

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## ***ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR COBRE Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES EN ACERO AL CARBONO ASTM A36***

***Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela***

***Por los bachilleres:  
Marciano C., Yonathan  
Salazar H., Julio D.***

***Para optar al título  
de Ingeniero Mecánico***

***Caracas, 2008***

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### ***ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR COBRE Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES EN ACERO AL CARBONO ASTM A36***

TUTOR ACADEMICO: Prof. Jorge Perdigon

***Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los bachilleres:  
Marciano C., Yonathan  
Salazar H., Julio D.  
Para optar al título  
de Ingeniero Mecánico***

***Caracas, 2008***



## ***DEDICATORIA***

*A nuestros padres...*

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Jorge Perdigón por tener siempre tanta paciencia con nosotros, por tendernos su mano amiga en todo momento, comprendernos siempre y servir más allá que de tutor; un buen guía y amigo.

A nuestros padres, gracias por creer en nosotros, gracias por el apoyo y por siempre haber estado ahí.

A nuestra Universidad Central de Venezuela, sin esta institución no habría sido posible nada de esto. Tantos momentos, tantas personas que pasaron por nuestras vidas gracias a esta universidad.

Al Ingeniero y amigo Xabier Sarmiento, cuya colaboración y apoyo durante la realización de este proyecto fue invaluable.

Al personal técnico del galpón de Ing. Mecánica, gracias por esa ayuda y por ser parte de la UCV.

Al personal de vigilantes que siempre velaron por nosotros hasta cuando no hacía falta.

A todos los docentes encargados del laboratorio de ensayos mecánicos por brindarnos su confianza y ayuda en todo momento.

Al personal de la biblioteca.

A la empresa MECATEC por su ayuda en la fabricación de las probetas y elaboración de la electro erosión.

En fin a todos nuestros amigos, compañeros y afines que en algún momento hicieron algo por muy pequeño que sea para que este proyecto saliera adelante, ellos saben quiénes son, su granito de arena aportó más de lo que se imaginan.

## **RESUMEN**

*Marciano C., Yonathan y Salazar H., Julio D.*

### **ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR COBRE Y SU INFLUENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES EN ACERO AL CARBONO ASTM A36**

**Tutor académico: Prof. Jorge Perdigón**

**Tesis de grado. Caracas. Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2008. Páginas 82.**

***Palabras clave: contaminación por cobre; incrustaciones de cobre; acero ASTM A36; tracción; fatiga; galga extensiométrica; microscopio de barrido electrónico.***

Para simular la contaminación del cobre en el acero, se realizaron incrustaciones semiesféricas de cobre de 2mm de diámetro y 1mm de profundidad en el centro de una de las caras de las probetas ensayadas, empleando un equipo de soldadura a 36 V DC y 120A. Los ensayos de tracción se hicieron con probetas de acero con y sin incrustaciones de cobre. Luego se procede a realizar ensayos de fatiga con probetas de acero, unas con muesca en el centro (concentrador de esfuerzos) y otras con incrustaciones de cobre. También se hizo un estudio de la superficie de fractura y su análisis químico empleando un microscopio de barrido electrónico. En los ensayos de fatiga, se observó que las fallas bajo esfuerzos alternantes de las probetas de acero ASTM A36 con incrustaciones de cobre sucedió a esfuerzos inferiores que las fallas de las mismas probetas sin incrustaciones de cobre, aún cuando estas últimas tenían una muesca que cumplía la función de concentrador de esfuerzos. Bajo esfuerzos axiales de tracción simple, el límite de fluencia y el límite máximo de tracción de las probetas sin ningún tipo de interrupción material macroscópica y de las probetas con incrustaciones de cobre son los mismos. En base a estos resultados se podría inferir que las fallas en campo de las estructuras metálicas de acero ASTM A36 se deben a una disminución en su resistencia a la fatiga como consecuencia de las incrustaciones de cobre en ellas observadas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>RESEÑA HISTÓRICA.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>5</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
1.1. Aceros al carbono .....	5
1.1.1. Acero ASTM A36.....	7
1.2. Efectos del cobre en el acero.....	8
1.3. Resistencia de los materiales .....	10
1.3.1. Ensayo de tracción.....	11
1.4. Fatiga .....	16
1.4.1. Ensayos de fatiga .....	22
1.4.2. Diagrama S-N .....	24
1.5. Galgas extensiométricas .....	26
1.5.1. Puente de Wheatstone en condición de equilibrio .....	26
1.5.2. Puente de Wheatstone en condición de no equilibrio.....	29
1.6. Electroerosión .....	30
1.6.1. Proceso de electroerosión con electrodo de forma .....	31
1.6.2. El electrodo de forma .....	32
1.6.3. Ventajas del proceso de electroerosión con electrodo de forma .....	33
1.6.4. Inconvenientes en el proceso de electroerosión con electrodo de forma .....	33
1.7. Microscopio de barrido electrónico .....	34
1.7.1. AES (Auger Electrón Spectroscopy) .....	35
1.7.2. STEM (Scanning Transmisión Electron Microscope) .....	36
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>38</b>
<b>2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
2.1. Materiales .....	38
2.2. Equipos.....	38
2.2.1. Equipos empleados para la elaboración de las probetas .....	38
2.2.2. Máquinas para ensayos .....	38
2.2.3. Equipos para medición de esfuerzos en ensayos de fatiga .....	39
2.2.4. Otros equipos de soporte.....	39
2.3. Procedimientos experimentales .....	40

2.3.1. Elaboración y preparación de las probetas de ensayo .....	40
2.3.2. Incrustación (contaminación) de cobre en las probetas de acero ASTM.....	42
2.3.3. Ensayos de tracción.....	44
2.3.4. Medición del esfuerzo de fatiga con galga extensiométrica.....	45
2.3.5. Ensayos de fatiga .....	51
2.3.6. Análisis superficial con MBE (Microscopio de Barrido Electrónico).....	51
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>53</b>
<b>3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES .....</b>	<b>53</b>
3.1. Acabado de probetas .....	53
3.2. Resultados puente de Wheatstone.....	54
3.3. Ensayos de tracción.....	54
3.4. Ensayos de fatiga .....	57
3.5. Microscopio de barrido electrónico .....	59
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>73</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
4.1. Conclusiones .....	73
4.2. Recomendaciones.....	73
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO I:</b> Esquema de las partes de una máquina marca Schenck empleada para la realización de los ensayos de fatiga. ....	<b>78</b>
<b>ANEXO II:</b> Certificado de calidad de la empresa SIDOR C.A., responsable por la fabricación de la lámina de acero ASTM A36 utilizada para la fabricación de las probetas de ensayo empleadas. Contiene especificaciones de la resistencia mecánica y la composición química del material .....	<b>79</b>
<b>ANEXO III:</b> Detalle de las pruebas de calibración de las galgas extensiométricas y el puente de Wheatstone empleando el montaje mostrado en la figura 2.5 y añadiendo pesos para determinar la relación voltaje contra peso. ....	<b>80</b>
<b>ANEXO IV:</b> Detalle de las pruebas de calibración de la máquina Schenck para ensayos de fatiga empleando el puente de Wheatstone y la ecuación 2.8 para determinar el esfuerzo de flexión ejercido sobre las probetas, con cada media vuelta que se da al tornillo responsable por los esfuerzos en dicha máquina. ....	<b>81</b>

## **TABLAS**

<b>Tabla 1.1:</b>	<b>Composición química de los aceros al carbono ordinarios.....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla 1.2:</b>	<b>Composición química (% en peso) del acero ASTM A36.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 1.3:</b>	<b>Requerimiento físicos del acero ASTM A36.....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 2.1:</b>	<b>Especificaciones físicas y mecánicas según certificado de calidad del acero ASTM A36 empleado para los ensayos de tracción y fatiga realizados.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 2.2:</b>	<b>Composición química según certificado de calidad del acero ASTM A36 empleado para los ensayos de tracción y fatiga realizados.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 3.1:</b>	<b>Porcentaje del esfuerzo de flexión respecto del esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 según el número de vueltas que se da al tornillo responsable por ejercer dichos esfuerzos en la máquina Schenck empleada para los ensayos de tracción. ....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 3.2:</b>	<b>Datos experimentales recolectados de los ensayos de tracción realizados a las cuatro (4) probetas.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 3.3:</b>	<b>Resultados de esfuerzo experimentales realizados a partir de los datos recolectados en la tabla 3.2 de los ensayos de tracción realizados a las cuatro (4) probetas.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 3.4:</b>	<b>Datos recolectados durante los ensayos de fatiga realizados a las probetas de acero ASTM A36 con muesca y con incrustaciones de cobre.....</b>	<b>57</b>

## **FIGURAS**

<b>Figura 1.1:</b>	<b>Isotermas ternarias ilustrando la influencia de diferentes elementos en la solubilidad del Cu en la austenita: (a) según Melford y (b) según Salter. ....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 1.2:</b>	<b>Efecto del cobre en la ductilidad de un acero 0.1C – 1.3Mn – 0.05Al – 0.04Nb para probetas coladas in situ y ensayas en aire. ....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 1.3:</b>	<b>Esquema de una máquina de ensayo de tracción. ....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 1.4:</b>	<b>Curva esfuerzo-deformación (tensión-alargamiento) de un acero. ....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 1.5:</b>	<b>Forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura. ....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 1.6:</b>	<b>Esquema del diagrama de Wöhler. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 1.7:</b>	<b>Esfuerzos cíclicos (a) de inversión completa, (b) de inversión repetida y (c) de tensión irregular o aleatoria. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 1.8:</b>	<b>Tipos de esfuerzo observados en los ensayos de fatiga. (a) Esfuerzos alternados; (b) Esfuerzos alternados asimétricos; (c) Esfuerzos intermitentes; (d) Esfuerzos pulsatorios. ....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 1.9:</b>	<b>Diagrama de Wöhler. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 1.10:</b>	<b>Diagrama de Wöhler para diferentes metales, entre los cuales se observa el acero ASTM A36. ....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 1.11:</b>	<b>Representación esquemática del puente de Wheatstone. “R1”, “R2”, “R3” y “R4” representan las resistencia que componen el puente de Wheatstone, “Vo” es un voltímetro y “Vs” es una fuente de poder. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 1.12:</b>	<b>Representación esquemática del puente de Wheatstone equilibrado resistivo con potenciómetro. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.1:</b>	<b>Esquema de las probetas planas empleadas para los ensayos de tracción. Especificaciones de la probeta en la tabla 2.2. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 2.2:</b>	<b>Esquema y medidas de las probetas empleadas para los ensayos de fatiga. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 2.3:</b>	<b>Contaminación de probetas de acero ASTM A36 con incrustaciones de cobre realizadas por un proceso de soldadura un cable de cobre desnudo de 2mm de diámetro. ....</b>	<b>43</b>

