA G); (2) una capa dónde se presentan cambios microestructurales de martensita y bainita (ZONA H) y; (3) la variación gradual de bainita (ZONA I) (Tingaev y Gubaydulin, 2016). Las Figuras 5.60, 5.61 y 5.62, representan en mayor detalle las zonas G, H y I mencionadas anteriormente.

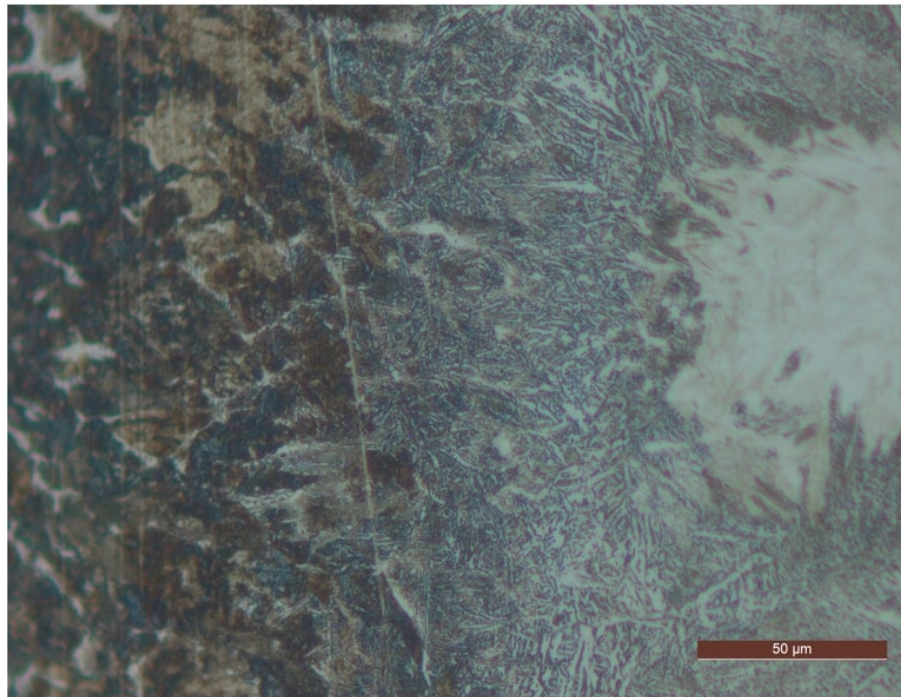


Figura 5.60. ZONA G de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min.

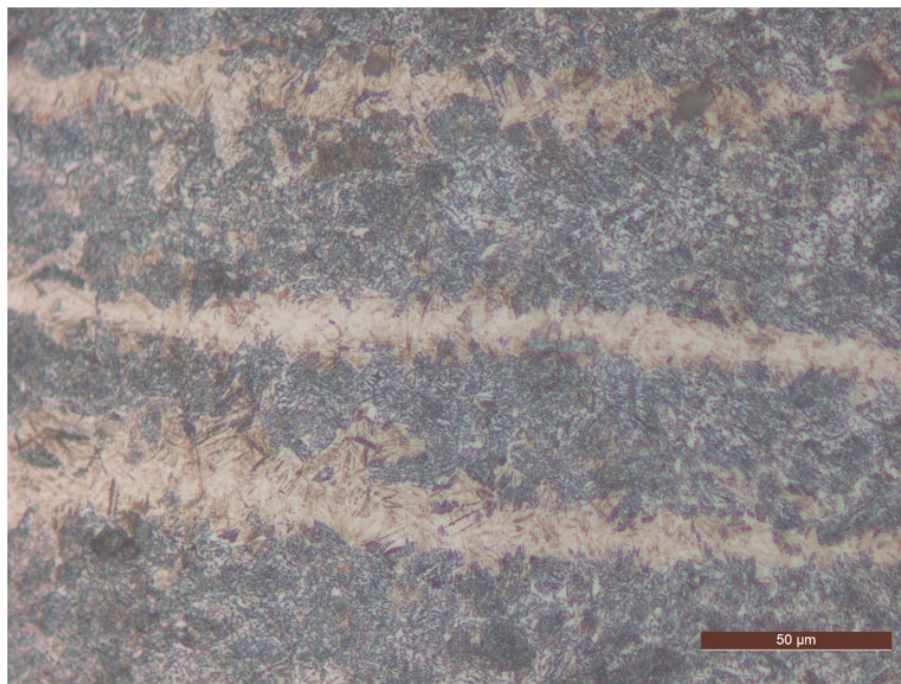


Figura 5.61. ZONA H de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min

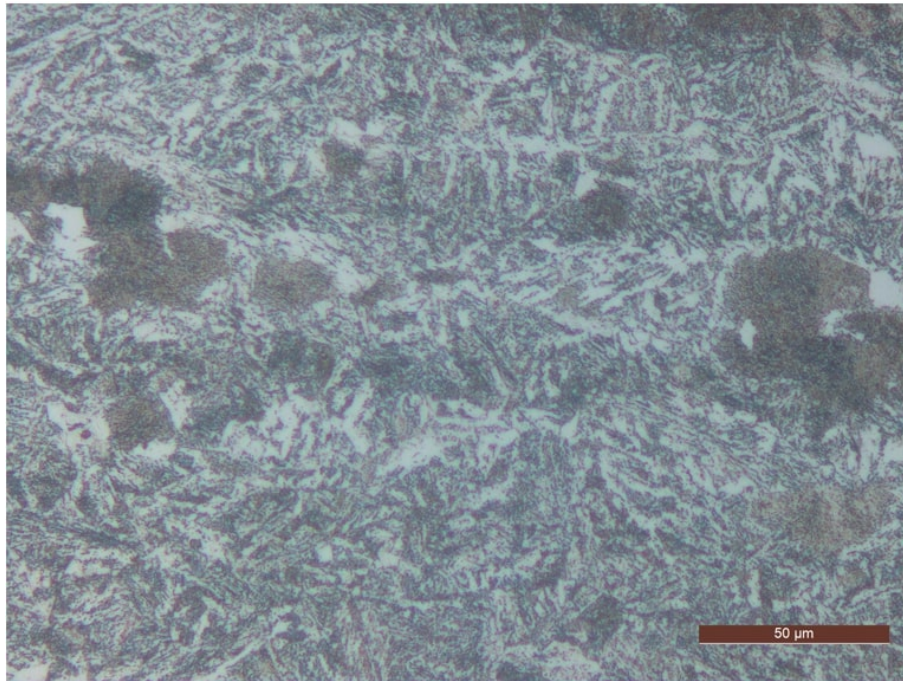


Figura 5.62. ZONA I de muestra de ZAC en 4140 cortado mediante oxicorte para una velocidad de 30 cm/min

Es notoria la diferencia que presenta lo que pareciera ser una zona carburizada para el mismo material en el caso de corte por plasma (Figuras 5.49 (a) - (c)) y el caso de oxicorte (Figuras 5.58 (a) - (c)). Dado que el oxicorte involucra altas temperaturas y utilización de gases que contienen oxígeno y carbono, es más propenso a generar aumento del contenido de carbono en esta zona. Otro factor a destacar, es que el espesor de esta zona G, no está asociada a la velocidad de corte utilizada, sino más bien está relacionada con el tiempo de calentamiento de la pieza que se da previo al corte. Por tal motivo, no se observa una correlación lineal (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

Fuera de la zona sobrecalentada, se puede visibilizar con claridad las bandas blancas de microestructura martensítica en forma de aguja. Por otro lado, es interesante remarcar que, en comparación con el método de corte por plasma, se observa mayor contenido de microestructura baínítica fuera de las bandas blancas mencionadas. Si bien las velocidades de corte en oxicorte eran mayores a las de corte por plasma, y por ende, era menor el tiempo de exposición a altas temperaturas, el corte por oxígeno y gas tiene un gradiente de temperatura no tan localizado, además de ser más prologado a lo largo de la pieza, dado el propio precalentamiento que se le da al material previo a ser cortado. Esto provoca que la curva de enfriamiento no sea tan brusca, y sólo se observe una microestructura martensítica en las zonas dónde previamente se identificó microsegregación (Aldazabal, 2018).

En la Figura 5.61, se puede visualizar la transición entre las bandas de microsegregación que transformaron a martensita y el metal base, de manera muy similar a lo observado en la Figura 5.52.

Por otro lado, en la Figura 5.62, se puede observar la misma modificación microestructural que la obtenida en el mismo material para el seccionamiento mediante arco de plasma, dónde la perlita fina caracterizada en la sección 1.4 se vió alterada por el ciclo térmico del método.

**Análisis de resultados obtenidos a través de SEM** Similar al análisis realizado para el método de corte por plasma para este material, se realizó nuevamente una línea de medición de composición química que cruza el espesor de la ZAC hasta el metal base, para determinar si la ZONA G se carburizó. La Figura 5.63, muestra la microestructura resultante del corte, en conjunto con la línea de medición considerada. Por otro lado, la Figura 5.64, muestra la gráfica de los resultados obtenidos de las medicion de cada elemento químico a lo largo de la misma.

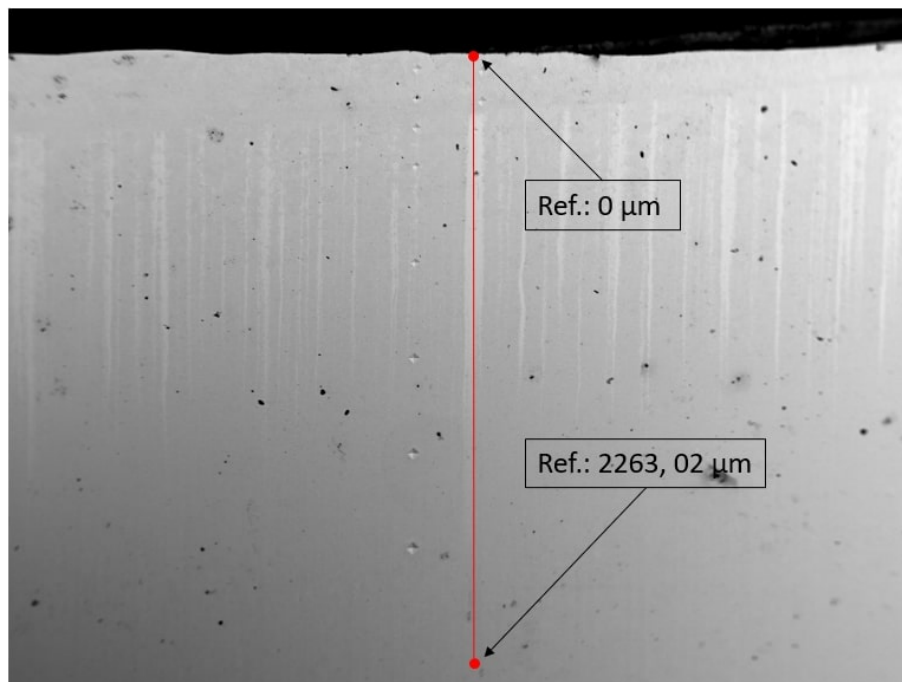


Figura 5.63. Microestructura de AISI 4140 en borde afectado térmicamente por OXICORTE con la respectiva línea de medición de CQ. Aumento x60.

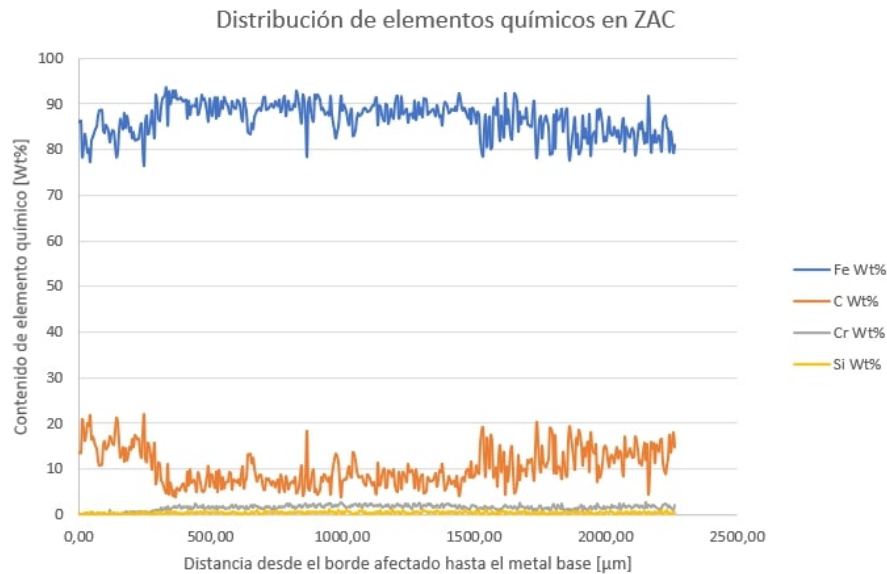


Figura 5.64. Gráfica de medición de CQ a lo largo del espesor de ZAC, para el 4140 cortado mediante OXICORTE.

Es interesante remarcar en la Figura 5.64, entre  $0\mu\text{m}$  y aproximadamente  $300\mu\text{m}$ , como los valores de hierro, carbono y cromo se vieron alterados por la atmósfera generada por el método. El hierro y el carbono presentan tendencia opuesta, siendo creciente y decreciente, respectivamente. Los valores del carbono se encuentra muy por encima de lo esperados en la CQ del material. Además el contenido de cromo es casi nulo en este mismo rango, producto de la propia formación de óxidos. Estas tendencias indican que existe una zona carburizada sobre el borde afectado térmicamente.

Luego, desde  $300\mu\text{m}$  en adelante, el hierro y el carbono a lo largo de la banda clara que se observan en la microestructura, presentan tendencias opuestas, siendo decreciente para el hierro, y creciente para el carbono, posiblemente producto de la difusión provocada por la atmósfera rica en carbono. En esta zona, el contenido de cromo no se ve modificado.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** En las Figuras 5.65 (a) - (c), se representan las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC del 4140 para los cortes mediante velocidades de 25, 30 y 35 cm/min, respectivamente. Similar al criterio tomado para el mismo material seccionado mediante plasma, se delimitó el espesor de ZAC hasta la ZONA H.

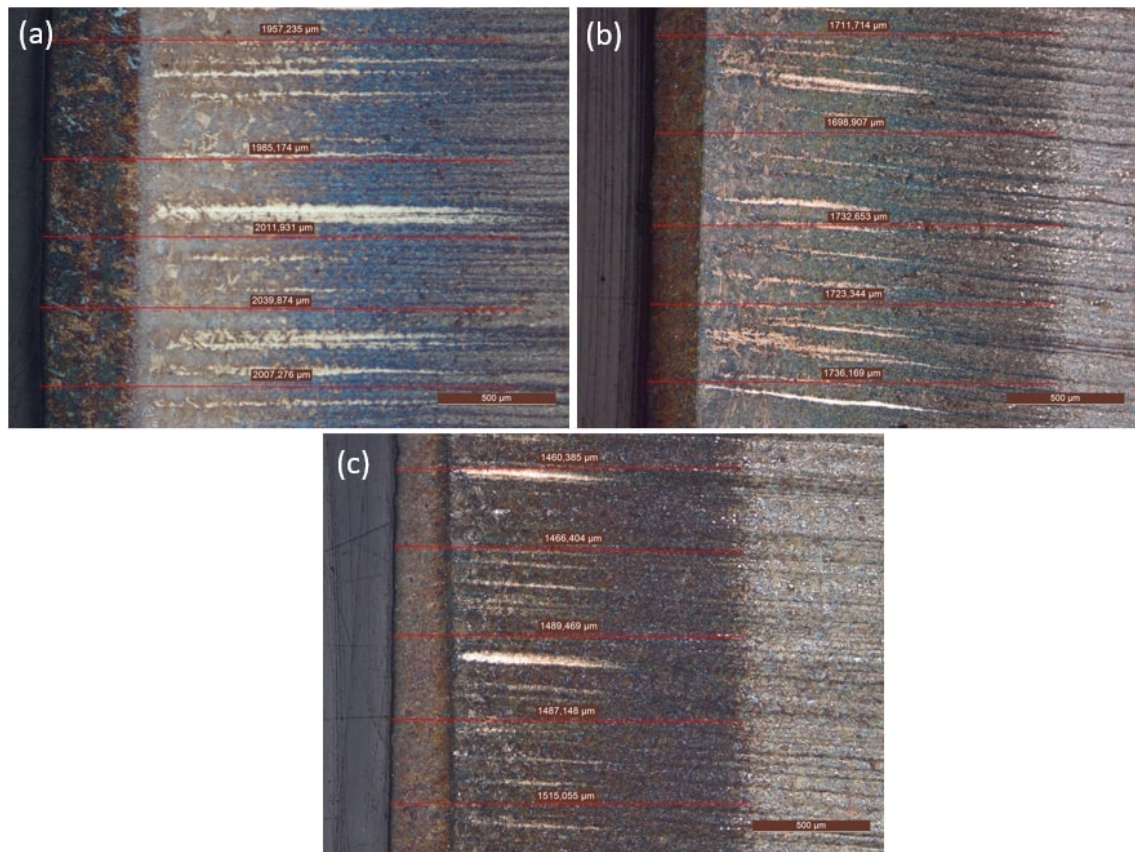


Figura 5.65. Mediciones de espesor de ZAC en oxicorte para las distintas velocidades de corte en 4140: (a) 25 cm/min; (b) 30 cm/min; (c) 35 cm/min. Aumento x50

Luego, sobre la Tabla 5.12, se detallan los valores obtenidos de mediciones y variables estadísticas de promedio y desvío estándar. Por último, en la Figura 5.66, se observa la gráfica obtenida entre velocidad de corte y espesor de ZAC.

M1) 25 cm/min		M2) 30 cm/min		M3) 35 cm/min	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	1957,24	1	1711,71	1	1460,39
2	1985,17	2	1698,91	2	1466,40
3	2011,93	3	1732,65	3	1489,47
4	2039,87	4	1723,34	4	1487,15
5	2007,28	5	1736,17	5	1515,06
<b>Promedio</b>	2000,30	<b>Promedio</b>	1720,56	<b>Promedio</b>	1483,69
<b>DS</b>	30,96	<b>DS</b>	15,37	<b>DS</b>	21,63

Tabla 5.12. Valores obtenidos de medición de ZAC luego de oxicorte para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

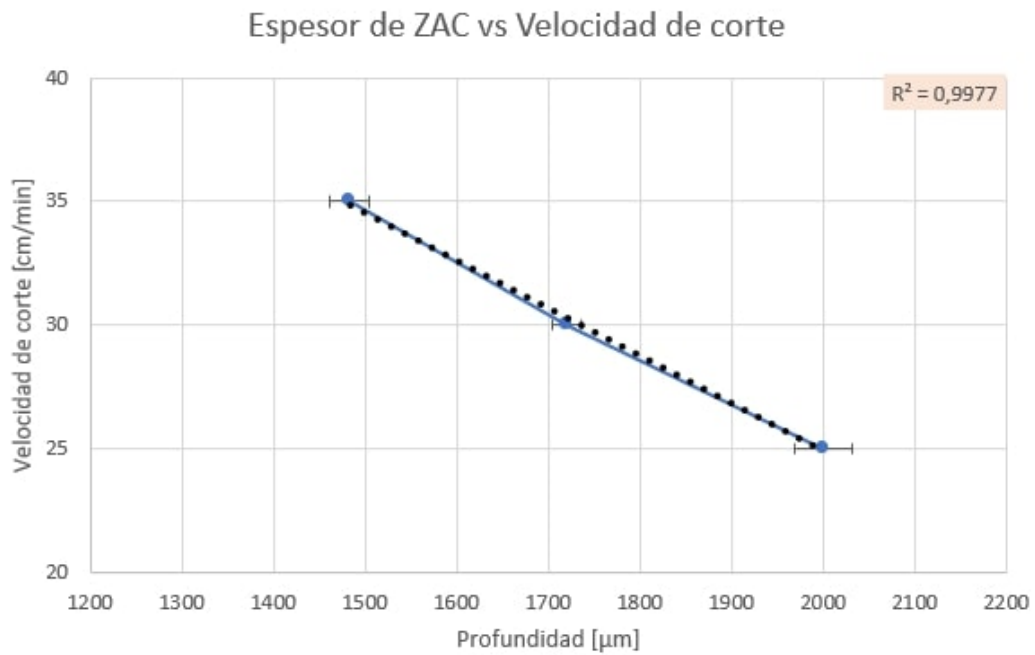


Figura 5.66. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante oxicorte.

Sobre la Figura 5.66, se observa que la correlación que existe entre la velocidad de corte y el espesor de ZAC, también tiene una tendencia lineal, con un  $R^2 = 0,99$ . Los valores obtenidos de profundidad de ZAC son considerablemente mayores a los valores alcanzados mediante corte por plasma. Para la velocidad máxima utilizada en oxicorte, 35 cm/min, se obtiene un promedio de espesor de ZAC 1483  $\mu\text{m}$ , el cual es similar al obtenido con la velocidad mínima utilizada para el método de corte por plasma, que fue de 1546  $\mu\text{m}$ , y que correspondió a la máxima zona afectada para este método. Nótese, además, que los desvíos estándar de los espesores de la ZAC son bajos, lo cual puede estar asociado con una mejor definición de la transición entre la zona afectada y el metal base

**2.2.4.3. Corte por hilo** En las Figuras 5.67 (a) - (c), se observa las consecuencias de la electroerosión por hilo en el acero aleado, bajo velocidades de corte de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente.

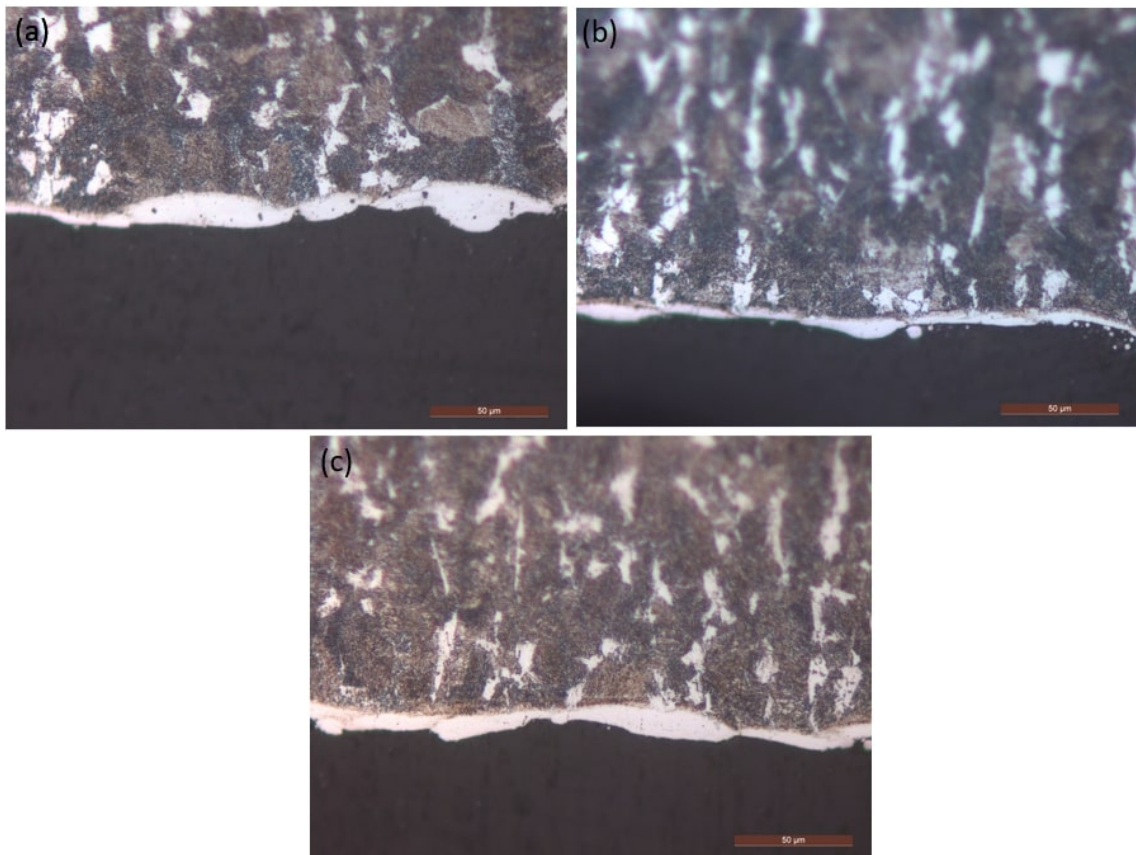


Figura 5.67. ZAC en muestras de 4140 cortada mediante electroerosión por hilo: (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500. Ataque químico: Nital al 4 %.

Nuevamente se pudo visualizar sólo una capa blanca que no fue atacada químicamente, y cuyo espesor es muy pequeño, e incluso insignificante, al lado de lo obtenido mediante los otros dos métodos de corte para este material.

Dado que el aporte térmico del corte por hilo es tan localizado, sobre estas microestructuras y por fuera de la capa blanca, se pudo volver a visualizar la microestructura caracterizada en un principio (sección 1.4), la cual es una matriz ferrita - perlita con bandas de microsegregación, estructura típica de este tipo de acero en condición normalizada.

**Análisis de resultados obtenidos a través de SEM** A continuación, se muestra un mapeo de composición química realizado sobre el borde del material en dónde se encuentra la capa blanca observada en la Figura 5.67, con la finalidad de visualizar si hubo alteración de los elementos químicos presentes. La Figura 5.68 muestra tal estudio, mientras que la Figura 5.69, detalla los elementos químicos por separado.



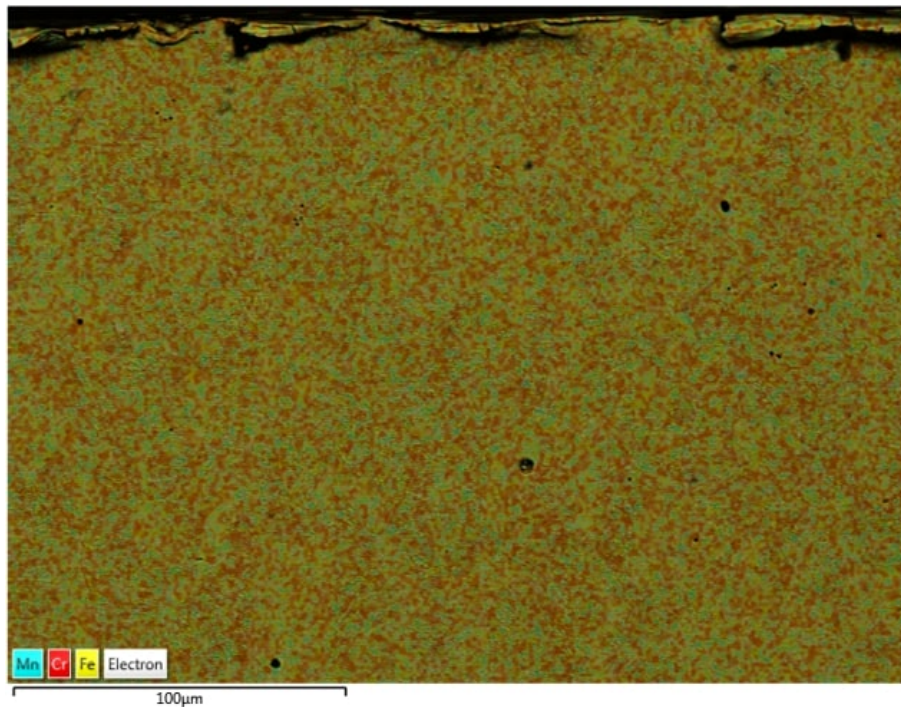


Figura 5.68. Microestructura 4140 en borde afectado térmicamente por corte por hilo, con el correspondiente mapeo de colores para identificar la capa blanca. Amarillo = Fe; Rojo = Cr; Celeste = Mn. Aumento x1000

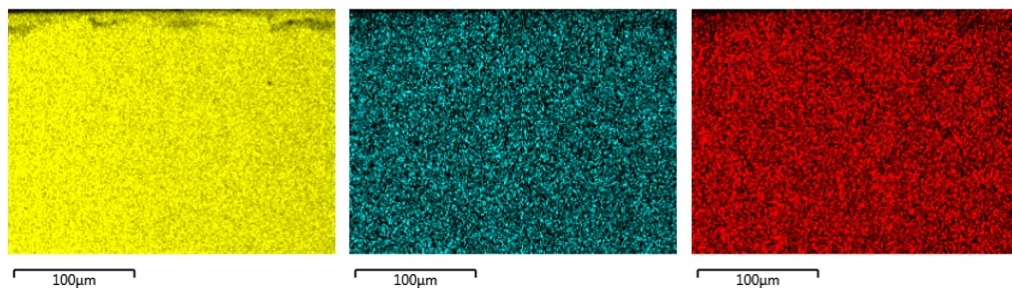


Figura 5.69. Microestructura 4140 en borde afectado térmicamente por corte por hilo, con los elementos químicos por separado, en su respectivo color. Amarillo = Fe; Rojo = Cr; Celeste = Mn. Aumento x1000

Cómo se observa en el análisis anterior, el mapeo de composición química, no reveló zonas que presenten una concentración de elementos químicos que justifiquen la capa blanca observada anteriormente.

**Análisis de velocidad de corte vs espesor de ZAC** En las Figuras 5.70 (a) - (c), se representan las mediciones realizadas sobre el espesor de ZAC del 4140 para los cortes mediante velocidades de 20, 30 y 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ , respectivamente. El espesor de ZAC a considerar fue la denominada capa blanca.

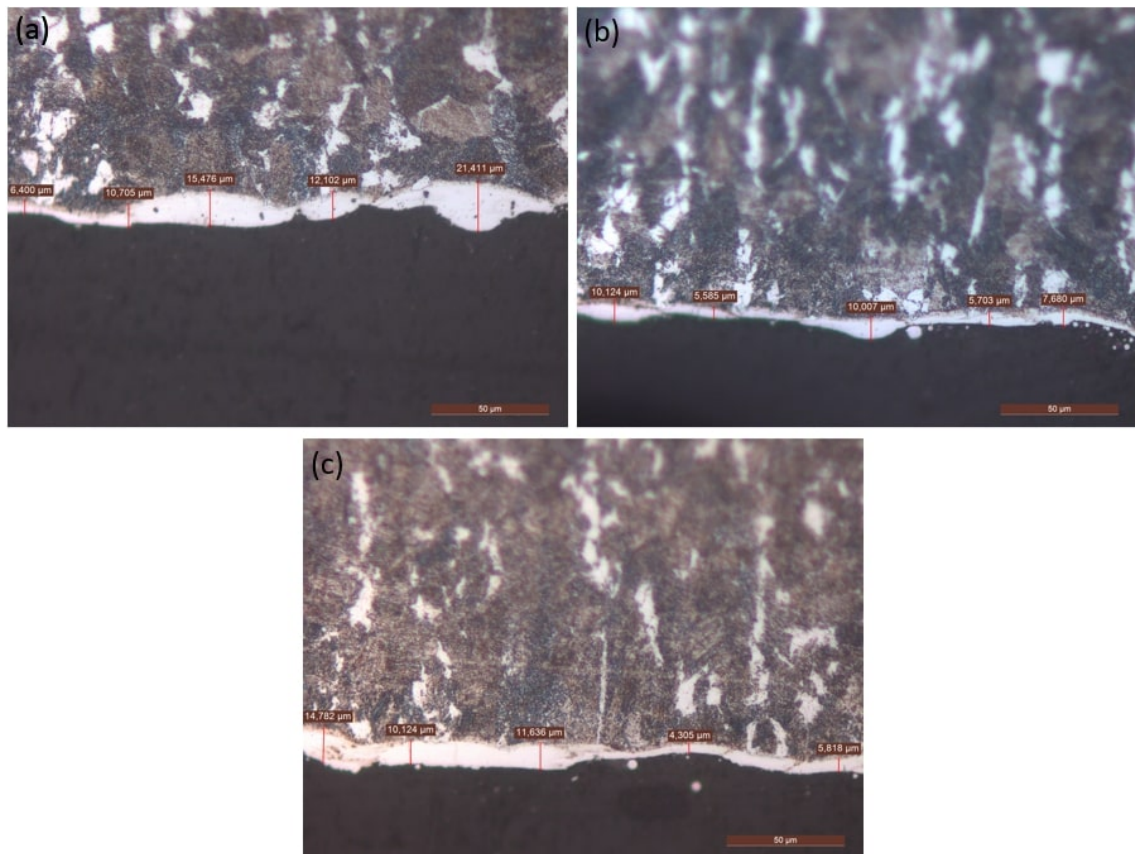


Figura 5.70. Mediciones de espesor de ZAC en corte por hilo para las distintas velocidades de corte en 4140. (a) 20  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}/\text{seg}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}/\text{seg}$ . Aumento de x500.