<b>Figura 2.4:</b>	<b>Detalle de la colocación de una galga extensiométrica sobre la superficie (una de las caras) de la probeta empleada para ensayos de fatiga.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2.5:</b>	<b>Detalle del montaje de la probeta de ensayos de fatiga empleada para la calibración de las galgas extensiométricas. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.6:</b>	<b>Detalle del montaje del ensayo de fatiga (a) máquina Schenck y puente de Wheatstone y (b) detalle de la máquina de Schenck donde se coloca la probeta conectada al puente de Wheatstone. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 3.1:</b>	<b>Modelos de probetas empleadas para (a) ensayos de tracción sin incrustación de cobre; (b) ensayos de tracción con incrustación de cobre; (c) ensayos de fatiga con incrustación de cobre.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 3.2:</b>	<b>Curva de tracción-deformación de la probeta 1E. 1cm eje y = 0,5Mpondio. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.3:</b>	<b>Curva de tracción-deformación de la probeta 2E. 1cm eje y = 0,5Mpondio. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.4:</b>	<b>Curva de tracción-deformación de la probeta 1C. 1cm eje y = 0,5Mpondio. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.5:</b>	<b>Curva de tracción-deformación de la probeta 2C. 1cm eje y = 0,5Mpondio. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.6:</b>	<b>Diagrama S-N de los ensayos de fatiga realizados a las probetas con muesca (color rojo con línea de tendencia color rojo), con incrustaciones de cobre (color azul con línea de tendencia color azul) y una curva teórica para el acero ASTM A36 con su respectiva línea de tendencia (curvas verde y púrpura respectivamente). ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.6:</b>	<b>Vista superior del espécimen (probeta) analizado en el MBE. Se empleo la cara superior de la probeta, sobre la cual se hizo la incrustación (contaminación) del cobre. Se puede observar el detalle (mapa) de las figuras 3.8 y 3.11 mostradas más adelante. La línea amarilla representa la dirección y sentido del estudio realizado en MBE. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 3.7:</b>	<b>Misma vista de la Figura 3.6. En esta figura se encuentran señalados los puntos de interés a ser estudiados. La cruz en color rojo señala en punto donde sucedió el cortocircuito. Se pueden distinguir 3 zonas importantes: zona rica en cobre, interfase zona de transición Hierro-cobre y zona rica en hierro. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.8:</b>	<b>Mapeo de la superficie estudiada con el MBE. Se observa el detalle de la composición química de dicha superficie.....</b>	<b>62</b>

<b>Figura 3.9:</b>	<b>Detalle del límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre señalados en la figura 3.7. En la figura 3.6 se muestra un mapa de la ubicación de estudio de esta figura. Se observan micro-grietas en la zona rica en cobre y efervescencia en el límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre. ....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.10:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.9. Se puede observar la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) en la superficie estudiada. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 3.11:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.9. Se observa la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) en relación con el hierro (color verde) presente en la superficie estudiada. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 3.12:</b>	<b>Detalle del límite entre la zona de transición cobre-hierro en la parte superior y la zona rica en hierro en la parte inferior, señaladas en la figura 3.7. En la figura 3.6 se muestra un mapa de la ubicación de estudio de esta figura. ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 3.13:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) presente en la superficie estudiada en esta vista. Se observa la presencia de cobre en la interfase hierro-cobre (parte superior de la figura) y la carencia del mismo en la zona rica en hierro (parte inferior). ....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 3.14:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) y hierro (color verde) presentes en la superficie estudiada en esta vista. A medida que se acerca el límite de la interfase hierro-cobre y comienza la zona rica en cobre disminuye la presencia del cobre. ....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 3.15:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de hierro (color verde) presente en la superficie estudiada en esta vista. A medida que se acerca el límite de la interfase hierro-cobre y comienza la zona rica se incrementa la presencia de hierro en la superficie estudiada. ....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 3.16:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.12. Se muestra con una flecha amarilla la dirección y sentido del estudio realizado con el MBE sobre la superficie y se señala con una cruz roja el punto de estudio que señala la gráfica mostrada en la figura 3.17.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 3.17:</b>	<b>Mapeo de la superficie mostrada en la figura 3.16. Muestra la composición química en la superficie estudiada. La barra negra vertical indica la composición química en el punto señalado con una cruz roja en la figura 3.16. ....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 3.18:</b>	<b>Misma vista de la figura 3.16. Se muestra con una flecha amarilla la dirección y sentido del estudio realizado con el MBE sobre la superficie y se señala con una cruz roja el punto de estudio que señala la gráfica mostrada en la figura 3.19.....</b>	<b>70</b>

<b>Figura 3.19:</b>	<b>Mapeo de la superficie mostrada en la figura 3.18. Muestra la composición química en la superficie estudiada. La barra negra vertical indica la composición química en el punto señalado con una cruz roja en la figura 3.18. ....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.20:</b>	<b>Vista del límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre. Se observa la convergencia de micro grietas a un punto de cobre concentrador de esfuerzos. ....</b>	<b>72</b>

## **INTRODUCCIÓN**

El estudio de los efectos de la contaminación por incrustaciones de cobre en el acero ASTM A36 se hace importante puesto que en los trabajos de campo se han observado fallas de estructuras metálicas, que presentan dichas incrustaciones.

Aparentemente, estas incrustaciones (contaminación) de cobre en las estructuras metálicas de acero ASTM A36 contribuyen a desmejorar sus propiedades mecánicas, lo que no permite un desempeño eficiente de las mismas y pueden causar una fractura o falla prematura.

Este fenómeno se origina cuando el personal obrero que se encarga de realizar las soldaduras en las estructuras, toca o roza dichas estructuras con cables de cobre desnudos, que normalmente son empleados para conducir la corriente a los electrodos de los equipos de soldadura. Este toque o roce genera un cortocircuito entre la estructura de acero y el cable de cobre que deja incrustaciones de cobre.

Actualmente no existen en Venezuela bibliografías o estudios que respalden este fenómeno de contaminación por incrustaciones por cobre. Por ende tampoco existe un procedimiento o experimento que permita simular las condiciones de campo bajo las cuales se genera este fenómeno.

### ***Planteamiento del problema***

La contaminación por incrustaciones de cobre observada es posiblemente una de las condiciones por la cual las estructuras metálicas de acero ASTM A36 fallan antes de su tiempo estimado de vida.

***Objetivo general***

Determinar el efecto de la contaminación por incrustaciones de cobre en las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 a través de ensayos mecánicos en probetas con y sin incrustaciones de cobre.

***Objetivos específicos***

- Diseñar un procedimiento experimental mediante el cual se realicen incrustaciones de cobre por cortocircuito a probetas de acero ASTM A36, según normas ASTM E370 para ensayos de tracción y fatiga, que simulen las incrustaciones de cobre observadas en las estructuras metálicas en campo.
- Realizar ensayos de tracción que permitan determinar y comparar los esfuerzos de fluencia y esfuerzo último de tracción de las probetas de acero ASTM A36 con y sin incrustaciones de cobre.
- Realizar ensayos de fatiga que permitan construir curvas en un diagrama S-N para determinar y comparar el tiempo estimado de vida bajo esfuerzos de flexión alternativa en probetas de acero ASTM A36, con un concentrador de esfuerzos y otras con incrustaciones de cobre.
- Evaluar por microscopia de barrido la superficie de la probeta fracturada con incrustaciones de cobre y su composición química.

## **RESEÑA HISTÓRICA**

Desde hace varias décadas el cobre puede ser usado en aleación con el acero para aumentar su dureza y resistencia <sup>(1)</sup>. Sin embargo, el cobre también puede fragilizar las aleaciones de acero bajo ciertas condiciones. La disminución de las propiedades mecánicas del acero inducido por contaminación con cobre es un ejemplo clásico de las fallas producidas principalmente en las labores de construcción y mantenimiento de componentes estructurales metálicos. Este tipo de falla no está muy documentada y en la industria de la construcción venezolana es muy poca la información que se tiene al respecto.

Este trabajo es de gran importancia debido a la necesidad de comprender mejor el fenómeno de fragilización inducida por la contaminación con cobre en estructuras metálicas, la cual podría producir pérdidas de materiales y humanas. Así mismo, comprende difundir en la industria metalmecánica la importancia en la prevención de este fenómeno.

### ***Antecedentes***

En los trabajos de soldadura de campo, específicamente cuando se realizan soldaduras de estructuras metálicas de acero, se ha observado que en ocasiones el personal obrero toca o roza los cables de corriente (cables de cobre que conducen la corriente a los electrodos de los equipos de soldadura) contra las estructuras de acero que están siendo soldadas, originando un cortocircuito. Como consecuencia de estos cortocircuitos quedan incrustaciones de cobre sobre las estructuras de acero y, aparentemente, en estos defectos se inician las grietas que posteriormente crecen hasta hacer fallar (fracturar) la estructura metálica antes de su tiempo estimado de vida.