Luego, en la Tabla 5.13, se detallan las mediciones obtenidas, promedio y desvío estándar en cada caso, luego estas variables se representan mediante una gráfica de velocidad de corte vs espesor de ZAC, tal y como se observa en la Figura 5.71.

M1) 20 $\mu\text{m}/\text{seg}$		M2) 30 $\mu\text{m}/\text{seg}$		M3) 40 $\mu\text{m}/\text{seg}$	
Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Medición	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	6,400	1	6,749	1	14,782
2	10,705	2	4,073	2	10,124
3	15,476	3	10,008	3	11,636
4	12,102	4	10,473	4	4,305
5	21,411	5	9,789	5	5,818
<b>Promedio</b>	13,22	<b>Promedio</b>	8,22	<b>Promedio</b>	9,33
<b>DS</b>	5,62	<b>DS</b>	2,74	<b>DS</b>	4,28

Tabla 5.13. Valores obtenidos de medición de ZAC luego de corte por hilo para 4140, en conjunto con el promedio y el desvío estándar, para cada velocidad de corte.

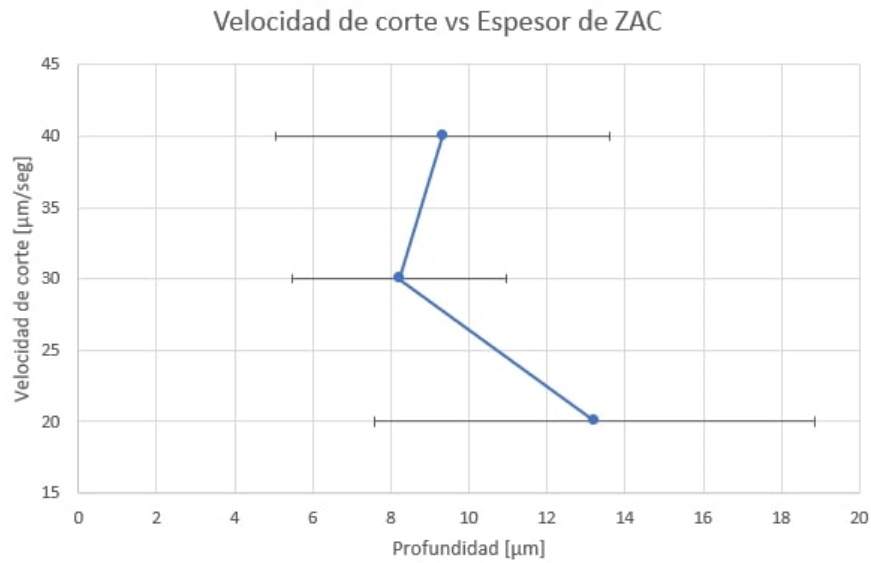


Figura 5.71. Velocidad de corte vs profundidad de ZAC para 4140 cortado mediante corte por hilo.

El promedio de valores obtenidos del tamaño de la zona blanca, se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los adquiridos en los materiales anteriores, siendo el espesor de esta chapa el máximo de todos los materiales en estudio. En la Figura 5.70 (a), que representa la menor velocidad de corte con el hilo, se puede observar que dentro de la superficie irregular hay una medición que alcanza los  $21 \mu\text{m}$ , la cual es la mayor obtenida para todas las mediciones de todos los aceros, para este método de corte.

Cómo se puede observar, no se presenta ninguna correlación directa, al igual que para el caso del ASTM A36. No obstante, los 3 valores se encuentran dentro del orden de magnitud y difieren muy poco a pesar de estar duplicando la velocidad de corte entre la primer y última muestra. Es importante destacar, que con este método de corte, los desvíos estándar fueron grandes, lo cual puede deberse a la fluctuación del espesor de la capa blanca en el sentido del espesor. Esto, a su vez, está reaccionando con la naturaleza física del proceso de corte

## 2.3 Medición de dureza

En la siguiente subsección, se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos de microdureza Vickers. Para los aceros, se utilizó 0.5 kgf para realizar las improntas, mientras que para la aleación de aluminio, se empleó una fuerza de 0.1 kgf, dado que el material es significativamente más blando. En todos los casos, se consideró una distancia mínima respecto al borde de corte de 0.05mm. El barrido de microdureza se realizó, para cada material y cada método de corte, en un sentido perpendicular al plano de corte, en dirección hacia el metal base, y a la vez considerando un plano medio del espesor para cada metal, tal y como se muestra en la Figura 5.72.

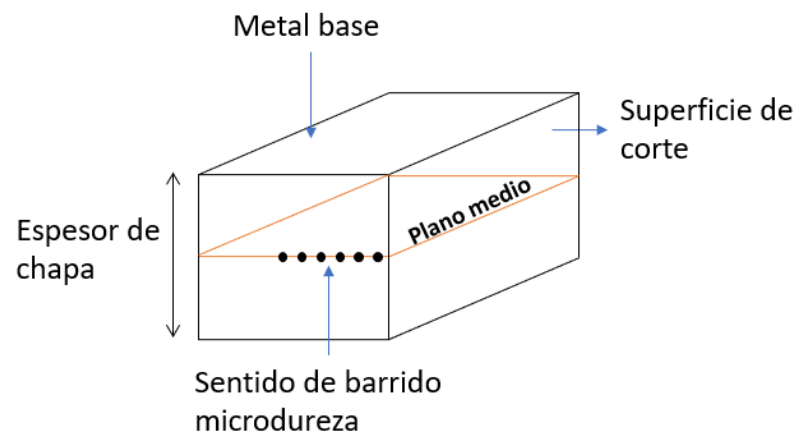


Figura 5.72. Esquema de sentido de barrido de microdureza.

El criterio para definir el límite de la zona afectada fue considerar 3 mediciones consecutivas donde los valores de dureza ya no varíen de manera abrupta, y además se asemejen a los valores de dureza que se brinda en la bibliografía para cada material.

A su vez las mediciones de microdureza se utilizaron para delimitar las zonas afectadas por el corte y establecer una comparación con los espesores determinados por imagen en la subsección 2.2.

### 2.3.1 Acero inoxidable dúplex

Las Figuras 5.73 y 5.74 muestran las gráficas obtenidas a partir de los valores de dureza resultantes para el DSS, luego del corte por plasma e hilo, en función de la distancia al borde de corte. Sobre las gráficas, se incluyen las distintas líneas para representar los espesores medidos anteriormente.

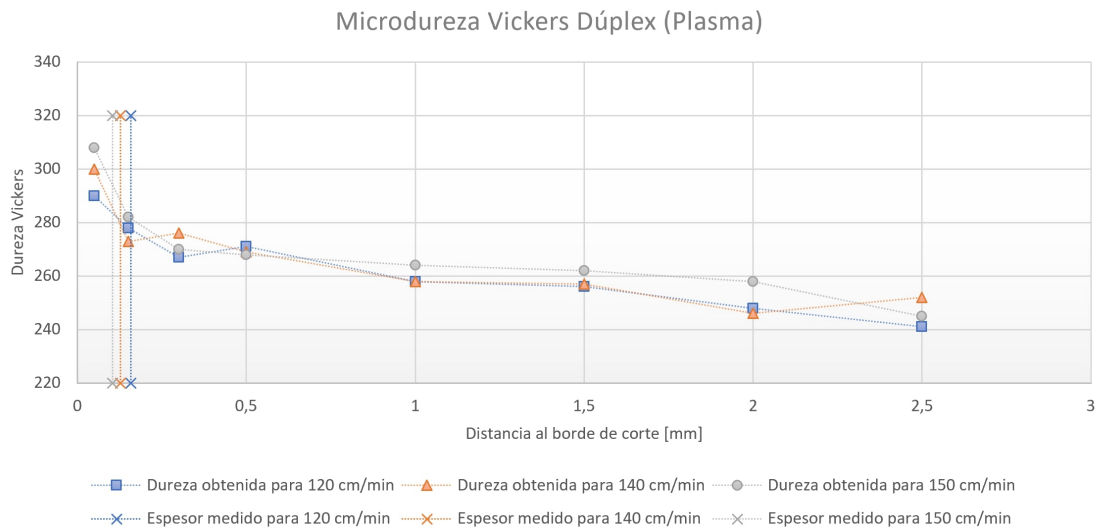


Figura 5.73. Microdureza Vickers para DSS luego del corte por plasma.

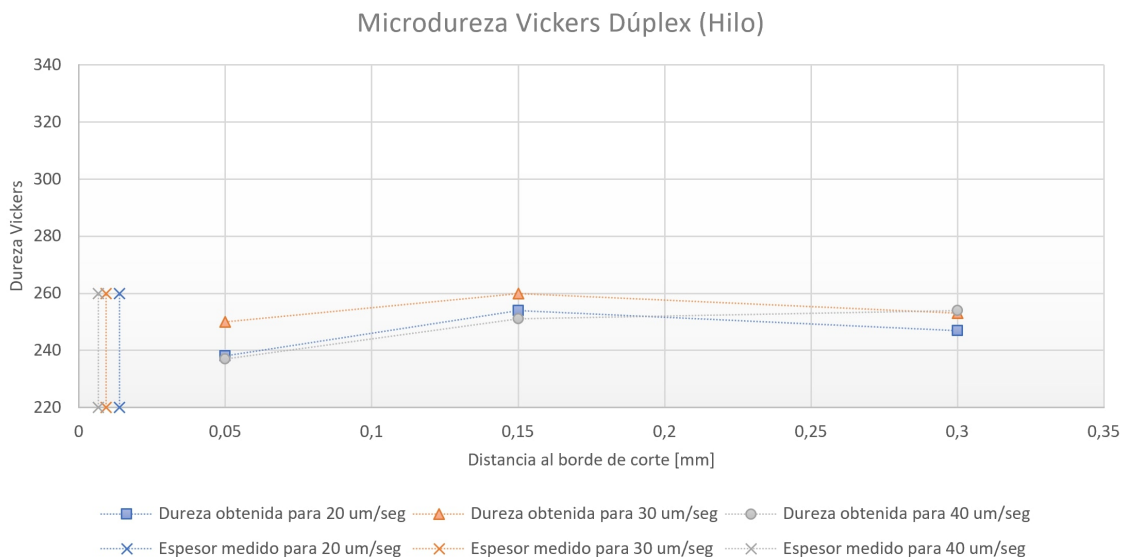


Figura 5.74. Microdureza Vickers para DSS luego del corte por hilo.

Para el caso del corte por plasma, Figura 5.73, es interesante destacar cómo sobre la superficie de corte ( $x = 0.05$  mm), los valores de dureza se incrementaron a medida que la velocidad de corte aumentaba. Por lo general, puede suceder que la fase ferrita sea la fase que brinde la mayor dureza al material. Dado que a medida que la velocidad de corte aumenta, la velocidad de enfriamiento aumenta, es menor el tiempo que presenta la microestructura para nuclear la fase austenita alrededor de los granos ferríticos, siendo esta última una fase característica de durezas menores (Lippold y Kotecki, 2012).

Sobre este mismo gráfico, vemos que hasta 0.5mm, es notorio el descenso de la dureza,

alcanzando un valor cercano a 270 HV. Esto brinda un indicio de que, si bien a partir de las imágenes digitalizadas, el límite de la zona afectada fue hasta dónde se vuelve a observar la microestructura en forma de laminas, existen unos milímetros más en los cuales los valores de dureza aumentaron a causa del impacto térmico. Esto se puede observar con las 3 líneas de espesor medido que se encuentran sobre el gráfico, entre 0.1mm y 0.16mm, aproximadamente.

En el caso del corte por hilo, Figura 5.74, los valores de dureza presentan simplemente una dispersión entre lo que sería el valor de dureza típico de la microestructura sin ser afectada térmicamente, oscilando entre 235 HV y 260 HV.

Dado que la microdureza fue evaluada considerando un margen de 0.05mm ( $50 \mu\text{m}$ ) respecto del borde de corte, con el fin de realizar una buena medición y evitar que la deformación plástica de la impronta no esté restringida por los bordes, no fue posible medir la dureza de la capa blanca resultante de la fusión localizada del hilo, ya que la máxima medición de la capa blanca fue de aproximadamente  $14 \mu\text{m}$  para este material. Sobre la gráfica, se observa como las líneas de medición de espesor se encuentran por detrás de la primer impronta realizada.

### 2.3.2 Aleación de aluminio

Las Figuras 5.75 y 5.76 muestran el efecto del gradiente térmico sobre el borde de corte, para corte por plasma e hilo, en la aleación de aluminio. En este caso, no se presenta líneas de espesor medido dada la imposibilidad de realizar dicha medición.

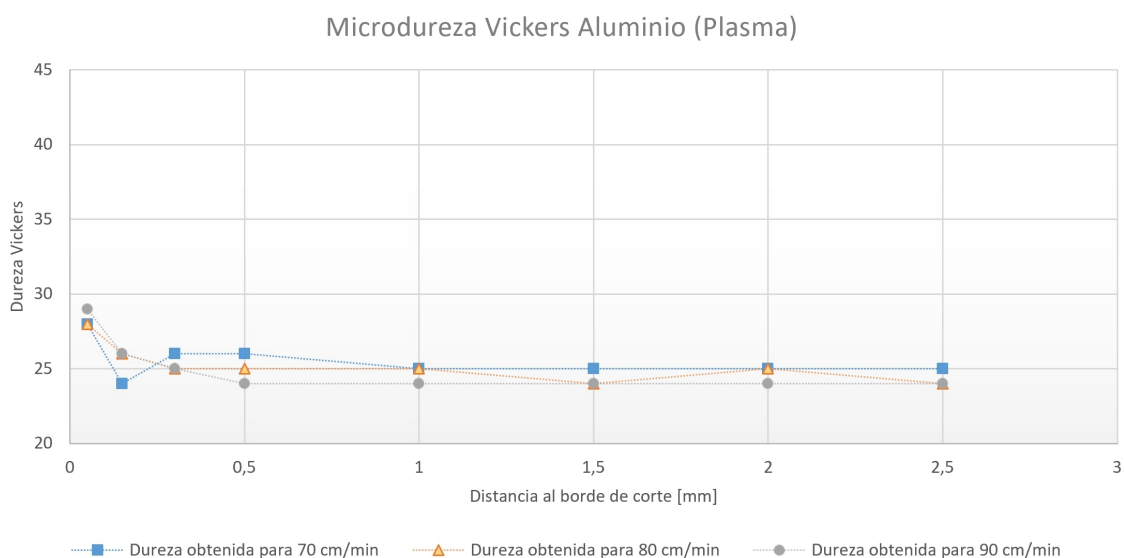


Figura 5.75. Microdureza Vickers para la aleación de aluminio luego del corte por plasma.

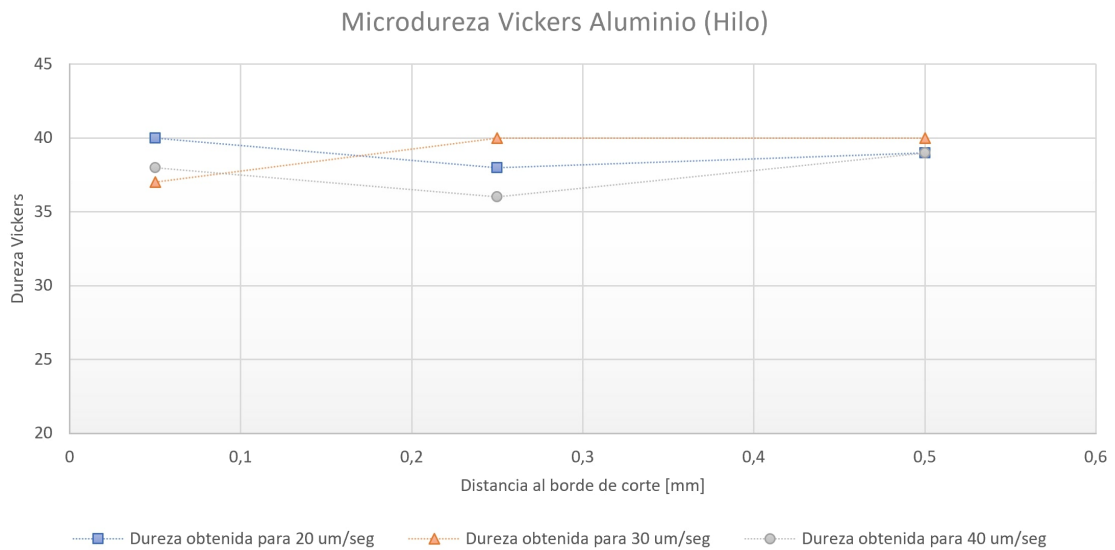


Figura 5.76. Microdureza Vickers para la aleación de aluminio luego del corte por hilo.