La pérdida de las propiedades mecánicas del acero debido a la contaminación por cobre, más precisamente en el caso de cortocircuito con cables de cobre, no se encuentra bien documentado en el país, y muchas industrias desconocen los alcances de dicho problema.

Esta pérdida de las propiedades mecánicas del acero no solo puede reducir la ductilidad, sino que reduce significativamente la resistencia a la tracción, disminuyendo su límite de fluencia. Esto genera un tipo de falla insidiosa que puede ocurrir a cargas muy por debajo de las cargas que normalmente pudieran causar la fractura. Por lo tanto, se puede calificar como falla desastrosa, puesto que pudiera incluso ocurrir sin mostrar signos de deterioro o deformación. Motivado a esto se propone realizar ensayos de tracción uniaxial a probetas de acero al carbono ASTM A36 normalizadas, así como ensayos de flexión alternativa o fatiga para determinar el efecto en las propiedades físicas que tiene una incrustación de cobre por cortocircuito, y ensayos a una probeta con un concentrador de esfuerzos para poder ver la magnitud del efecto de fragilización y así realizar comparaciones cuantitativas.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Aceros al carbono

El acero al carbono, constituye el principal producto de los aceros que se producen<sup>(2)</sup>, estimando que un 90% de la producción total producida mundialmente corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. Estos aceros son también conocidos como aceros de construcción, La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, también hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente como el azufre, fósforo, oxígeno e hidrógeno. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. En general los aceros al carbono ordinarios contienen:

**Tabla 1.1: Composición química típica de los aceros al carbono ordinarios (2).**

Elemento	Porcentaje
Carbono	<1%
Magnesio	< 0,90%
Silicio	< 0,50%
Fósforo	< 0,10%
Azufre	< 0,10%

Para los aceros son fundamentales ciertas propiedades de orden mecánico, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga, Estas propiedades dependen principalmente del porcentaje de carbono que contienen y demás elementos aleantes. De acuerdo con las propiedades mecánicas, se establecen una serie de grupos de aceros ordenados por su resistencia a la

tracción. Popularmente son conocidos estos aceros como: acero extrasuave, suave, semi-suave, semi-duro y duro

- **Aceros extrasuaves:** El porcentaje de carbono en este acero es de 0,15%, tiene una resistencia mecánica de 38-48 kg/mm<sup>2</sup>. Es un acero fácilmente soldable y deformable. Estos aceros son empleados para la fabricación de elementos de maquinaria de gran tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.
- **Aceros suaves:** El porcentaje de carbono es de 0,25%, tiene una resistencia mecánica de 48-55 kg/mm<sup>2</sup>. Se puede soldar con una técnica adecuada. Estos aceros son empleados para la fabricación de piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.
- **Aceros semi-suaves:** El porcentaje de carbono es de 0,35%. Tiene una resistencia mecánica de 55-62 kg/mm<sup>2</sup>. Se temple bien, alcanzando una resistencia de 80 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 215-245HB. Son empleados para fabricar ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes.
- **Aceros semi-duros:** El porcentaje de carbono es de 0,45%. Tiene una resistencia mecánica de 62-70 kg/mm<sup>2</sup>. Se temple bien, alcanzando una resistencia de 90 kg/mm<sup>2</sup>, aunque hay que tener en cuenta las deformaciones. Se usan en la fabricación de ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc.
- **Aceros duros:** El porcentaje de carbono es de 0,55%. Tiene una resistencia mecánica de 70-75kg/mm<sup>2</sup>, y una dureza de 200-220 HB. Temple bien en agua y en aceite, alcanzando una resistencia de 100 kg/mm<sup>2</sup>.

### 1.1.1. Acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es un acero al carbono-manganeso estructural de mediana resistencia y buena soldabilidad adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, estructuras atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes, fabricación de depósitos de granos, depósitos de combustible, estructuras para túneles, planchas, por lo general disponible en espesores de 0,0180 pulgadas hasta 0,500 pulgadas por colada continua (4,6mm a 12,7mm). Este acero en forma natural presenta tamaño de grano fino ya que se vacía por colada continua con un aluminio de 0,015% mínimo. Igualmente, este acero hasta 0,5 pulgadas de espesor se maneja con manganeso libre, sin embargo se trata de manejar una relación de 2,5 veces de manganeso/carbono mínimo.

Las tablas a continuación contienen los datos de fabricación establecidos por la ASTM para los aceros ASTM A36, en lo referente a composición química y requerimientos físicos.

**Tabla 1.2: Composición química (% en peso) del acero ASTM A36.**

Grado de acero	ASTM A36
C (Máx.)	0,25
Mn	0,80 - 1,20
P (Máx.)	0,04
S (Máx.)	0,05
Si (Máx.)	0,4
Cu	---
Cb	---
V	---
Ni	---
Cr	---
N <sub>2</sub>	---

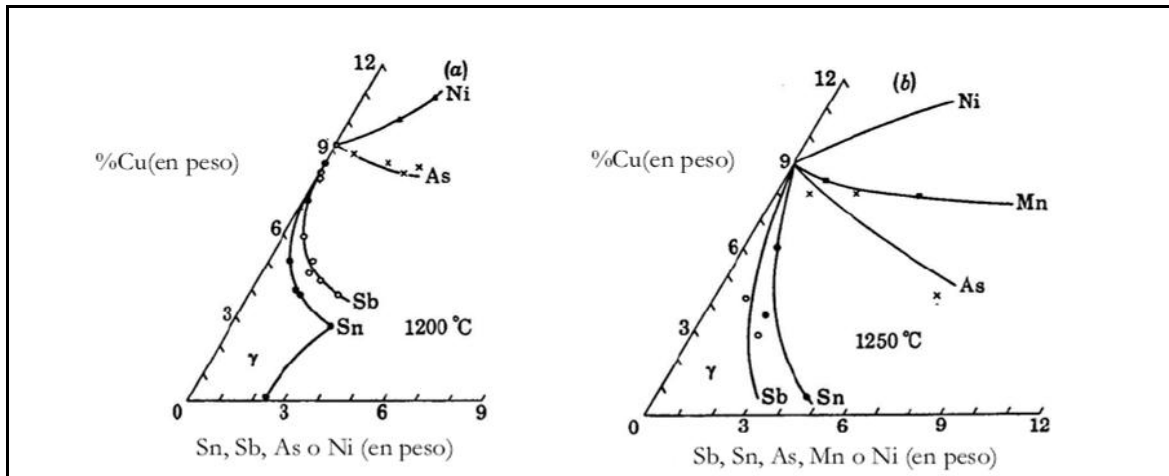
Tabla 1.3: Requerimiento físicos del acero ASTM A36.

Espesor		Límite de fluencia Mín.		Resistencia a la tensión		Elongación % Mín.	
Pulgadas	mm	KSI	MPa	KSI	MPa	EN 8 pulgadas	EN 2 pulgadas
0,180 – 0,500	4,6 – 12,7	36	250	58 - 80	400 - 550	20	21

### 1.2. Efectos del cobre en el acero

La presencia de Cu principalmente, entre otros elementos residuales, aumenta la incidencia de agrietamiento superficial, aunque a menudo estas grietas están asociadas al fenómeno de “*hot shortness*” (*en español: encogido en caliente*). Las grietas originadas por este fenómeno suelen aparecer durante las operaciones de laminación por las condiciones de recalentamiento y atmósfera oxidante que se dan. Pero también durante la colada continua, la existencia de elementos residuales está asociada con la presencia de defectos superficiales.

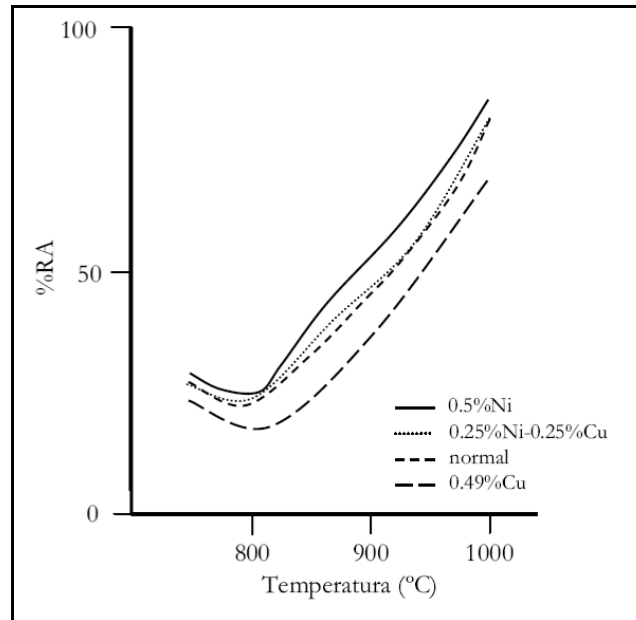
La combinación del Cu con Sn o Sb causa una mayor incidencia del agrietamiento transversal porque estos elementos reducen la solubilidad del Cu en la austenita y bajan el punto de fusión de la fase enriquecida en Cu, Sn y/o Sb. A menudo se añade Ni para contrarrestar los efectos nocivos del Cu en la calidad superficial y agrietamiento transversal porque este elemento aumenta la solubilidad del Cu en la austenita. En la Figura 1.1 se ve el efecto de los diferentes elementos residuales en la solubilidad del Cu en la austenita. Las isothermas ternarias propuestas por Melford y Salter varían entre ellas, pero en cualquier caso indican que el Sn y el Sb son los elementos que reducen en mayor grado la solubilidad del Cu en la austenita y el Ni la aumenta <sup>(1)</sup>.