Es importante recordar que dada la disponibilidad de material presente, se utilizó un espesor de 10 mm para los cortes mediante plasma, y un espesor de 6 mm para cortar mediante electroerosión por hilo.

En el caso de la Figura 5.75, se puede observar una dureza ligeramente mayor de las primeras improntas realizadas en el borde afectado térmicamente, dando un valor de 29HV mientras que el resto de las mediciones son oscilaciones entre 24 y 26 HV. Este es un valor esperable para un aluminio de estas características, bajo el espesor considerado (Pichumani, 2018). Esto da la pauta de que no hubo variación de la microdureza como consecuencia del gradiente térmico.

Por otro lado, sobre la Figura 5.76, se visualiza que la oscilación de microdureza ahora es mayor, entre 36 y 40HV. Este aumento de dureza se puede deber a la disminución de espesor del material (disminución del 40%). Cabe destacar que una reducción en el espesor del material, produce en consecuencia un aumento proporcional de la microdureza (Molladavoudi, 2011). La consecuencia térmica a causa del corte por hilo no provoca cambios microestructurales o de microdureza, posiblemente dado que el aluminio presenta una conductividad térmica muy elevada que favorece la rápida disipación de calor (Callister Jr y Rethwisch, 2018).

### 2.3.3 Acero al carbono

Las Figuras 5.77, 5.78 y 5.79, muestran la variación de microdureza del acero al carbono A36, luego de cada corte térmico utilizado. Se agregan sobre cada gráfica, las líneas que indican el espesor medido para cada método de corte.

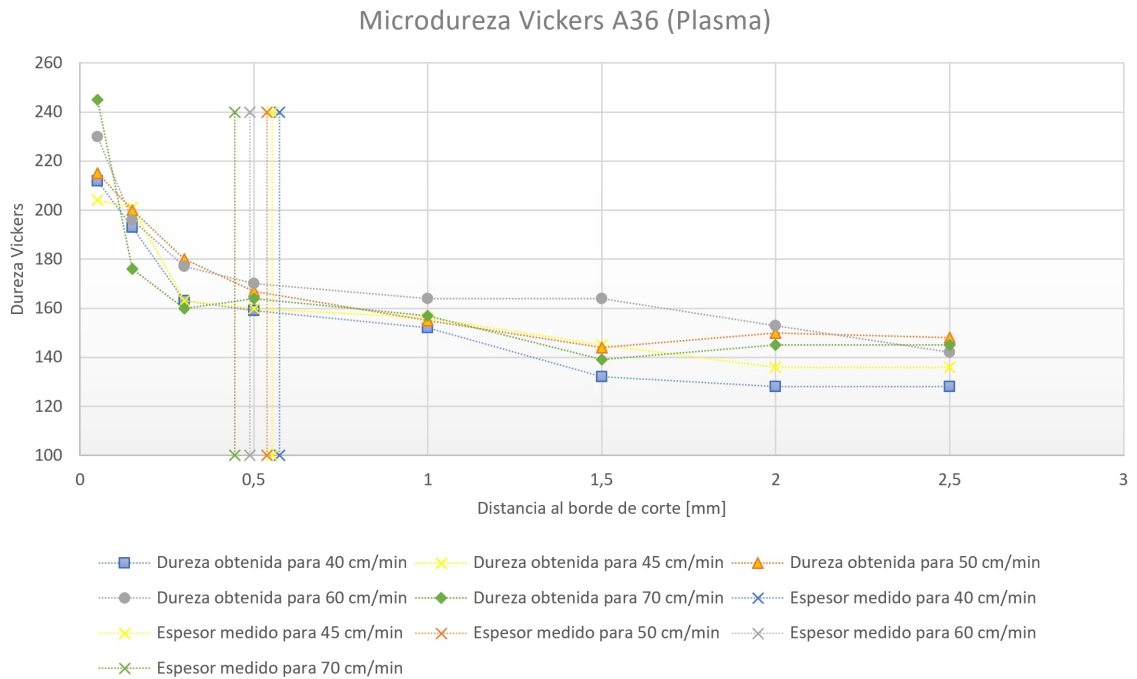


Figura 5.77. Microdureza Vickers para acero A36 luego del corte por plasma.

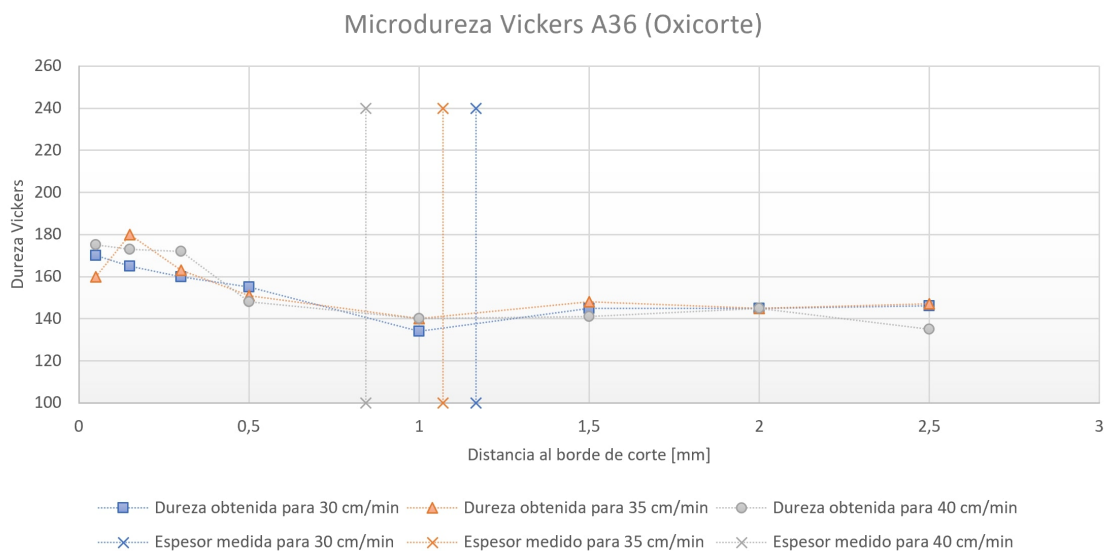


Figura 5.78. Microdureza Vickers para acero A36 luego de oxicorte.



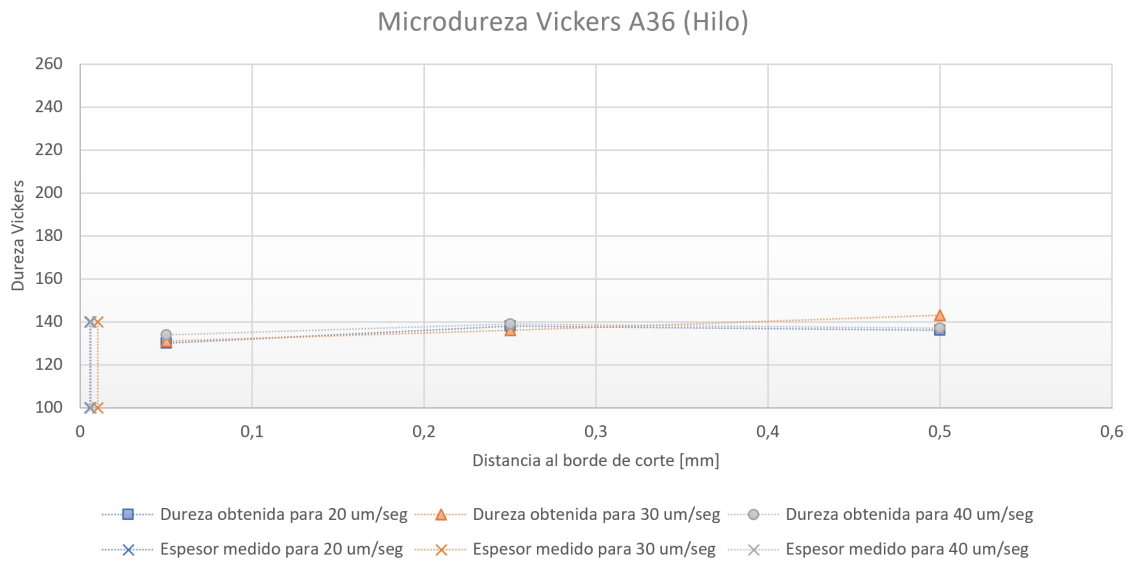


Figura 5.79. Microdureza Vickers para acero A36 luego del corte por hilo.

De acuerdo a las referencias bibliográficas, un material de estas características suele presentar una dureza de entre 120 a 160 HB (dureza Brinell). Hasta durezas de aproximadamente 250 HB, la conversión a dureza Vickers para estos valores es directa, por ende, este material presenta el mismo rango en HV ([Internacional, 2004c](#)).

En la Figura 5.77, se puede observar cómo sobre la zona afectada por calor, los valores de dureza son cercanos al doble de los valores de dureza presentes en el metal base. En la primer medición obtenida para cada velocidad, se puede ver cómo a medida que aumenta la velocidad, el valor de dureza también aumenta. Esto puede atribuirse a el tamaño de grano que se presenta luego del impacto térmico. Cuanto mayor sea la velocidad, menor es el tiempo de exposición a altas temperaturas, y por ende, la microestructura no puede desarrollarse para formar una mayor superficie de granos ferríticos gruesos, caracterizados por tener menor dureza dado la menor área de bordes de granos presentes ([Callister Jr y Rethwisch, 2018](#)).

Si bien, una microestructura de granos gruesos debería presentar menor dureza, una de las razones por las cuales la dureza del material entre 0 y 0.5mm de distancia desde el borde de corte es mayor que en el metal base, puede ser a causa de las tensiones residuales térmicas que se generan producto del propio método de corte (la medición de tensiones residuales térmicas excede el alcance del presente trabajo). Por supuesto, una dureza alta también estará determinada por el tamaño de grano, la composición de las fases y posibilidades de inclusiones metálicas ([Boumerzoug, 2010](#)).

Es interesante observar que la tendencia de decrecimiento de la dureza es pronuncia-

da hasta 0.5mm, lo cual se condice con los valores de espesor medidos. Según el límite establecido para delimitar la ZAC, el valor máximo de profundidad fue de 0.57mm para la velocidad mínima, como muestra la línea vertical punteada en azul, correspondiente al espesor medido para 40 cm/min. Este resultado difiere del obtenido para el acero DSS, donde se tenía un gradiente de durezas mayor al espesor de ZAC medido. Luego, entre 0.5mm y 1mm, el gradiente de dureza Vickers es menor, dónde a partir de 1mm, los valores se asemejan a los obtenidos en el caso de corte por hilo, los cuales se encuentran en un rango de 130 HV y 150 HV.

En la Figura 5.78, se observan los valores de dureza que se alcanzaron en el borde de corte luego del oxicorte. A diferencia del corte por plasma, los valores obtenidos de dureza son apenas superiores a los que se obtienen en el metal base. Si se compara la velocidad de 40 cm/min que fue utilizada como la máxima en oxicorte y la mínima en corte por plasma, el valor de microdureza obtenido es de 210HV aproximadamente para corte por plasma, y 175HV para oxicorte.

El método de oxicorte requiere del precalentamiento previo, lo cual provoca que el tiempo de enfriamiento de la pieza sea más prologando, favoreciendo el crecimiento de granos en el material y la generación de tensiones residuales a causa del efecto térmico, lo cual provoca que la dureza en el material también disminuya ([Jokiaho, 2020](#)).

El espesor de ZAC obtenido para el acero A36 mediante oxicorte, dió como resultado espesores de ZAC de 0,8 a 1,17 mm aproximadamente, tal y como se observa en las líneas punteadas de la gráfica. Si se analiza el gradiente de dureza obtenido, se puede ver que la dureza cae hasta aproximadamente 1mm, es decir, la variación microestructural está acorde a la variación de microdureza obtenida, dónde luego, a partir de 1mm, ya se mantiene practicamente constante dentro de los valores de dureza del metal base.

Por último, se observa sobre la gráfica de la Figura 5.79 la dureza luego del corte por hilo. Se puede ver que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango que presentan las diferentes referencia bibliográficas. Esto era un resultado esperado dado que no se presentó variación microestructural luego de cortar con este método. Cómo sucedió con el DSS, dado que los valores de la capa blanca son menores a  $11\mu\text{m}$ , no se pudo evaluar la variación de dureza en esa zona.

### 2.3.4 Acero aleado

En las Figuras 5.80, 5.81 y 5.82, se presentan los gráficos obtenidos a partir de los valores de dureza en función de la distancia al borde de corte para el acero aleado AISI 4140, para cada método de corte y con las respectivas líneas de medición de espesores obtenida para cada velocidad.

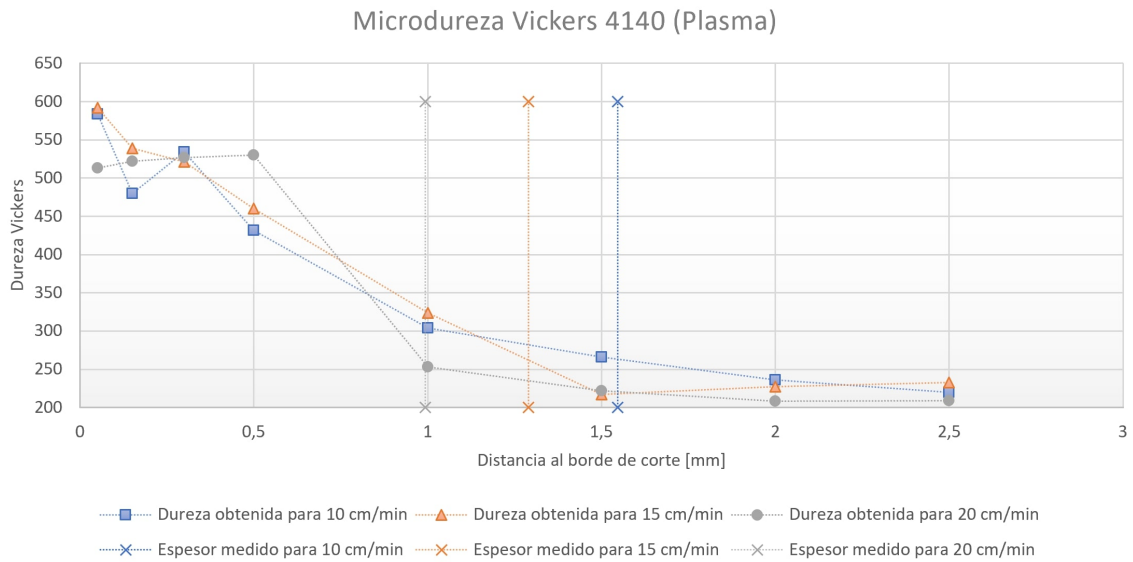


Figura 5.80. Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por plasma.

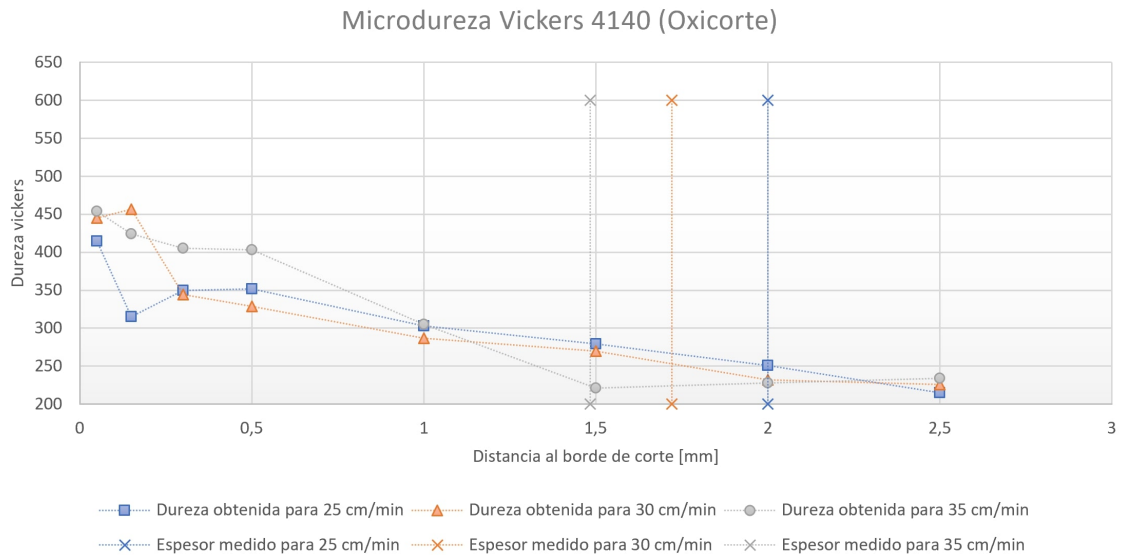


Figura 5.81. Microdureza Vickers para acero 4140 luego de oxicorte.

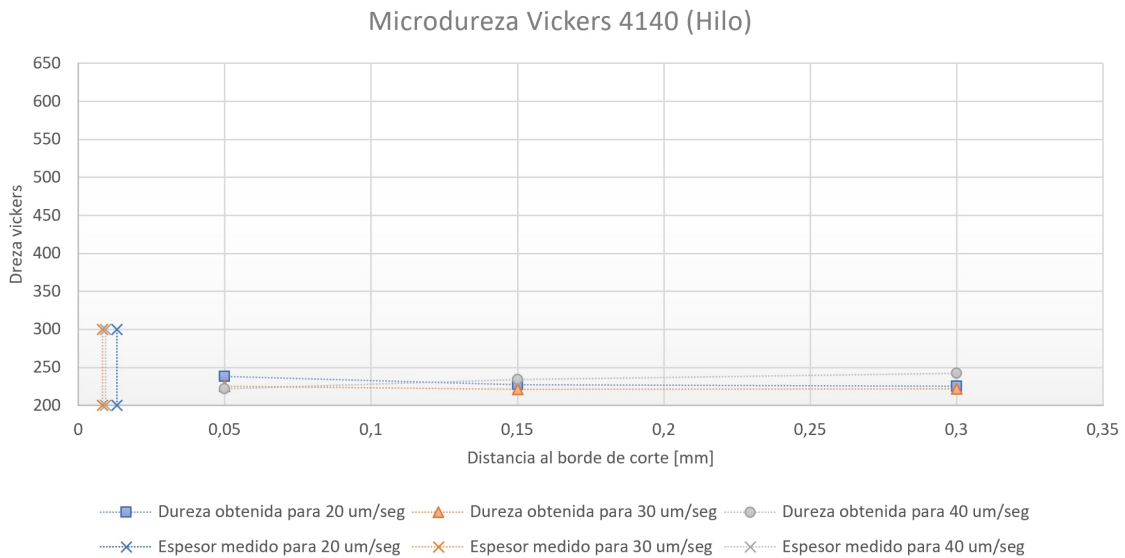


Figura 5.82. Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por hilo.

Dada la condición microestructural normalizada que presentaba este material, los valores de dureza Vickers típicos suelen rondar los 260 (Yilmaz y Kesti, 2020) a 300 (Internacional, 2004a).

Como se observó en la sección 2.2.4, la microestructura resultante tanto luego del corte por plasma como del oxicorte, consistía de zonas de bainita - martensita, las cuales según bibliografía, presentan valores de dureza típicos que van entre 450 y 600 HV (Internacional, 2004a). Sobre la Figura 5.80, se puede visualizar que sobre el borde de corte los resultados de dureza rondan estos valores.

Para el caso de la Figura 5.80, y junto con la medición de espesores obtenida anteriormente, se puede observar como la caída de dureza obtenida para las 3 velocidades de corte por plasma, se encuentran en concordancia con los espesores medidos de ZAC, entre 0,99mm y 1,54mm. La variación de dureza para los 3 casos entre 0,05mm y 1,5mm es notablemente más pronunciada que la obtenida luego de 1,5mm, donde los valores de dureza se mantienen prácticamente constantes.

La gráfica obtenida para oxicorte, Figura 5.81, presenta valores de dureza menores en comparación con corte por plasma. Como se pudo ver en el análisis microestructural, este método de corte provocó que parte del borde de corte se carburice, provocando que esta zona pierda diferentes aleantes que le brindan dureza al material (Tingaev y Gubaydulin, 2016).

En la medición de espesores se consideró que el límite de ZAC para este caso, se

encontraba entre 1.5 y 2 mm. Bajo este criterio, y analizando el gradiente de durezas obtenido para las 3 velocidades de oxicorte, se puede destacar que hubo correspondencia entre los valores medidos de espesor de ZAC y el límite de variación de microdureza. A partir de 1.5mm, es donde la dureza empieza a decrecer lentamente, alcanzando los valores típicos del metal base.

En el caso del corte por hilo, Figura 5.82, las 3 mediciones de microdureza realizadas, presentaron valores similares a los del metal base. Al igual que en casos anteriores, no fue posible medir la dureza de la capa blanca resultante de la fusión localizada del hilo, la cual era menor a  $21 \mu\text{m}$ .

Los ensayos de micro - dureza realizados para obtener las gráficas de las Figuras 5.80 y 5.81, fueron realizadas sobre las zonas de microestructura de transición, y no sobre las bandas blancas de martensita pura que se observan en las Figuras 5.52 y 5.61. A los fines de evaluar como impactó esta transformación microestructural, se realizaron improntas específicas sobre estas bandas. Las Figuras 5.83 y 5.84, muestran los resultados obtenidos.

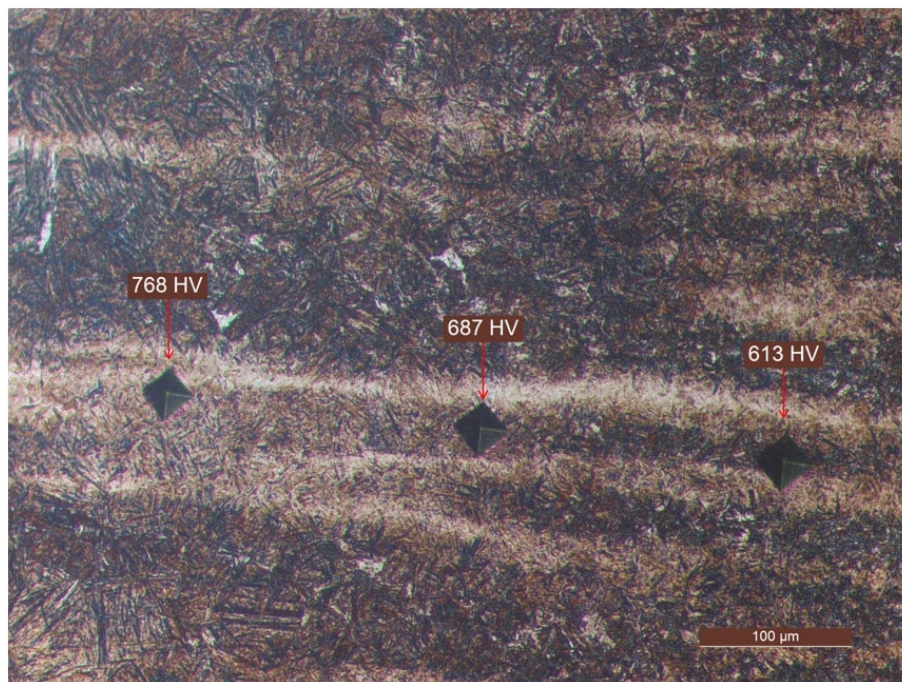


Figura 5.83. Microdureza Vickers para acero 4140 luego del corte por plasma, sobre las bandas de martensita.

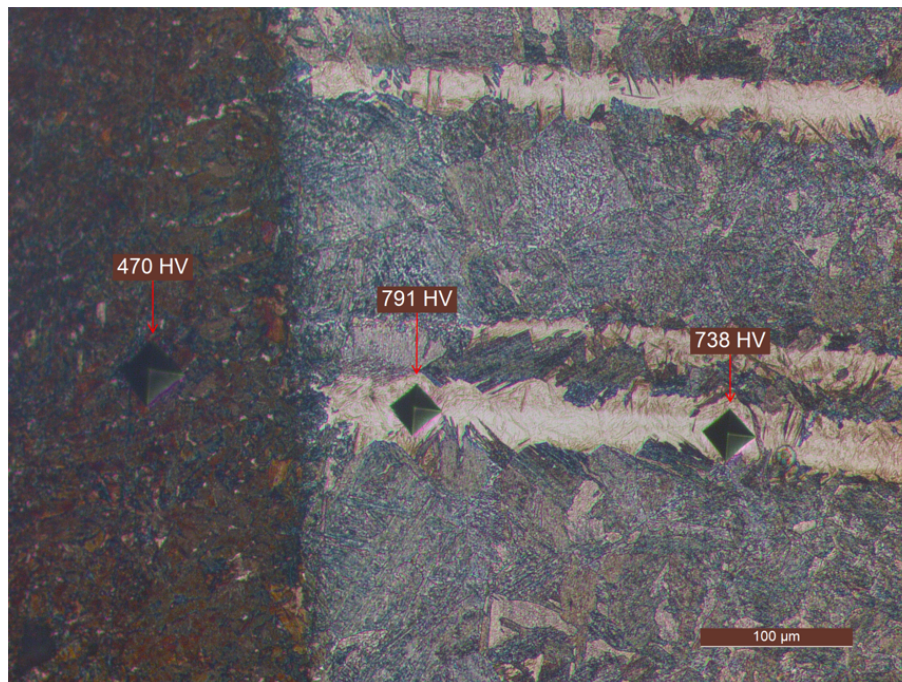


Figura 5.84. Microdureza Vickers para acero 4140 luego del oxicorte, sobre las bandas de martensita.

En la Figura 5.83, se observan dos mediciones que dan los valores de 768 y 687HV, los cuales son significativamente mayores a los obtenidos en la gráfica de la Figura 5.80. Según referencia bibliográfica, estos valores son típicos en microestructuras con un 99.9 % de martensita, para el porcentaje de carbono considerado en este material (Siebert, 1977). Lo mismo sucede en la Figura 5.84, en la cual se ven valores de 791 y 738 HV.

Resulta interesante resaltar que sobre la zona carburizada, Figura 5.84, donde hubo formación de óxidos a causas del propio método de corte, el valor de dureza obtenido es considerablemente menor al obtenido en las otras dos improntas realizadas sobre esta muestra, alcanzando 470 HV. Esta transición abrupta de la dureza del material, puede ser un factor muy influyente en los resultados de diversos ensayos mecánicos, y las propiedades determinadas con ellos (Maroni, 1976).

### 3 Ensayos de flexión en 3 puntos

En las próximas subsecciones, se analizarán los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas a través de las galgas extensiométricas y el LVDT (transductor de desplazamiento lineal) para luego realizar las respectivas comparaciones con cálculos teóricos de esfuerzo y desplazamiento. Además, se expresarán los resultados alcanzados

luego de realizar los distintos ensayos de fatiga.

### 3.1 Mediciones de galgas extensiométricas y LVDT

Tal y como se mencionó en la subsección 6.2.4 del Capítulo 4, con el objetivo de verificar el funcionamiento de la máquina de fatiga disponible en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería, se realizaron distintas pruebas en probetas de dimensiones similares a las que se obtuvieron mediante los métodos de corte no convencional (Ver Tabla 4.13).

El LVDT permite verificar la excentricidad definida en la máquina, mientras que el strain gauge permite medir deformaciones con las cuales se puede determinar las tensiones máximas a la que está sometida la viga de flexión en 3 puntos.

Tanto para la probeta 1, como para la probeta 2, se llevaron adelante ensayos con 3 excentricidades distintas: 0,08 mm, 0,1 mm y 0,2 mm, mientras que para la probeta 3, de dimensiones mucho menores, solo se evaluaron excentricidad de 0,08 mm y 0,1 mm. Esto se debe a que a mayor excentricidad, mayores serán las tensiones máximas en el borde analizado, y para las medidas de la probeta 3 y una excentricidad de 0,2 mm las tensiones resultan superiores a 1000 MPa, la cual se encuentra en el régimen plástico del material.

La Figura 5.85, muestra el tipo de gráfico que se obtiene cuando se ensaya una probeta instrumentada con strain gauges en el borde sometido a tensión, representado en la Figura 4.11. Para este caso, se tomó la gráfica obtenida para la probeta 1, bajo una excentricidad de 0,2 mm.

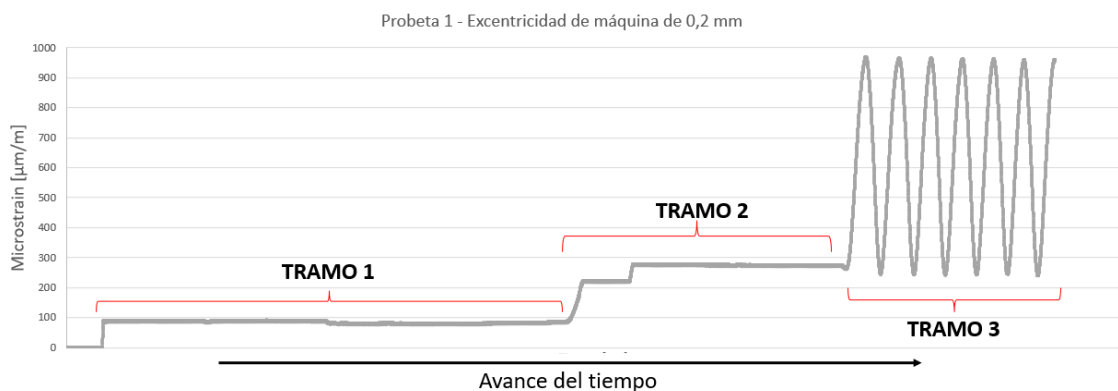


Figura 5.85. Gráfico obtenido mediante galga extensiométrica, para la probeta 1, con una excentricidad de máquina de fatiga de 0,2 mm.

En el gráfico, se identifican 3 tramos bien diferenciados:

- TRAMO 1: representa el simple apoyo de la travesa de la máquina (Ver Figura 4.7), sobre los laterales de la probeta, luego de ubicar de manera previa, el punto medio de la probeta sobre el rodillo inferior de la máquina.
- TRAMO 2: una vez fijada la probeta con la carga de la travesa, se debe realizar una precarga mediante el tornillo de ajuste, lo cual indicará la tensión mínima aplicada a la probeta. Esto evitará que la probeta se desajuste bajo el movimiento cíclico de la máquina, además de asegurar que el funcionamiento de la máquina sea en un ciclo con relación de carga  $R$  mayor a 0.
- TRAMO 3: muestra el ciclo de trabajo propio de la máquina. Sobre este tramo, se puede observar el encendido del variador de frecuencia que hará la oscilación entre la tensión máxima y mínima a la que estará sometida la probeta.

El mayor interés se encuentra sobre el tramo 3, dado que definirá el ciclo de esfuerzos al que estará sometida la probeta. Para cada probeta, se realizaron 3 mediciones con cada excentricidad, para luego obtener un promedio de valores de microstrain ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ), y poder convertirlo posteriormente a valores de tensión. Cabe recordar que para realizar la conversión a unidades de esfuerzo en MPa, se debe utilizar la Ley de Hooke, cuya ecuación simplificada relaciona el modulo de Young del material, la tensión aplicada y su deformación (Dieter, 1986).

Las Tablas 5.14, 5.15 y 5.16, muestran los valores promedios obtenidos de microstrain, tanto mínimos y máximos, para cada probeta y cada excentricidad, con la respectiva conversión a valores de tensión y la relación de carga. Además, en las tablas se incluyen los valores de esfuerzo teórico máximo y mínimo para cada caso.



	$\epsilon = 0,08 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,1 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,2 \text{ mm}$
Microstrain MAX [ $\mu\text{m/m}$ ]	407,5	597,5	1022,5
Microstrain MIN [ $\mu\text{m/m}$ ]	228,5	261,5	292,5
Relación de carga R [-]	0,56	0,44	0,29
$\sigma$ MAX Experimental [MPa]	85,5	125,5	214,5
$\sigma$ MIN Experimental [MPa]	45	55	61,5
$\sigma$ MAX Teórico [MPa]	89,47	111,8	223,67
$\sigma$ MIN Teórico [MPa]	47,88	55,22	62,20
Dif. % $\sigma$ MAX [-]	4,43 %	-12,25 %	4,09 %
Dif. % $\sigma$ MIN [-]	6,02 %	0,40 %	1,13 %

Tabla 5.14. Promedio de valores obtenidos para PROBETA 1 con las distintas excentricidades.