**Figura 1.1: Isotermas ternarias ilustrando la influencia de diferentes elementos en la solubilidad del Cu en la austenita: (a) según Melford y (b) según Salter. <sup>[9]</sup>**

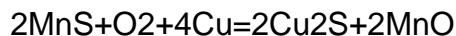
A pesar de los problemas de agrietamiento que se presentan durante la colada y posteriores procesos de conformado, la mayoría de los estudios llevados a cabo para determinar la influencia de los elementos residuales en la ductilidad sólo han detectado pequeñas disminuciones cuando estos elementos están presentes.

El efecto del Cu en la ductilidad en caliente ha sido estudiado por algunos autores. Cuando los ensayos se realizan tras un tratamiento de recalentamiento y en atmósfera inerte, la curva de ductilidad no sufre cambios por la presencia de Cu residual. En presencia de elementos micro aleantes y velocidades de enfriamiento lentas el Cu puede llegar a mejorar la ductilidad favoreciendo la formación de precipitados más grandes. Únicamente cuando las probetas solidificaron in-situ y el ensayo se realizó en atmósfera de aire, se pudo detectar un efecto negativo de Cu en la ductilidad en caliente como se puede observar en la Figura 1.2 para un acero C-Mn-Al.



**Figura 1.2: Efecto del cobre en la ductilidad de un acero 0.1C – 1.3Mn – 0.05Al – 0.04Nb para probetas coladas in situ y ensayos en aire. <sup>[1]</sup>**

En estas condiciones no hubo evidencia de que la fragilización pudiera ser debida a “*hot shortness*” sino a la precipitación de sulfuros u oxisulfuros de cobre mayoritariamente en los límites de grano que favorecerían una fractura intergranular por la formación de cavidades que facilitarían la unión de grietas. Estos sulfuros se formarían durante el enfriamiento como resultado de la oxidación en presencia de Cu según:



Ec. 1.1

El hecho de observar esta precipitación únicamente tras colar in-situ las probetas, puede ser debido a que estas condiciones son las que favorecen la segregación necesaria para que se produzca la anterior reacción (4).

### 1.3. Resistencia de los materiales

La resistencia de materiales clásica es una disciplina de la ingeniería mecánica y la ingeniería estructural que estudia los sólidos deformables mediante modelos simplificados. La resistencia de un elemento se define como su

capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse.

Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre las fuerzas aplicadas, también llamadas cargas, esfuerzos o tensiones, y los desplazamientos, también llamados elongaciones o deformaciones, inducidos por ellas. Típicamente las simplificaciones geométricas y las restricciones impuestas sobre el modo de aplicación de las cargas hacen que el campo de deformaciones y tensiones sean sencillos de calcular.

### 1.3.1. Ensayo de tracción

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, se efectúan ensayos para medir su comportamiento en distintas situaciones. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo compuesta de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura 1.3.

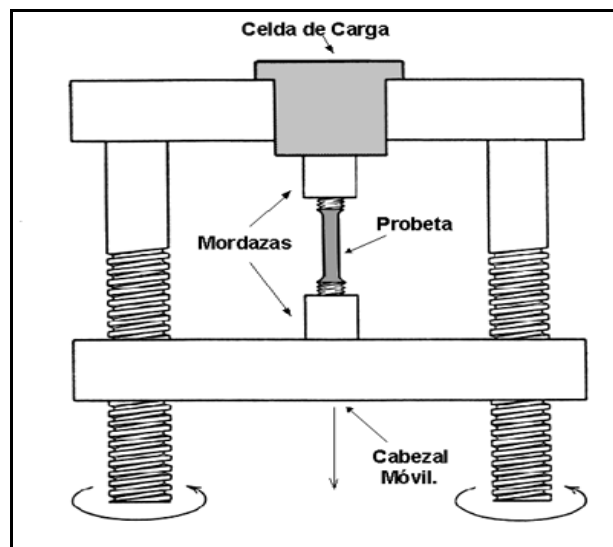


Figura 1.3: Esquema de una máquina de ensayo de tracción. <sup>[15]</sup>

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un sistema que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

La Figura 1.4 muestra el gráfico obtenido en una máquina de ensayo de tracción para un acero.

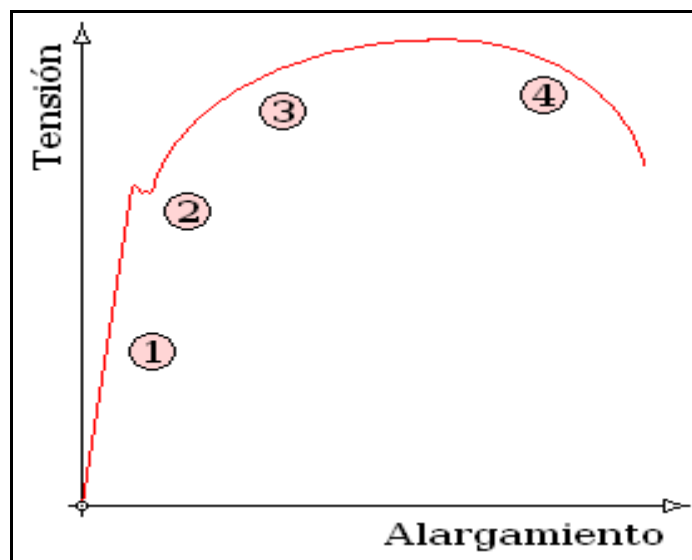


Figura 1.4: Curva esfuerzo-deformación (tensión-alargamiento) de un acero. <sup>[10]</sup>

En la figura 1.4 se pueden observar 4 zonas principales en la curva de esfuerzo-deformación:

1. **Deformaciones elásticas:** en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera

recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

Se tiene entonces que en la zona elástica se cumple:

$$F = K(L - L_0) \quad \text{Ec. 1.2 } (1)$$

Donde “ $F$ ” es la fuerza, “ $K$ ” es la constante del resorte, “ $L$ ” es la longitud bajo carga y “ $L_0$ ” es la longitud inicial.

2. **Fluencia o cedencia:** es la deformación abrupta de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.
3. **Deformaciones plásticas:** si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.
4. **Estricción:** llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la

probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

La figura 1.5 muestra la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

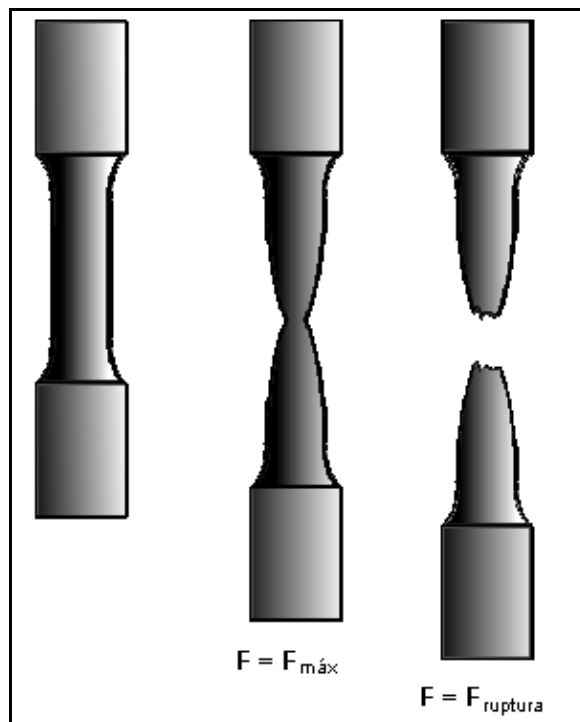


Figura 1.5: forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura. Fuente: [10]

Para expresar la resistencia en términos independientes del tamaño de la probeta, se dividen las cargas por la sección transversal inicial  $A_0$ , obteniéndose:

- **Resistencia a la fluencia:**

$$S_y = \frac{F_y}{A_0} \quad \text{Ec. 1.3}$$

- **Resistencia a la tracción (resistencia máxima o última a la tracción):**

$$S_{ult} = \frac{F_{máx}}{A_0} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

$S_y$  = Resistencia a la fluencia

$S_{ult}$  = Resistencia Máxima a la tracción

Pueden venir expresadas en unidades: Kg/mm<sup>2</sup>, Mpa o Kpsi

Considerando una probeta cilíndrica

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Considerando una probeta plana:

$$A_0 = a \times e \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde " $D_0$ " es el diámetro de la probeta ensayada si es cilíndrica y " $a$ " y " $e$ " son el ancho y el espesor respectivamente si la probeta es plana.

Entre otras características que pueden determinarse mediante el ensayo de tracción están la resistencia y la tenacidad de un material que son, respectivamente, las energías elástica y total absorbida y que vienen

representadas por el área comprendida bajo la curva de esfuerzo-deformación hasta el límite elástico en el primer caso y hasta la rotura en el segundo.

El módulo de elasticidad o módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tracciona una barra, aumenta de longitud, no disminuye. Este comportamiento fue observado y estudiado por el científico inglés Thomas Young.

Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales. El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede calcularse empíricamente en base al ensayo de tracción del material.

#### **1.4. Fatiga**

Se puede definir la fatiga como “el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen a una fractura total luego de un cierto número de ciclos” (ASTM 647-05).

Las piezas mecánicas cuando son sometidas a cargas variables repetidas durante un período prolongado de tiempo se rompen a tensiones considerablemente menores que el límite de rotura del material a carga estática, y según la estadística no menos de 80% de las fallas de elementos mecánicos sometidos a este tipo de cargas están vinculados a los fenómenos de fatiga.

Entre las fallas mecánicas, la de fatiga es la más frecuente en los materiales durante su funcionamiento, se habla que un 90% de las fallas son producidas por este fenómeno. Las fallas por fatiga son el resultado de aplicaciones sucesivas de esfuerzos producidos por sollicitaciones axiales, de

flexión, de corte, de torsión o combinadas, que pueden estar por debajo del esfuerzo al cual se produce la fluencia del material, ocurriendo un proceso interno en los materiales que sufren una serie de cambios, que podemos clasificar como:

- **Cambios mecánicos:** Se refieren a las deformaciones plásticas que pueden ocurrir en un material debido a las concentraciones de esfuerzos localizados.
- **Cambios superficiales:** Cuando el material agota su capacidad para deformarse plásticamente donde existe una concentración de esfuerzos muy localizada, se fractura y aparece una estructura, que se denomina “micro grieta”.
- **Crecimiento de grieta:** Una vez que se crea, la grieta puede continuar su avance bajo la acción de los esfuerzos cíclicos.
- **Fractura:** Ésta es la última fase, y puede presentarse súbitamente, por lo que hay que tener cuidado con las piezas sometidas a cargas cíclicas, ya que en general la deformación plástica macroscópica que produce el fenómeno es muy pequeña. Uno de los criterios de diseño contra fatiga con que se trabaja es el de “vida segura”, éste consiste en no permitir esfuerzos superiores al límite de fatiga del material. Otro criterio es el diseño a un número de ciclos determinado, “falla segura” para el cual se trabaja con el esfuerzo que indica la curva S-N durante una determinada cantidad de ciclos.

El comportamiento de los materiales metálicos en régimen estático es ampliamente conocido y la totalidad de las propiedades necesarias para el diseño están perfectamente caracterizadas (por ejemplo: esfuerzos de fluencia, resistencia a la ruptura, elongación, módulo de Elasticidad, etc.). Desde el punto de vista de diseño estático es suficiente con estos datos de partida para realizar proyectos, ya que no se conocen las características de los materiales. Sin embargo, cuando una pieza se somete a esfuerzos variables por efecto de que las fuerzas actuantes lo hagan, o por movimientos de la propia pieza, tanto los

procedimientos de diseño estático como las propiedades estáticas del material pierden su valor, debido a que las piezas fallan por haber sufrido un determinado número de ciclo de trabajo. En general, las fallas se producen por debajo de los esfuerzos que se pueden considerar aceptables en diseño estático y de forma repentina, sin sufrir ninguna deformación que advierta acerca del fallo del material.

Este fundamento por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo, se denomina fatiga; la cual ocurre porque hay deformaciones plásticas cíclicas que provocan cambios irreversibles en el material, que van desde cambios en la estructura de dislocaciones de los materiales, hasta el agrietamiento y fractura.

Fue el ingeniero alemán August Wöhler, quien desarrolló algunas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno. De los ensayos de Wöhler. Se pueden extraer dos conclusiones:

- Los esfuerzos necesarios para provocar la ruptura con cargas dinámicas son inferiores a las necesarias en el caso estático.
- Existe un valor por debajo del cual no se produce la rotura, conocido como el límite de fatiga.

En la Fig 1.6 a continuación se muestra un esquema del diagrama de Wöhler, en donde se grafica la amplitud del esfuerzo aplicado  $S$  contra El número de ciclos hasta la fractura  $N$ .

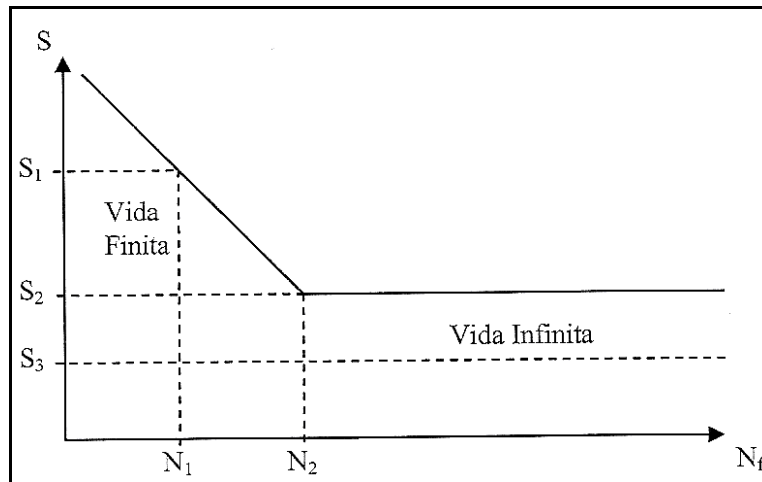


Figura 1.6: Esquema del diagrama de Wöhler. <sup>[10]</sup>

Para el nivel de esfuerzo  $S_1$  se intercepta la curva obteniéndose una vida finita, es decir, que una pieza cualquiera sometida al mencionado nivel de esfuerzo, fallará por fatiga cuando el número de ciclos de aplicación alcance el valor de  $N_1$ . Para  $S_2$  se produce la transición entre vida finita e infinita, lo cual se denomina “Límite de fatiga”. Finalmente, para el nivel de esfuerzo  $S_3$  no se intercepta la curva, por lo que se dice que el material tendrá vida infinita (no fallará).

Aunque no se ha encontrado una respuesta total al fenómeno de rotura por fatiga, que podríamos llamar “prematura”, cuando se somete a un metal a tensiones cíclicas o vibratorias, y son varias las teorías que tienden a ello, se puede aceptar que la fractura por fatiga se debe a deformaciones plásticas de la estructura, en forma análoga (iguales planos y direcciones cristalográficas), que en los casos vistos para deformaciones monodireccionales producidas por cargas estáticas, a diferencia que bajo tensiones repetidas en algunos cristales se generan deformaciones residuales. Estas bandas de deslizamiento, que aparecen aún bajo pequeñas cargas, aumentan con los ciclos, de manera que al llegar a la saturación de los granos afectados, la distorsión de la red provocará el inicio de la fisura.

Con más precisión podemos decir que las deformaciones de fatiga se inician preferentemente en granos próximos a la superficie del metal, separados

tan solo por algunos espacios atómicos, produciendo los efectos conocidos como extrusión e intrusión. En general, y por el efecto de la intrusión, la tracción acelera la propagación de la grieta y la compresión la retarda.

En los componentes de ingeniería elaborados con materiales comerciales, las zonas principales de nucleaciones heterogéneas por fatiga incluyen, escoria o gases atrapados, inclusiones, rasguños, abolladuras, defectos de fabricación, concentradores de esfuerzos macroscópicos y otros. Así como también regiones de no uniformidad microestructural. Mientras que los granos de la superficie son las zonas más propensas a la iniciación de grietas en metales y aleaciones de alta pureza, la formación de grietas por fatiga en aceros comerciales es posible tanto cerca de la superficie como en zonas interiores.

En los estudios de la falla por fatiga se han distinguido tres etapas importantes: nucleación, crecimiento o propagación de grieta y por último la ruptura. Las grietas comienzan en sitios localizados, cerca o sobre concentradores de esfuerzos como bandas de deslizamientos, inclusiones, porosidades o discontinuidades.

Los resultados de los estudios de fatiga han mostrado que la vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta. La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensión y de la amplitud de la misma.

Los esfuerzos fluctuantes capaces de producir fatiga se dividen en tres ciclos:

- **Ciclo de inversión completa:** este es el caso más común que ocurre en una máquina de eje rotatorio. La amplitud de tensión es igual a la tensión máxima; es decir que,  $S_{max} = S_{min} = S_a$  y la tensión media o promedio es igual a cero,  $S_m = 0$ .
- **Ciclo de inversión repetida:** este ciclo es similar al de inversión completa, pero la pieza lleva además una carga constante. La tensión alternada o

esfuerzo alterno se superpone a la tensión constante que resulta de la carga aplicada, por lo tanto la tensión media deja de ser igual a cero. Este ciclo se caracteriza porque el esfuerzo máximo no es igual al esfuerzo mínimo.

- **Ciclo de Tensión Irregular o Aleatoria:** en este caso los esfuerzos producidos para un ciclo de carga, no siguen un patrón ordenado. Generalmente son producidos por cargas periódicas imprevisibles, como por ejemplo en una aeronave, donde la variación de tensión durante el vuelo es aleatoria. Cuando la variación de tensión es irregular, el espectro real de carga es de poco uso en el diseño para la fatiga y debe reducirse a una forma más simple.

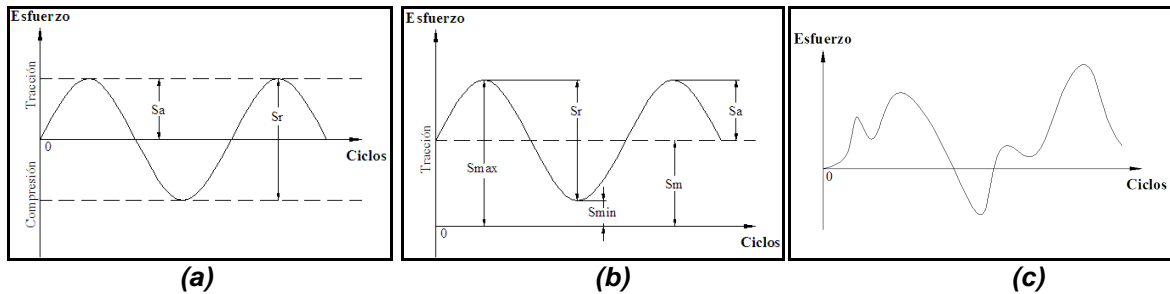


Figura 1.7: Esfuerzos cíclicos (a) de inversión completa, (b) de inversión repetida y (c) de tensión irregular o aleatoria. Fuente: [10]

Los parámetros que definen o identifican al ciclo son:

Tensión media	$S_m = \frac{S_1 + S_2}{2}$	Ec. 1.7
---------------	-----------------------------	---------

Amplitud de tensión o alternancia	$S_a = \frac{S_1 - S_2}{2}$	Ec. 1.8
-----------------------------------	-----------------------------	---------

Relación de amplitud o de tensiones	$R = \frac{S_2}{S_1}$	Ec. 1.9
-------------------------------------	-----------------------	---------

### 1.4.1. Ensayos de fatiga

En general los ensayos de fatiga se clasifican por el espectro de carga-tiempo, pudiendo presentarse como:

- **Ensayos de fatiga de amplitud constante:** evalúan el comportamiento a la fatiga mediante ciclos predeterminados de carga o deformación, generalmente senoidales o triangulares, de amplitud y frecuencia constantes. Son de ampliación en ensayos de bajo como de alto número de ciclos, ponderan la capacidad de supervivencia o vida a la fatiga por el número de ciclos hasta la rotura (inicio y propagación de la falla) y la resistencia a la fatiga por la amplitud de la tensión para un número de ciclos de rotura predeterminado. Es usual denominar como resistencia a la fatiga a la máxima tensión bajo la cual el material no rompe o aquella que corresponde a un número preestablecido de ciclos según los metales o aleaciones. La norma ASTM E647-05 define como límite de fatiga a la tensión que corresponde a un número muy elevado de ciclos.
- **Ensayo de fatiga de amplitud variable:** evalúa el efecto del daño acumulado debido a la variación de la amplitud del esfuerzo en el tiempo. Son ensayos de alto número de ciclos con control de carga, que según el espectro de carga elegido serán más o menos representativos de las condiciones de servicio.