	$\epsilon = 0,08 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,1 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,2 \text{ mm}$
Microstrain MAX [ $\mu\text{m/m}$ ]	374	484	796,5
Microstrain MIN [ $\mu\text{m/m}$ ]	213	172	141,5
Relación de carga R [-]	0,57	0,35	0,18
$\sigma$ MAX Experimental [MPa]	78,5	101,5	167,5
$\sigma$ MIN Experimental [MPa]	44,7	36	29,7
$\sigma$ MAX Teórico [MPa]	163,33	326,67	653,33
$\sigma$ MIN Teórico [MPa]	44,75	35,53	30,15
Dif. % $\sigma$ MAX [-]	51,93 %	68,92 %	74,36 %
Dif. % $\sigma$ MIN [-]	0,10 %	-1,34 %	1,49 %

Tabla 5.15. Promedio de valores obtenidos para PROBETA 2 con las distintas excentricidades.

	$\epsilon = 0,08 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,1 \text{ mm}$	$\epsilon = 0,2 \text{ mm}$
Microstrain MAX [ $\mu\text{m/m}$ ]	361	518	-
Microstrain MIN [ $\mu\text{m/m}$ ]	196	179	-
Relación de carga R [-]	0,54	0,35	-
$\sigma$ MAX Experimental [MPa]	76	108,8	-
$\sigma$ MIN Experimental [MPa]	41	37,6	-
$\sigma$ MAX Teórico [MPa]	297,52	595,04	-
$\sigma$ MIN Teórico [MPa]	41,04	38,08	-
Dif. % $\sigma$ MAX [-]	74,45 %	81,71 %	-
Dif. % $\sigma$ MIN [-]	0,10 %	1,26 %	-

Tabla 5.16. Promedio de valores obtenidos para PROBETA 3 con las distintas excentricidades.

A fin de poder determinar si el comportamiento de la máquina era adecuado para realizar los ensayos de fatiga correspondientes, fue necesario comparar con los cálculos teóricos a partir de la teoría de vigas Euler - Bernoulli (Ver Anexo A), y de esta manera

comparar con las mediciones obtenidas (Gere y Timoshenko, 2002). En las Tablas anteriores, se muestran los valores teóricos de esfuerzo de flexión de 3 puntos para las probetas instrumentadas.

Se puede visualizar que para la probeta 1, tanto las tensiones teóricas como las tensiones medidas, se encuentra muy próximas entre sí, lo que indicaría una buena correspondencia entre los resultados experimentales y teóricos. En particular, las diferencias porcentuales entre las tensiones teóricas máximas y las obtenidas mediante strain gauges se encuentran entre 4 y 12 %. Por otro lado, para las probetas 2 y 3, el resultado fue menos satisfactorio, y los valores de tensión máxima obtenidos de los strain gauges difieren entre 50 y 82 % de los estimados de forma teórica. Una de las razones de que esto ocurra, puede deberse a que el comportamiento de la máquina se adecuaba mejor ante probetas más esbeltas (relación entre longitud y ancho de probeta), lo cual facilita la flexión de la misma, y para la cual se ajusta la teoría de vigas de Euler - Bernoulli (Oñate, 1992).

Sumado a esto, para todos los casos, las tensiones mínimas reales, se encontraban muy por encima del valor de tensión mínima requerido para alcanzar una relación de carga de  $R = 0,1$  obteniéndose valores de  $R$  entre 0,18 y 0,56. Esto resultó ser un problema para el desarrollo de los ensayos, dado que por el diseño de la máquina, valores de tensión mínima menores a los utilizados, provocaban que las probetas no quedaran bien sujetadas. Esto favorece el desajuste del montaje luego de varios ciclos, y en consecuencia disminuye la probabilidad de un ensayo exitoso.

Complementariamente al análisis con strain gauges, se midió el desplazamiento del punto de aplicación de carga mediante un LVDT. Las Figuras 5.86, 5.87 y 5.88, muestran las gráficas obtenidas a partir del LVDT, luego de ensayar de la manera ilustrada en la Figura 4.12.

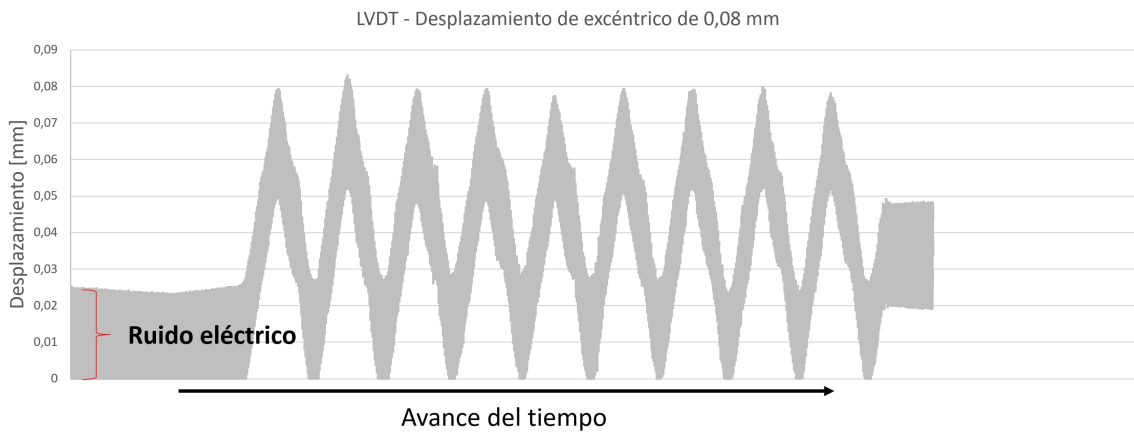


Figura 5.86. Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,08 mm.

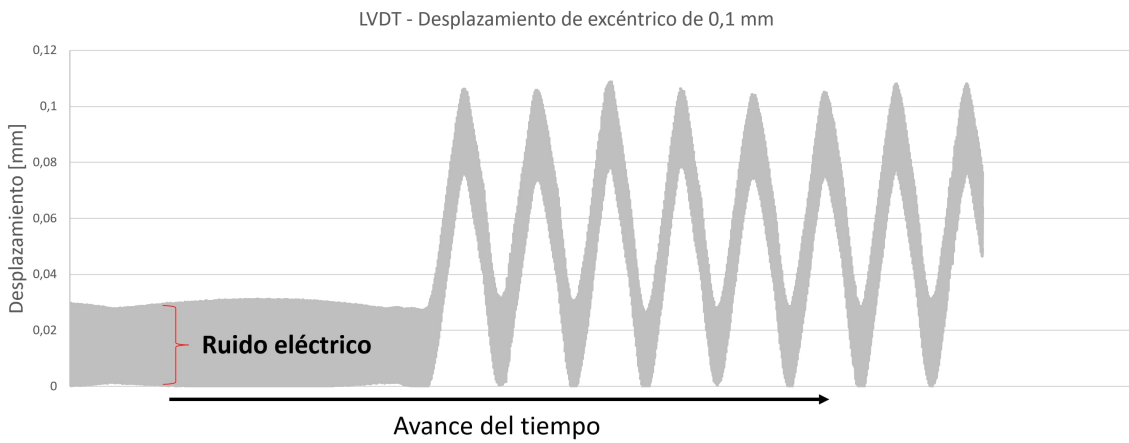


Figura 5.87. Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,1 mm.

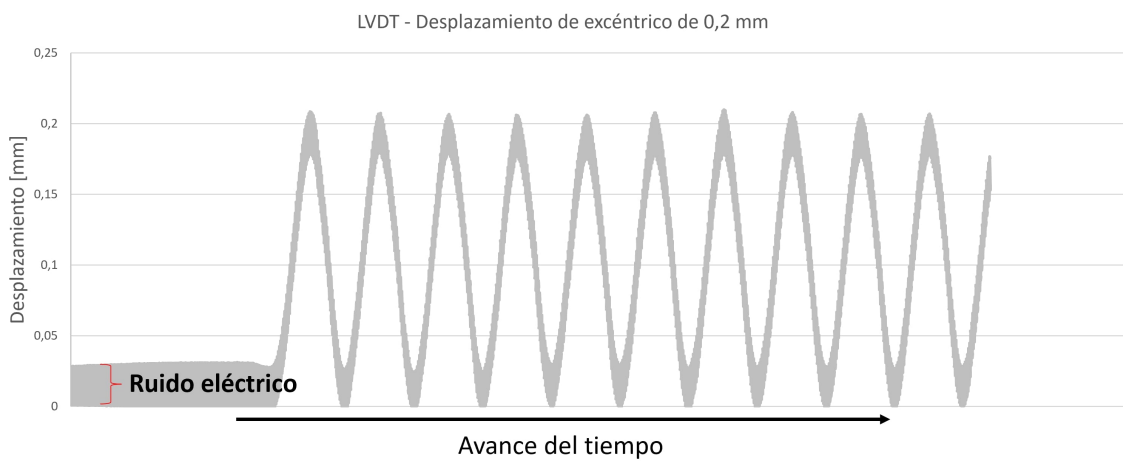


Figura 5.88. Gráfico obtenido a partir del LVDT, para una excentricidad de 0,2 mm.

La finalidad de realizar estas mediciones de desplazamiento de excéntrico, es para poder corroborar que la escala que presenta la máquina es correcta. En todas las gráficas obtenidas, se puede ver que al inicio, previo a que comience el ciclo de desplazamiento máximo y mínimo, se presenta bastante interferencia. Esto puede deberse a los valores de desplazamiento que se consideran, los cuales son pequeños, y pueden requerir de un instrumento con una precisión aún mayor o también a causa del propio ruido eléctrico generado por el adquirente de datos. No obstante, se puede observar que una vez que comienza el ciclo de desplazamiento, los desplazamientos máximos y mínimos se adecuan en gran porcentaje a lo esperado, por lo que la escala que tiene incorporada la máquina se encuentra calibrada.

### 3.2 Gráficas obtenidas a partir de ensayos de fatiga

A partir del comportamiento de la máquina de fatiga descrito en la sección anterior, se procedió a realizar los diferentes ensayos de fatiga, comenzando por las probetas de materiales que presentaban una esbeltez mayor, como es el caso de las probetas de A36 y 4140.

Las Figuras 5.89, 5.90 y 5.91, representan las gráficas obtenidas de rango de tensiones en función de la cantidad de ciclos hasta la rotura, en escala doble logarítmica. Es importante mencionar que se consideró un *run-out* cuando la probeta superó los 2E6 ciclos de ensayo. Como se aprecia en las figuras, todas las muestras ensayadas superaron dicha cantidad de ciclos, por lo que no se pudo analizar la etapa de vida finita ni el límite de fatiga (Lipiäinen, 2022).

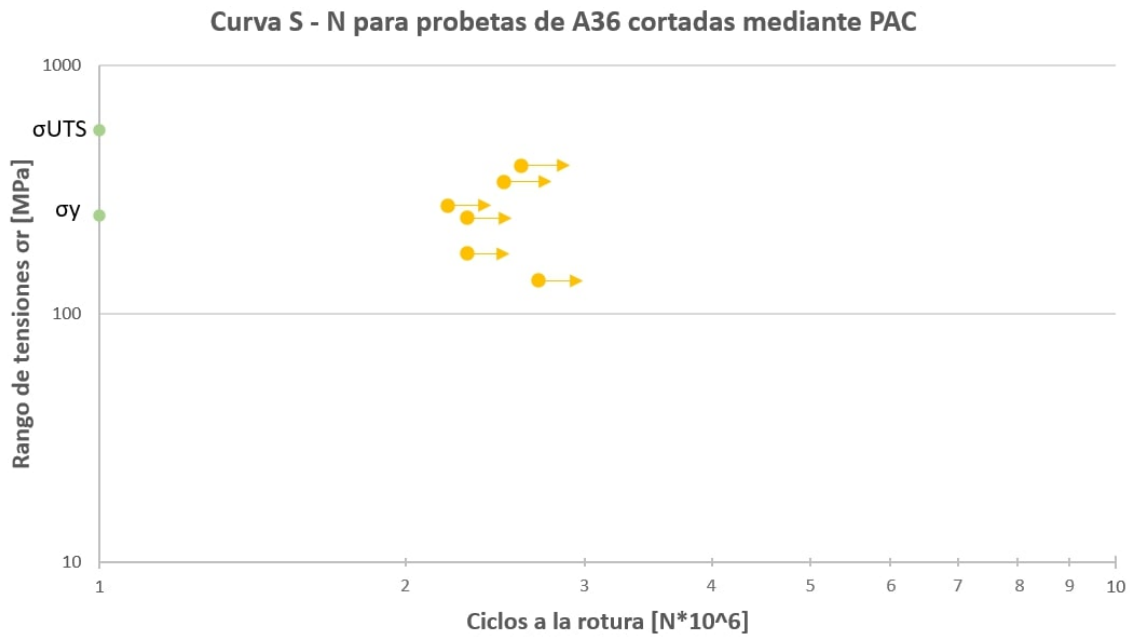


Figura 5.89. Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de A36 seccionadas mediante corte por plasma.

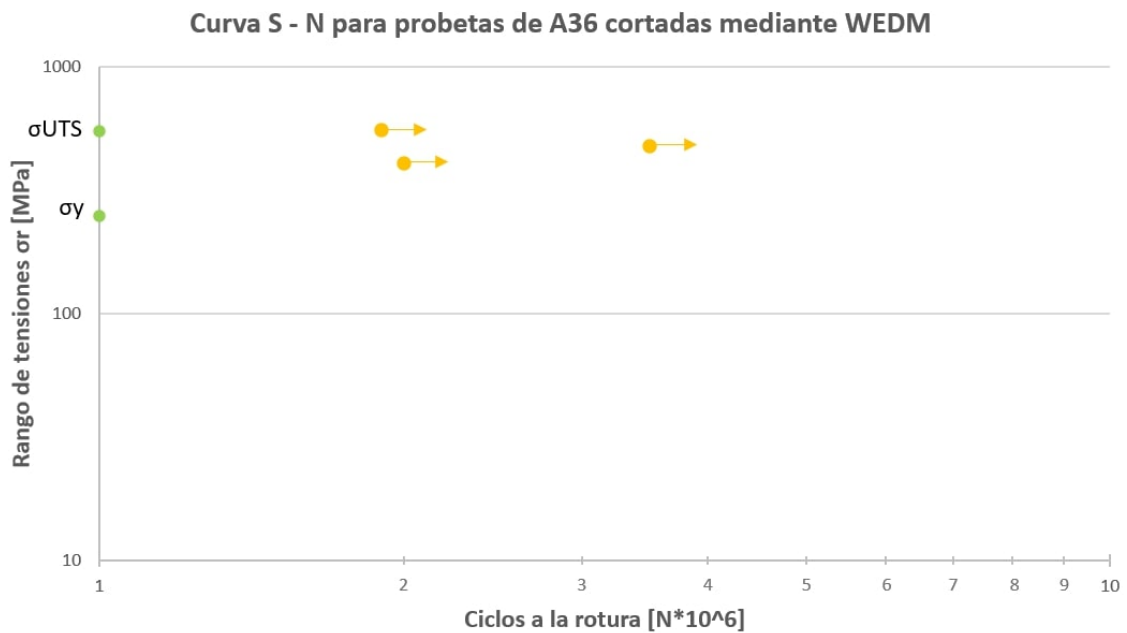


Figura 5.90. Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de A36 seccionadas mediante corte por hilo.