Los espectros carga - tiempo de los ensayos de amplitud constante surgen de semejar el ciclo de carga a funciones continuas simples, normalmente senoidales. En general, cualquiera que resulte el ciclo del esfuerzo aplicado podrá considerárselo como resultante de uno constante o estático, igual al valor medio de la carga ( $S_m$ ), y de otro variable de amplitud constante ( $S_a$ ) senoidal puro.

Indiferentemente del ciclo adoptado, la frecuencia deberá permanecer constante y sin entrar a analizar la influencia de las propiedades mecánicas, podemos subdividir los ensayos en función de su valor en:

Baja frecuencia	$f < 5\text{Hz}$
Media frecuencia	$5 < f < 30\text{Hz}$
Alta frecuencia	$30 < f < 150\text{Hz}$
Muy alta frecuencia	$f > 150\text{Hz}$

Siendo los más utilizados los rangos de media y alta frecuencia, con el fin de disminuir los tiempos de ensayo.

En los ensayos de flexión plana todas las fibras situadas a la misma distancia de la fibra neutra están simultáneamente en el mismo estado de tracción o de compresión.

Para poder efectuar mediciones de la fatiga, es necesario contar con un método de ensayo que permita registrar la cantidad de ciclos y ajustar el tipo y amplitud de los esfuerzos. Uno de estos métodos es una simulación computarizada que permite diseñar una pieza de cualquier forma y tamaño, para luego someterla a fatiga. Estos programas cuentan con datos de ensayos ya realizados sobre gran cantidad de materiales, cuando se desea efectuar un ensayo cuyo material o composición no se encuentra en la base de datos de estos programas, se debe realizar el ensayo con una máquina de fatiga que permita usar piezas reales. Se puede normalizar este último ensayo, de manera que con una sola maquina, se pueden probar diversas piezas representadas por una probeta normalizada de pequeño tamaño, lo que permite evitar el uso de maquinas muy grandes y especializadas. Esta máquina puede producir tres tipos de esfuerzos independientemente del tipo de esfuerzo a ser aplicado (tracción, torsión y flexión):

- **Esfuerzos alternados:** se generan cuando las tensiones cambian de signo alternativamente. El caso más común y simple, es aquel en que la tensión máxima positiva (S1) es igual a la mínima (S2), obteniéndose un ciclo denominado alternado simétrico, figura 1.6 (a) donde  $R = -1$ .

Cuando las tensiones se presentan de distinto signo y valor, figura 1.6(b), el ciclo será alternado asimétrico, entonces  $0 < R < -1$ .

- **Esfuerzos intermitentes:** los esfuerzos tienen siempre el mismo sentido y su ciclo va desde cero a un valor determinado, que puede ser positivo o negativo, para ciclos positivos se tiene; figura 1.6 (c) donde  $R = 0$ .
- **Esfuerzos pulsatorios:** la tensión varía de un máximo a un mínimo, distinto de cero, dentro del mismo signo; figura (d) donde  $R > 0$ .

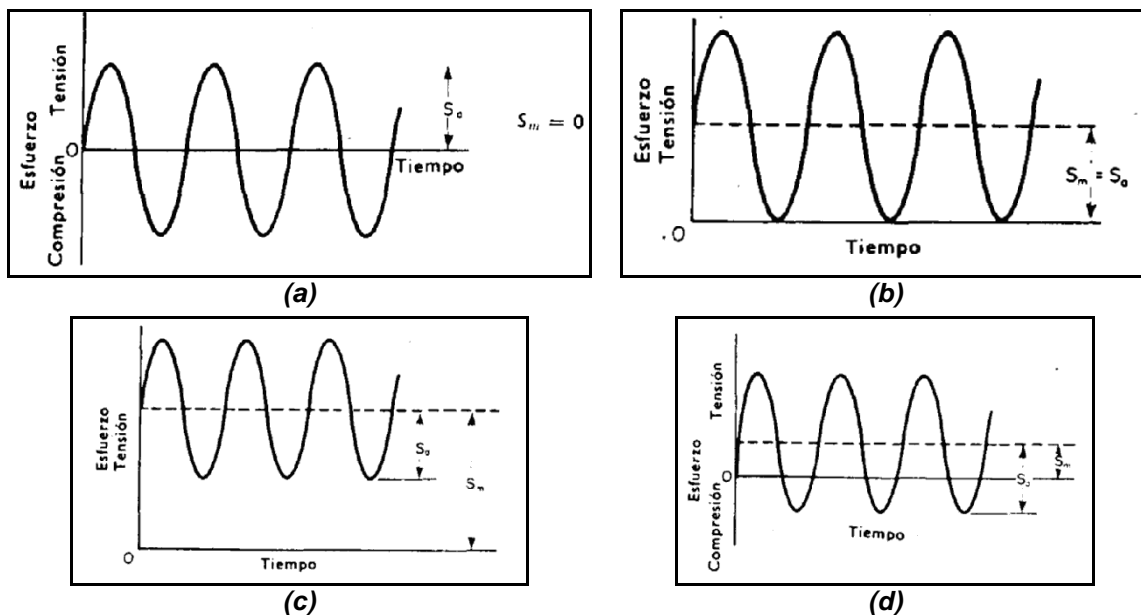


Figura 1.8: Tipos de esfuerzo observados en los ensayos de fatiga.

(a) esfuerzos alternados; (b) esfuerzos alternados asimétricos;  
(c) esfuerzos intermitentes; (d) esfuerzos pulsatorios.<sup>[1]</sup>

#### 1.4.2. Diagrama S-N

La resistencia a la fatiga de un material se puede representar por medio del diagrama S-N, desarrollado por Wöhler el cual expresa el número de ciclos que se requieren para producir el fallo con distintos niveles de esfuerzos cíclicos. La curva de fatiga se obtiene mediante ensayos, ya sea sobre probetas o sobre componentes completos. En el diagrama S-N el eje de las abscisas (X) está representado por el número de ciclos de esfuerzo y el eje de las ordenadas (Y)

representa los esfuerzos a los cuales están sometidas las muestras. De los resultados de numerosos ensayos a fatiga, la curva S-N presenta, una forma característica y particular para cada uno de los materiales estudiados.

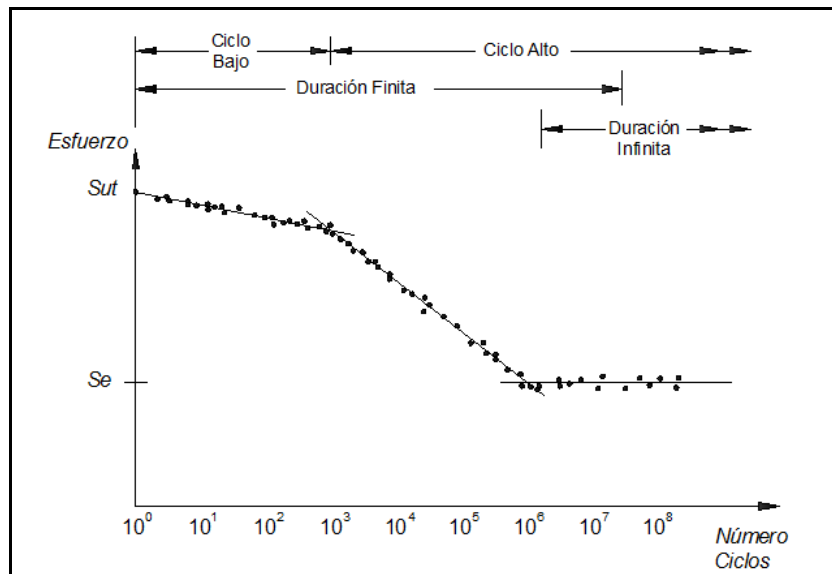


Figura 1.9: Diagrama de Wöhler. <sup>[10]</sup>

En el diagrama S-N existen dos zonas delimitadas para el número de ciclos. Entre  $10^0$  y  $10^3$  se encuentra la zona para ciclos bajos, donde los esfuerzos se encuentran entre el  $S_{ut}$  y el  $S_y$  del material. La zona de ciclos altos o alto ciclaje se encuentra para un número de ciclos mayores a  $10^3$ , donde los esfuerzos se localizan por debajo del  $S_y$  del material. También se puede identificar una región de duración finita y una región de duración infinita.

El diagrama de Wöhler relativo a aceros al carbono desciende rápidamente para un bajo número de ciclos y luego forma una curva que tiende a ser paralela al eje de las abscisas, después de 20 o 30 millones de ciclos, y se toma como límite de fatiga. En cambio para materiales no férricos, aleaciones ligeras, bronce o latones, la curva es asintótica al eje de las abscisas, por lo cual dichos materiales poseen un límite de fatiga muy bajo y para determinarlos habría que prolongar el ensayo hasta más allá de 100 millones de ciclos. En la figura 1.4 se observa un Diagrama de Wöhler con varias curvas referentes a diferentes materiales.