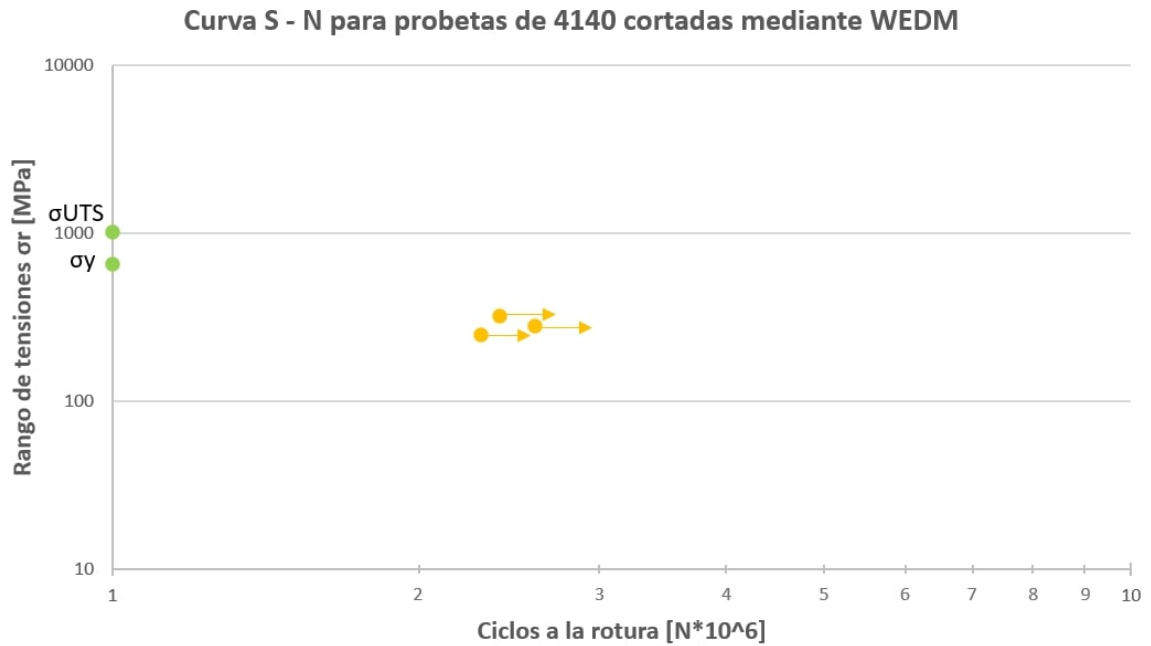


Figura 5.91. Curva S - N obtenida a partir de ensayar probetas de 4140 seccionadas mediante corte por hilo.

Como se puede observar de la Figura 5.89, para el caso del A36 cortado mediante plasma, se realizaron un total de 6 ensayos, donde el procedimiento consistió en realizar cada ensayo, aumentando la carga de manera gradual, hasta poder encontrar el límite de fatiga del material. Todos los ensayos superaron en gran medida el *run - out* establecido anteriormente, además de tomar valores de tensión media tanto por debajo como por encima de la tensión de fluencia, asumiendo el riesgo de que tensiones superiores a la de fluencia pueden provocar que el material entre en régimen plástico.

Para los casos donde se evaluaron probetas seccionadas mediante electroerosión por hilo, se tomaron 3 probetas para cada material. Para el caso del A36, se optó por someter la pieza a carga cíclica con un rango de tensiones superior a la de fluencia, con el fin de alcanzar una falla prematura de la pieza, a una cantidad de ciclos mucho menor, la cual tampoco fue posible.

En el caso del acero 4140, se evaluaron tensiones medias, de manera tal de que el máximo de tensión del ciclo, esté próximo al valor de fluencia del material.

A raíz de que los resultados de *run - out* obtenidos para distintos materiales y métodos de corte, considerando un abanico de tensiones, surge la incertidumbre en cuanto a si el comportamiento de la máquina es adecuado para realizar esta clase de ensayos. Al momento de analizar el funcionamiento de la máquina, se realizaron pruebas de manera

estática, o con pocos ciclos de carga sobre la pieza, lo cual puede diferir en gran medida de lo que sucede de manera dinámica, a 30 Hz de frecuencia y luego de varias horas de funcionamiento para alcanzar el *run-out*. Por tal motivo, se decidió evaluar la respuesta dinámica de probetas calibradas, lo cual se analiza a continuación.

### 3.3 Análisis dinámico y calibración de celda de carga

Dados los resultados obtenidos en las probetas ensayadas, se procedió a realizar nuevos ensayos con probetas instrumentadas, pero esta vez bajo una cantidad de ciclos elevada, de manera que el análisis de carga sea dinámico.

Para estos nuevos ensayos, se utilizó la probeta instrumentada que se observó en la Figura 4.11. Mediante la medición de la galga extensiométrica y el adquisidor de datos, se realizó un ensayo de aproximadamente 7 horas, equivalente a 500000 ciclos (aproximadamente un 25 % de la cantidad de ciclos hasta el run - out), con el fin de medir el comportamiento de la tensión media y la relación de carga durante el ensayo. Las Figuras 5.92 y 5.93, muestran la tendencia de ambas variables luego del ensayo.

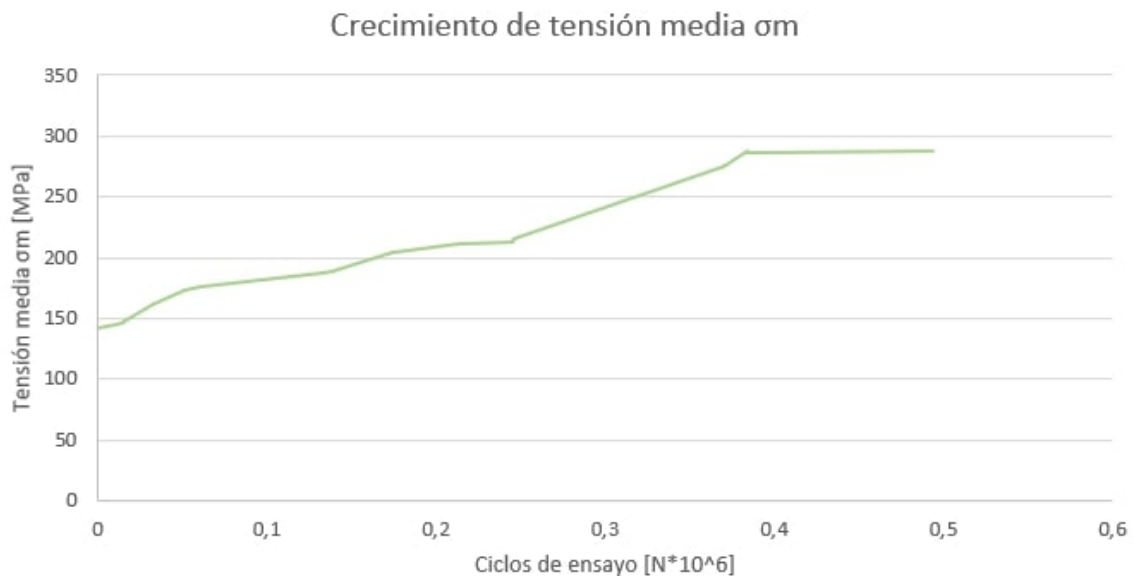


Figura 5.92. Crecimiento de la tensión media en probeta de A36 con galga extensiométrica adherida.

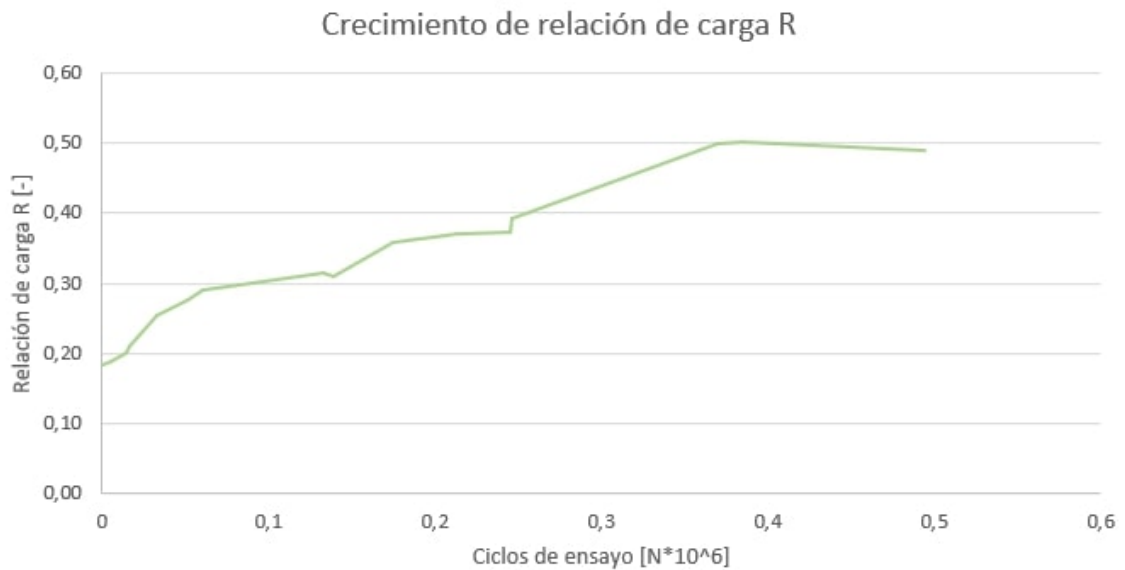


Figura 5.93. Crecimiento de la relación de carga en probeta de A36 con galga extensiométrica adherida.

Tal y como se observa, ambas gráficas presentaron tendencias crecientes, producto del aumento tanto de la tensión máxima como de la tensión mínima. En principio, estas nuevas mediciones pueden ser un justificativo de por qué las probetas afectadas térmicamente no fisuraron. Por otro lado, un incremento de la carga también puede provocar que la probeta entre en la zona de máxima tensión, alterando el gradiente de tensiones, y en consecuencia, la tensión nominal del ensayo.

Ante la incertidumbre generada por las mediciones obtenidas mediante las galgas extensiométricas, se evaluó otra forma de medición que brinde información de la carga que se estaba aplicando sobre la probeta. La máquina de fatiga, cuenta con una celda de carga incorporada, Figura 5.94, la cual no se encontraba en funcionamiento a la hora de realizar los ensayos. Ante la presente problemática, se decidió llevar a cabo el arreglo y calibración de la misma para poder tomar mediciones directamente desde dónde se encontraba el punto de medición, el cual estaba en el interior de la travesa.





Figura 5.94. Sistema de medición fuera de funcionamiento de la máquina de fatiga.

Para realizar la calibración, se utilizó una celda de carga tipo S de 500 kg, Figura 5.95, en la cual se evaluaron distintos puntos de tensión de la máquina, variando la precarga del tornillo, de manera tal que se logró construir una regresión cúbica que permitió relacionar las variables de salida que brindaba el instrumento de medición incorporado en la máquina, con la carga en kgf que se aplicaba sobre la probeta (Anexo B).

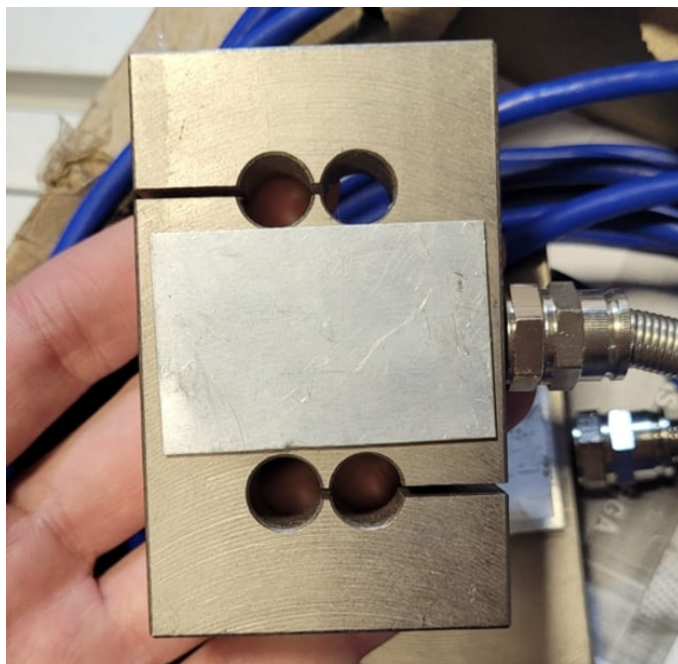


Figura 5.95. Celda de carga tipo S de 500 kg utilizada para calibrar el sistema de medición incorporado en la máquina de fatiga.

Una vez ejecutada la calibración, se realizó un ensayo de fatiga con una probeta de material A36 luego de ser seccionada mediante corte por hilo, con un desplazamiento de excéntrico de 0,25 mm (574 kgf/340 MPa), de manera tal de ver el comportamiento de la carga con esta nueva forma de medición. Se realizaron un total de 3 mediciones: al inicio del ensayo, luego de dos horas de aplicación de carga, y finalmente, al cumplir 3 horas de someter la probeta a esfuerzos cíclicos.

Las Figuras 5.96, 5.97 y 5.98 muestran la variación que se presentó para los 3 puntos de medición referidos anteriormente.

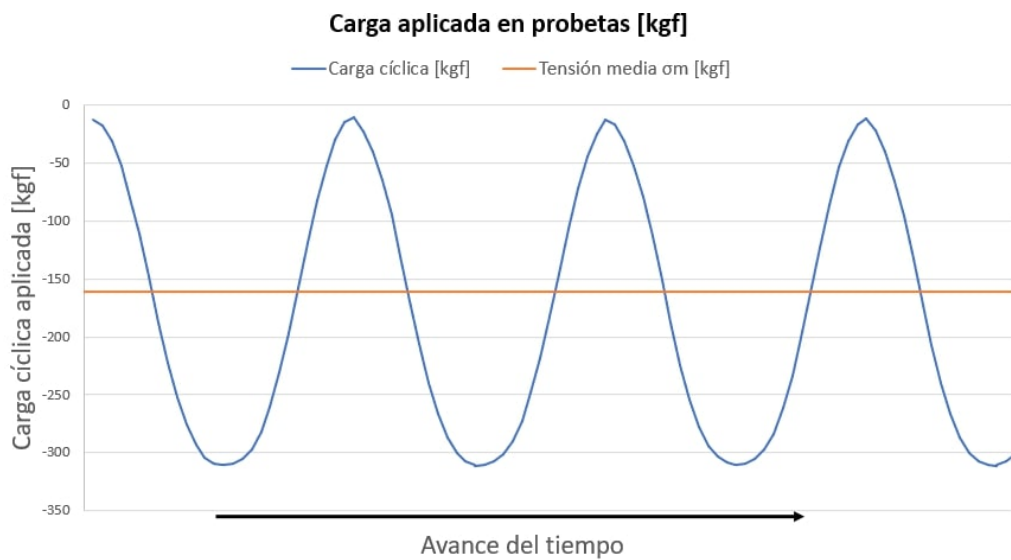


Figura 5.96. Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, al inicio del ensayo.

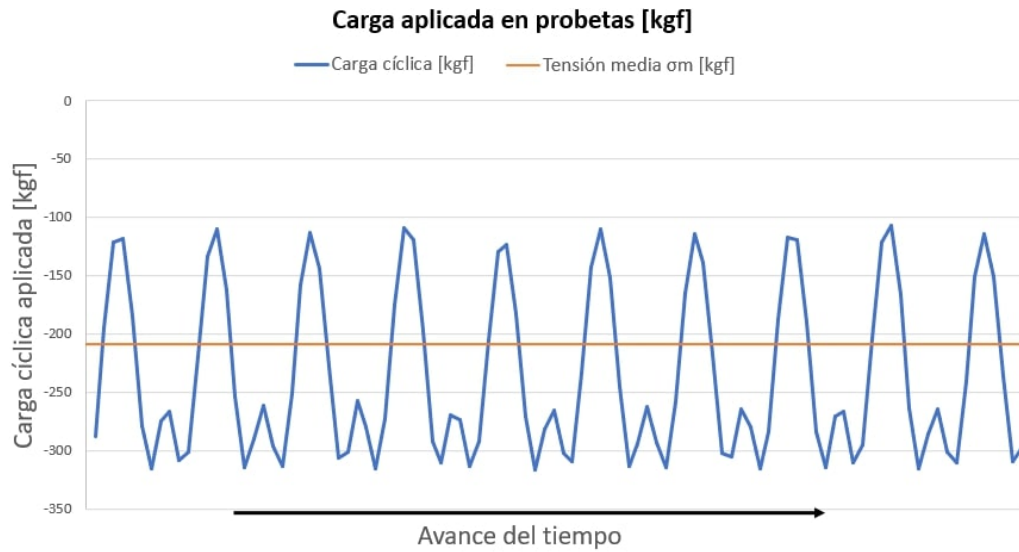


Figura 5.97. Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, luego de 2 horas de ensayo.