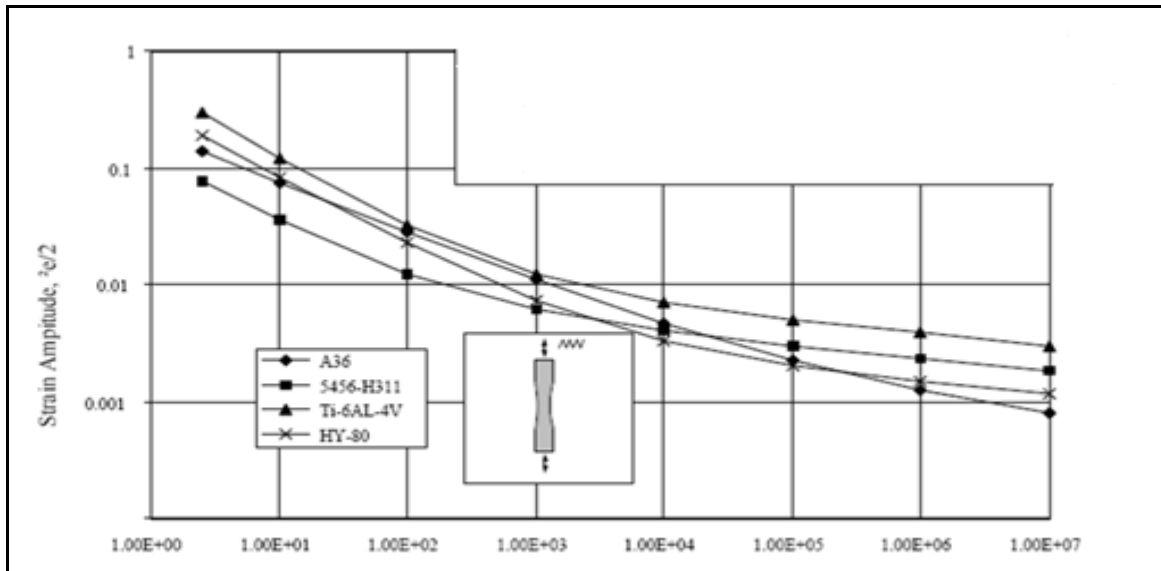


Figura 1.10: Diagrama de Wöhler para diferentes metales, entre los cuales se observa el acero ASTM A36. <sup>[20]</sup>

### 1.5. Galgas extensiométricas

Robert Hooke estableció en 1678 la relación que existe entre los estados de tensiones y deformaciones en los cuerpos sometidos a sollicitaciones mecánicas. Considerando que si el material es homogéneo y no se sobrepasa su límite elástico, entonces la relación entre los estados de tensiones y deformación es lineal. Basándose en este principio, la extensometría es una técnica que tiene por objeto la determinación de los valores de las deformaciones superficiales de los materiales.

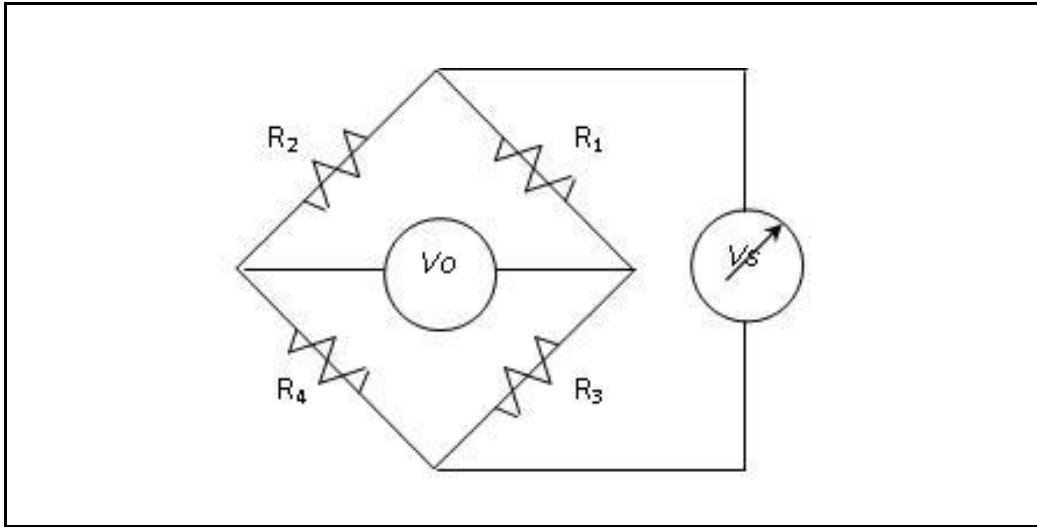
El concepto de deformación es análogo al de alargamiento unitario y se expresa mediante una relación adimensional:

$$\epsilon = \frac{\delta l}{l} \quad \text{Ec. 1.10}$$

Por lo general se emplea como unidad la micro deformación ( $\mu\epsilon$ ) que equivale a  $1 \times 10^{-6}$  y corresponde a una variación de una micra en una longitud de un metro.

### 1.5.1. Puente de Wheatstone en condición de equilibrio

La figura 1.11 contiene un esquema del montaje del circuito de medición de deformación y esfuerzos por galgas extensiométricas.



**Figura 1.11: Representación esquemática del puente de Wheatstone. “R1”, “R2”, “R3” y “R4” representan las resistencia que componen el puente de Wheatstone, “Vo” es un voltímetro y “Vs” es una fuente de poder.**

A partir de la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{V_s}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

Ec. 1.11

Donde “ $V_o$ ” es el voltaje de entrada, “ $V_s$ ” es el voltaje de salida debido a la deformación “ $\varepsilon$ ”, “ $\Delta R$ ” es la variación de resistencia y “ $R$ ” el valor nominal de resistencia de la galga extensiométrica.

Adicionalmente, con la utilización de las siguientes ecuaciones, se evaluó el esfuerzo aplicado a las probetas.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ec. 1.12

$$Ke = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad \text{Ec. 1.13}$$

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde “ $E$ ” es el modulo de Young, “ $\sigma$ ” el esfuerzo aplicado, “ $\varepsilon$ ” la deformación, “ $Ke$ ” el factor de galga, “ $L$ ” longitud y “ $\Delta L$ ” la variación de la longitud.

Por sustitución de las ecuaciones 1.11, 1.13 y 1.14 en la ecuación 1.12, se obtiene que el esfuerzo es igual a:

$$\sigma = \frac{4}{Ke} \frac{V_o}{V_s} E \quad \text{Ec. 1.15}$$

Por otro lado, partir de las siguientes ecuaciones se determinó la eficiencia y sensibilidad del circuito.

$$Ec = \frac{r}{(1+r)^2} \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$r = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{Ec. 1.17}$$

$$S_c = \left| \frac{V_s}{\varepsilon} \right| \quad \text{Ec. 1.18}$$

$$V_s = - \frac{r V_o \left( \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{(1+r)^2} \quad \text{Ec. 1.19}$$

$$Ke = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 1.20}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.19 y 1.20 en la ecuación 1.18 se obtiene:

$$S_c = \frac{r}{(r+1)^2} KV_o \quad \text{Ec. 1.21}$$

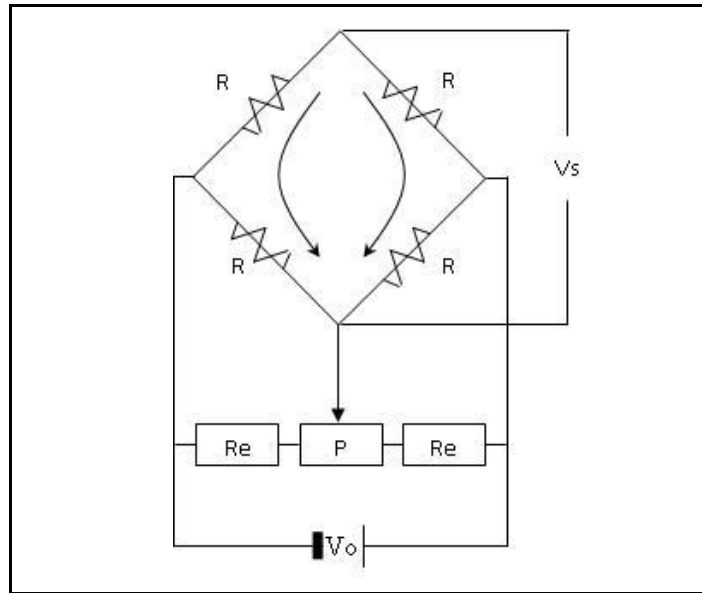
Donde “ $E_c$ ” es la eficiencia del circuito, “ $R_3$ ” es la resistencia tres, “ $R_4$ ” es la resistencia cuatro, “ $S_c$ ” la sensibilidad del circuito, “ $V_o$ ” el voltaje de alimentación y “ $\varepsilon$ ” la deformación.

Si  $R_3 = R_4 = 350\Omega$ ,  $V_o = 5,0\text{volt}$ ,  $Ke = 3,22$ , la sensibilidad es igual a 4,025 y la eficiencia del circuito “ $E_c$ ” es máxima para  $R_3/R_4 = 1$  e igual a 0,25.

### 1.5.2. Puente de Wheatstone en condición de no equilibrio

Muchos son los factores que impiden partir de la condición inicial de equilibrio. La dispersión en el valor nominal de las galgas, los pequeños esfuerzos que se producen durante la aplicación del pegamento entre otras, suponen otras tantas variaciones de resistencia que acarrearán el desequilibrio del puente.