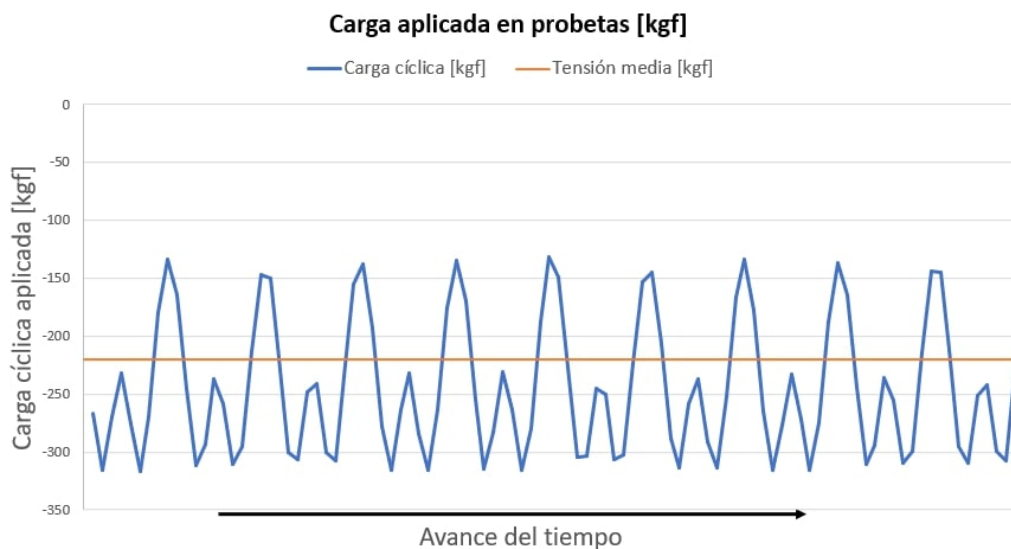


Figura 5.98. Gráfico de carga cíclica obtenido con la celda de carga de la máquina de fatiga, luego de 3 horas de ensayo.

En primer lugar, se observa sobre la Figura 5.96, que la carga máxima aplicada sobre la probeta es cercana a 310 kgf, equivalentes a 183 MPa, lo cual es casi un 50% menor que el esfuerzo teórico que se obtendría si se aplican las ecuaciones del Anexo A para un desplazamiento de excéntrico de 0,25 mm. De la misma manera, la carga mínima aplicada también es menor a la teórica, dando un valor real aproximado de 20 kgf, u 11 MPa. Bajo estos valores, se obtiene al inicio del ensayo, una relación de carga  $R = 0,065$ , próximo al valor típico del ensayo de  $R = 0,1$  (Aldazabal, 2018). Sobre la gráfica también se puede

observar el valor de tensión media del ensayo, la cual tiene un valor de 160 kgf, equivalentes a 95 MPa.

A partir del gráfico de la Figura 5.97, se visualiza como la carga mínima del ensayo fue notoriamente afectada luego de 215000 ciclos de esfuerzo, dando ahora un valor de carga mínima cercana a 100 kgf, es decir, 60 MPa. Esto no fue apreciable para la carga máxima, la cual se mantuvo en las cercanías de los 310 kgf. Por supuesto, la caída de la carga mínima no sólo afecta la tensión media, ahora de 200 kgf (aproximadamente 118 MPa) sino también la relación de carga  $R$ , ahora cercano a 0,3.

Otra particularidad que se visualizó luego de 2 horas de funcionamiento de la máquina, es la alteración que tuvo el patrón de la carga cíclica en la medición. Tal y como se puede observar, el patrón no sólo perdió la forma sinusoidal que presentaba al comienzo de los ensayos, sino que también se introdujo un cresta intermedia entre dos puntos mínimo, con un valor promedio de 265 kgf (157 MPa), la cual provoca que se alcance el valor máximo de tensión dos veces previo a volver a tener la carga mínima aplicada sobre la probeta.

Por último, en la Figura 5.98, luego de 3 horas de ensayo equivalentes a 325000 ciclos, se visualiza como la tensión mínima de la probeta, aumentó hasta un valor aproximado de 120 kgf (71 MPa), mientras que el máximo valor de carga se mantuvo en 310 kgf. Una vez más, el valor de tensión media y de relación de carga del ensayo aumentaron. Además de esto, el patrón visto en la Figura 5.97 se repite, pero esta vez, la cresta intermedia tiene un valor menor al par de la Figura anterior, alcanzando un promedio de 240 kgf, o 142 MPa.

Es importante mencionar que estos resultados implican, no solo un aumento de la tensión media y la relación de carga (lo cual también se observó en las Figuras 5.92 y 5.93), sino también una disminución apreciable del rango de tensiones ( $\sigma_r$ ). Esto, en términos prácticos implica que se está ensayando en un rango de tensiones mucho menor que el esperado, y el cual puede estar por debajo del límite de fatiga. Sumado a ello, la forma del ciclo de carga cambia con el tiempo, por lo que no se pueden asegurar condiciones constantes durante el ensayo. Todo lo mencionado, actúa en detrimento de un ensayo adecuado.

Existen diferentes alternativas que pueden explicar el comportamiento observado en la máquina de ensayo. Algunas de ellas pueden ser:

1. El sistema de medición incorporado en la máquina no es adecuado.

2. El rodamiento acoplado al excéntrico de la máquina de fatiga, a medida que aumentan los ciclos, puede presentar dilataciones considerables debido a las temperaturas alcanzadas por rozamiento.
3. Los rodillos de apoyo pueden generar plastificación en los puntos de contacto con la probeta, modificando la tensión de ensayo.
4. El propio diseño de la máquina.

Cabe destacar que la máquina fue diseñada para ensayos de prefisuración de probetas entalladas. Esta característica acelera el proceso de nucleación y crecimiento de fisura, debido a la concentración de tensiones en la raíz de la entalla. En el caso de las probetas ensayadas, si bien se evidenció cierta rugosidad con valles y crestas, es probable que el efecto concentrador de tensiones no haya sido tan severo como para favorecer marcadamente el mecanismo de daño.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se evaluaron los efectos de diversos métodos de corte térmicos sobre distintos materiales base, de interés en la industria regional. El análisis consistió en el estudio de la microestructura modificada por el corte, y su relación con la velocidad de avance. Asimismo, se fabricaron probetas de flexión en tres puntos, y se ensayaron a fatiga en una máquina de flexión rotativa. Las conclusiones más importantes de los estudios desarrollados en el presente trabajo son las siguientes:

- En líneas generales, el corte por plasma es el método que mejor se desempeñó para el desarrollo de este PIP. Este método permitió realizar cortes en todos los materiales considerados. Además, en comparación con oxicorte, las variaciones microestructurales y de dureza fueron más localizadas sobre el borde de corte, dando lugar a espesor de ZAC y rango de variación de microdureza menores. Aún así, el corte por plasma presentó la limitación en cuanto al espesor de chapa a cortar. En particular, el seccionamiento de la chapa de 1" de acero 4140 mostró dificultades técnicas que condujeron a cortes de mala calidad.
- El oxicorte es un método muy versátil a la hora de realizar trabajo de campo, pero la terminación superficial que deja sobre los materiales es muy deficiente. En este PIP se automatizó el proceso mediante el uso de un RAILTRAC, permitiendo que se obtengan terminaciones superficiales mucho más aceptables para este método. Por supuesto, esto hace que el método ya no sea aplicable en campo. Otra desventaja intrínseca al método, es que sólo permite cortar materiales ferrosos, los cuales tuvieron los espesores de ZAC medidos más elevados y un rango de variación de dureza más prolongado, aunque los valores de dureza fueron menores a los obtenidos mediante corte por plasma.
- El corte por hilo, resultó ser el único método térmico que no generó cambios microestructurales ni de dureza considerables en ninguno de los 4 materiales evaluados.

No obstante, las velocidades de avance utilizadas para este método, son considerablemente menores que las de los otros métodos térmicos. Esta característica, sumado al tiempo que se demora en el montaje de la pieza en la máquina CNC y su posterior programación, hacen que el método pierda practicidad por tiempos de producción elevados.

- Si bien a la hora de analizar productividad de cada método, se deben considerar los costos asociados a cada uno, para los aspectos considerados (terminación superficial, velocidad de corte y espesor de ZAC) el corte por plasma fue el método que tuvo la mejor performance. Para el DSS y el aluminio, las terminaciones superficiales fueron muy deficientes a comparación del corte por hilo, pero esto quedaba subsanado por la diferencia de velocidades de corte que permitía cada método, sumado a que el espesor de ZAC no era considerable. En el caso del A36, las 3 variables dieron un gran resultado ante el uso de corte por plasma, obteniendo una terminación superficial bastante lisa (en particular, para velocidades de 45 y 50 cm/min), un espesor de ZAC menor a 0.57mm, y no hubo inconvenientes para exigir la velocidad de corte del método hasta 70 cm/min, mientras que para este material, con la máxima velocidad de oxicorte utilizada (40 cm/min), se obtuvo un espesor de ZAC de 0.84mm. Por último, para el acero 4140, dada la dificultad técnica de la máquina de plasma, resultó más simple y efectivo utilizar el método oxicorte, el cual permitió velocidades de corte de hasta 35 cm/min, y dando como resultado un espesor de ZAC muy similar al obtenido luego de utilizar velocidad de corte por plasma de 10 cm/min (aproximadamente 1.5mm). Además, la terminación superficial utilizando RAILTRAC fue muy aceptable.
- Los resultados obtenidos del espesor de la ZAC medido mediante imágenes y determinado por el ensayo de dureza, presentan buena correlación.
- En cuanto a la performance a la fatiga, si bien no fue posible evidenciar diferencias en el comportamiento de los materiales afectados térmicamente, si fue posible identificar características de la máquina utilizada que no son adecuadas para el tipo de caracterización que se pretendía para este PIP.

En cuanto a las conclusiones personales, este PIP me permitió llevar adelante distintas prácticas de laboratorio y taller que por cuestiones de tiempo no se llevan adelante en las distintas asignaturas que brinda el plan de estudios de Ingeniería Mecánica de la UNCo.

Esto implica, desde la preparación metalográfica de las muestras, hasta realizar los cortes y correcciones de puntos de apoyo de las probetas para su posterior ensayo de fatiga, todo esto mediante las máquinas que se presentan en el DMA (Departamento de Mecánica Aplicada) en general. Sumado a lo anterior, se implementaron distintos métodos de medición, instrumentación y calibración (galgas extensométricas, LVDT, celdas de carga, comparador, etc.) para comprender los resultados del ensayo de fatiga. Estas mediciones permitieron que fuera posible analizar cuantitativamente el comportamiento del equipo en forma estática y dinámica, lo cual hace que sea un gran aporte a los trabajos futuros que se vayan a desarrollar con esta máquina. Considero que esto es un complemento muy positivo para la vida profesional.

## 1 TAREAS FUTURAS

- Dada las limitaciones de la máquina de fatiga, se recomienda que la evaluación del comportamiento a la fatiga se realice mediante probetas de tracción tipo hueso, las cuales deben ser fabricadas mediante un pantógrafo CNC con los distintos métodos de corte.
- Medir rugosidad en las probetas, dado que por cuestiones de la compra del equipo no se pudo avanzar con dicha comparación.
- Profundizar el análisis de la capa blanca detectada en los materiales cortados mediante corte por hilo para determinar si corresponde a metal resolidificado del metal base. Si bien se utilizó la microscopía electrónica de barrido para el análisis de ciertas muestras, los análisis de composición química obtenidos son valores semicuantitativos que no pueden ser utilizados como valores absolutos. Resta obtener valores cuantitativos de la composición química a nivel superficial.



## Referencias

- Akkurt, A. (2015). The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.004>
- Aldazabal, J. (2018). Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate. *Metals*. <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/6/447>
- Antar, M. T. (2012). Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage wire electrical discharge machining. *Materials Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.003>
- ASTM. (2000). Standard Specification for Carbon Structural Steel (A 36/A 36M - 00a).
- ASTM. (2011a). Standard Guide for Preparation of Metallographics Specimens (E3-11).
- Boumerzoug, Z. (2010). Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Scientific Research*. [doi:10.4236/eng.2010.27066](https://doi.org/10.4236/eng.2010.27066)
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Material Science and Engineering*. John Wiley Sons.
- Casillas, A. L. (1997). *Máquinas: Cálculos de Taller*.
- Chapetti, M. (2014). *Mecánica de Materiales*. Ediciones Al Margen.
- Cicero, S. (2016). Fatigue behaviour of structural steels with oxy-fuel, plasma and laser cut straight edges. Definition of Eurocode 3 FAT classes. *Engineering Structures*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615007683>
- Corporation, T. D. (2012). Cutmaster Plasma Cutting System. *Victor Technologies International*.
- Dieter, G. (1986). *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw Hill Education.
- Dominic, P. (2004). Widmanstatten ferrite plate formation in low-carbon steels. *Faculty of Engineering and Information Science*. <https://core.ac.uk/download/pdf/36998966.pdf>
- Drozda, T. (1983). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. Mc Graw Hill Education.

- Garcia, T. (2015). Effect of thermal cutting methods on the fatigue life of high strength structural steel S690Q. *Pressure Vessels and Piping Conference*. <https://doi.org/10.1115/PVP2015-45174>
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (2002). *Mechanics of Materials*. Boston.
- Gostimirović, M. (2020). An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining. *ATM Journal*. <http://journal-atm.org/Archive/ATM-2020-1-001.pdf>
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley; Sons.
- Handbook, A. (1990). Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys (ASM International).
- Internacional, A. (2004a). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
- Internacional, A. (2004b). *ASM Handbook Volume 4: Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International.
- Internacional, A. (2004c). *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. ASM International.
- Jokiaho, T. (2020). Cracking and failure characteristics of flame cut thick steel plates. *Metallurgical and Materials Transactions*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-020-05639-x>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2020). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Pearson Education.
- Lipiäinen, K. (2021). Fatigue strength characterization of high and ultra-high-strength steel cut edges. *Engineering Structures*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620341456>
- Lipiäinen, K. (2022). Evaluation of geometrical notch and quality effects in the fatigue strength assessment of ultra-high-strength steel cut edges. *Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.069>
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2012). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley.
- Maroni, P. J. (1976). *Templabilidad: Un método para seleccionar aceros*. Libería Mitre.
- Molladavoudi, H. R. (2011). Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming.

- Najm, V. N. (2018). Experimental investigation of wire EDM process parameters on heat affected zone. *Engineering and Technology Journal*. <https://www.iasj.net/iasj/download/3ff3dae040db6feb>
- Oñate, E. (1992). *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos: análisis elástico lineal*.
- Pichumani, S. (2018). Investigation on mechanical behavior and material characteristics of various weight composition of SiCp reinforced aluminium metal matrix composite.
- Pramanik, A. (2018). Processing of duplex stainless steel by WEDM. *Materials and Manufacturing Processes*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2018.1453165>
- Pramanik, A. (2019). Effect of wire electric discharge machining (EDM) parameters on fatigue life of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105186>
- Siebert, C. A. (1977). *The hardenability of steels*. American Society for Metals.
- Tingaev, A. K., & Gubaydulin, R. G. (2016). Study of the effect of thermal cutting on the microstructure and chemical composition of the edges of workpieces made of steel brands S345, S390. *Procedia engineering*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314886>
- Trauth, D. (2016). Investigation of the surface integrity and fatigue strength of Inconel718 after wire EDM and machine hammer peening. *International Journal of Material Forming*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12289-015-1249-4>
- Yilmaz, Y., & Kesti, E. (2020). Investigation of the Effect of Normalization Process on Mechanical Properties and Microstructure of the AISI 4140 Alloy Steel. *IJSR*. <https://www.ijsr.net/archive/v10i7/SR21726140705.pdf>

## A. Anexo I

Para llevar adelante el cálculo de la tensión sobre la probeta en la flexión en 3 puntos, se consideran las siguientes ecuaciones:

$$\text{Resistencia a la flexión} \rightarrow \sigma = \frac{M}{\frac{I}{c}} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Momento flector máximo} \rightarrow M = \frac{PL}{4} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Deflexión máxima de viga} \rightarrow \delta = -\frac{PL^3}{48EI} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Momento de inercia} \rightarrow I = \frac{t^3w}{12} \quad (\text{A.4})$$

Dónde:

- $I = \frac{t^3w}{12} \rightarrow$  Segundo momento de inercia de la probeta.
- $t \rightarrow$  Espesor de la probeta.
- $w \rightarrow$  Ancho de la probeta.
- $P \rightarrow$  Carga aplicada a la probeta.
- $L \rightarrow$  Longitud de la probeta.
- $E \rightarrow$  Módulo de elasticidad del material de la probeta.
- $c = h/2 \rightarrow$  Distancia hasta el centroide de la probeta.

## B. Anexo II

Para correlacionar las variables crudas del sistema de medición incorporado en la máquina con la celda de carga, se obtuvo la siguiente expresión:

$$y = -0,0006x^3 - 0,1067x^2 - 1,6021x - 45,145 \quad (\text{B.1})$$

Dónde:

- $y$  = Valor obtenido de celda de carga tipo S, en kgf
- $x$  = Valor de variable cruda obtenida del sistema de medición.