Un procedimiento utilizado para restablecer el equilibrio del puente de Wheatstone, consiste en el montaje de un potenciómetro, el cual distribuye la resistencia entre las dos ramas del puente, como se muestra en la figura 1.12. La gama de compensación viene determinada por la relación  $R/R_e$ . Por lo general,  $R_e$  es cien (100) ó doscientas (200) veces mayor que  $R$ , con una gama de compensación entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $5 \times 10^{-2}$   $R/R_e$ . El potenciómetro  $P$ , preferiblemente debe ser multivoltas, de alta resolución y linealidad con resistencia mayor a quinientas (500) veces  $R$ .



**Figura 1.12: Representación esquemática del puente de Wheatstone equilibrado resistivo con potenciómetro.**

### 1.6. Electroerosión

La electroerosión es un proceso de fabricación, también conocido como mecanizado por descarga eléctrica (EDM). Este proceso consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambas partes deben ser conductoras de electricidad, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material.

Básicamente tiene dos variantes:

- El proceso que utiliza el electrodo de forma, conocido como Ram EDM, donde el término “*ram*” podría traducirse del inglés como "carnero" y es ilustrativo del "choque" del electrodo contra la pieza o viceversa (pieza contra el electrodo).
- La que utiliza el electrodo de hilo metálico o alambre fino, WEDM (de las siglas describen en inglés Wire Electrical Discharge Machining).

### **1.6.1. Proceso de electroerosión con electrodo de forma**

Durante el proceso de electroerosión la pieza y el electrodo se sitúan muy próximos, dejando un espacio que oscila entre 0,01 y 0,05 mm, por el que circula un líquido dieléctrico (normalmente aceite de alta conductividad). Al aplicar una diferencia de tensión continua y pulsante entre ambos, se crea un campo eléctrico intenso que provoca el paulatino aumento de la temperatura, hasta que el dieléctrico se vaporiza.

Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico salta la chispa, incrementándose la temperatura hasta los 20.000 C, vaporizándose una pequeña cantidad de material de la pieza y el electrodo formando una burbuja que hace de puente entre ambas.

Al anularse el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos se solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo.

Dependiendo de la máquina y ajustes en el proceso, es posible que el ciclo completo se repita miles de veces por segundo. También es posible cambiar la polaridad entre el electrodo y la pieza.

El resultado deseado del proceso es la erosión uniforme de la pieza, reproduciendo las formas del electrodo. En el proceso el electrodo se desgasta, por eso es necesario desplazarlo hacia la pieza para mantener el espacio constante. En caso que el desgaste sea severo, el electrodo es reemplazado. Si se quiere un acabado preciso (tolerancia de forma  $\pm 0,05$  mm es preciso la utilización de 2 electrodos).

La rugosidad superficial (vdi) que se obtiene en un proceso de electroerosión por penetración puede establecerse previamente, dentro de unos límites, al programar la máquina. Esta rugosidad puede variar entre 48vdi (acabado muy rugoso ) y 0vdi (acabado sin rugosidad pero imposible de

conseguir, un 26vdi es un acabado casi perfecto) Las tasas de arranque de material con electrodo de forma son del orden de  $2\text{cm}^3/\text{h}$ .

### **1.6.2. El electrodo de forma**

El electrodo es comúnmente hecho de grafito pues este, por tener una elevada temperatura de vaporización, es más resistente al desgaste. Puede ser trabajado en una fresadora específica con el fin de crear ya sea un electrodo macho o un electrodo hembra, lo que significa que el electrodo tendrá la forma opuesta a la forma deseada y resultante en la pieza de trabajo.

Es buena práctica tener un electrodo de erosión en bruto y uno que consuma en forma fina y final, mas esto puede ser determinado por las dimensiones y características de la pieza a ser lograda.

Los electrodos pueden ser manufacturados en forma que múltiples formas pertenezcan al mismo pedazo de grafito.

También el cobre es un material predilecto para la fabricación de electrodos precisos, por su característica conductividad, aunque por ser un metal suave su desgaste es más rápido. El electrodo de cobre es ideal para la elaboración de hoyos o agujeros redondos y profundos. Comúnmente estos electrodos se encuentran de diámetros con tamaños milimétricos en incrementos de medio milímetro y longitudes variadas.

Este proceso en particular es muy utilizado para antes del proceso de electroerosión con hilo, para producir el agujero inicial donde pase el hilo a través de un grosor de material que es inconveniente al taladro convencional. Si deseamos un buen acabado en el objeto a erosionar, sea cual sea el material en que se construya el electrodo este debe ser repasado a mano después ser mecanizado en la fresadora o torno debido a las marcas que las herramientas de corte utilizadas en estas maquinas producen pequeñas marcas en los electrodos.

### **1.6.3. Ventajas del proceso de electroerosión con electrodo de forma**

- Al no generar fuerzas de corte como en los procesos de mecanizado, el torneado y el taladrado, resulta aplicable para materiales frágiles.
- Se pueden producir agujeros muy inclinados en superficies curvas sin problemas de deslizamiento. Así como de elevada relación de aspecto (cociente entre la longitud y el diámetro), es decir, con pequeño diámetro y gran profundidad imposibles con un taladro convencional.
- Al ser un proceso esencialmente térmico, se puede trabajar cualquier material mientras sea conductor
- Las tolerancias que se pueden obtener son muy ajustadas, desde  $\pm 0,025$  hasta  $\pm 0,127$ mm.
- Es un proceso de fabricación único para lograr complejas configuraciones que son imposibles de otra forma.
- Ahorran en ocasiones la realización de un acabado rugoso en la pieza por medio de ataques de ácido, pasándose a denominar "acabado de electroerosión". No es un acabado quizás tan perfecto como el que se obtendría con el ataque de ácido pero por costes y plazos resulta satisfactorio en la mayoría de las ocasiones.

### **1.6.4. Inconvenientes en el proceso de electroerosión con electrodo de forma**

- El grafito es un material frágil, por lo que la manipulación de los electrodos debe ser muy cuidadosa.
- Los electrodos, generalmente, requieren ser manufacturados, por ejemplo, mecanizados en una fresadora para trabajar grafito.

- La rugosidad que deja en la superficie puede ser muy elevada en función del tipo de aplicación y la reducción de ésta utilizando intensidades menores requiere mucho tiempo y en ocasiones se pueden producir defectos indeseados como formación de carbonillas o manchas.
- El acabado superficial rugoso no es perfecto resultando más rugoso sobre las caras planas que sobre las paredes verticales por efecto de las chispas esporádicas que se producen al evacuar los restos de material.

### **1.7. Microscopio de barrido electrónico**

El microscopio de barrido electrónico (MBE por sus siglas) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores de la comunidad científica y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del MBE son la alta resolución (15000X), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

El microscopio de barrido electrónico puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.

El microscopio de barrido electrónico puede estar equipado con un EDAX permite realizar un análisis químico de la muestra y determinar la composición

química local de la misma, observándose en ellas picos que son identificados con los elementos presentes en la muestra.

Las aplicaciones del microscopio electrónico de barrido son muy variadas, y van desde la industria petroquímica o la metalurgia hasta la medicina forense. Sus análisis proporcionan datos como textura, tamaño y forma de la muestra. Entre las áreas de aplicación de esta técnica, se pueden mencionar:

**Geología:** Investigaciones geomineras, cristalográficas, mineralógicas y petrológicas. Estudio morfológico y estructural de las muestras.

**Estudio de materiales:** Caracterización microestructural de materiales. Identificación, análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en diversos materiales tales como metales, cerámicos, materiales compuestos, semiconductores, polímeros y minerales. Composición de superficies y tamaño de grano. Valoración del deterioro de materiales, determinación del grado de cristalinidad y presencia de defectos. Identificación del tipo de degradación: fatiga, corrosión, fragilización, etc.

**Metalurgia:** Control de calidad y estudio de fatiga de materiales, características texturales. Análisis de fractura (fractomecánica) en materiales, un ejemplo concreto de este tipo de aplicación se expone en la parte de trabajo práctico.

Entre las técnicas para determinar posibles segregaciones de materiales a través del MBE están: AES (Auger Electron Spectroscopy), espectroscopia de electrones, y STEM (scanning transmission electron microscope), microscopio de electrones por transmisión de escaneo.

#### **1.7.1. AES (Auger Electrón Spectroscopy), espectroscopía de electrones.**

La técnica permite la detección y cuantificación de los elementos existentes en las capas superficiales de materiales conductores. Se fundamenta en el hecho de que si se irradia un material de ese tipo con un haz de electrones, los átomos de su superficie se ionizan. En esta situación, una forma de que recuperen su

estado fundamental es que el hueco producido en el átomo por ionización sea ocupado por un electrón de un nivel superior, liberándose energía que al ser captada por otro electrón de los niveles superiores, provoca que este sea expulsado de su átomo

Este último electrón es el que se conoce como electrón Auger, cuya energía cinética es característica del átomo del que procede. Esta técnica permite medir directamente el nivel de segregación en muestras en las que los límites de grano han quedado fragilizados y causan fractura intergranular. La superficie de probetas fracturadas in-situ en una cámara de ultra-alto vacío (UHV) se analiza para determinar las especies que fragilizaron los límites de grano. Para seleccionar la región a analizar se rastrea la superficie con un haz de electrones en modo SEM. Se pueden obtener mappings de cada elemento en la superficie con una resolución espacial de  $1\mu\text{m}$ - $0,1\mu\text{m}$ , pudiendo identificar áreas y realizar análisis cuantitativos de los niveles de segregación. La variación de la concentración de un elemento en la profundidad se puede evaluar por deposición iónica de baja energía que permite eliminar capas atómicas y monitorear las señales Auger en cada capa. El método permite cuantificarla fracción molar de un determinado elemento, en monocapas y calcular un grado de enriquecimiento, que lo relaciona con la composición en dicho elemento de la matriz, esto en sistemas binarios se puede correlacionar con la solubilidad. Este coeficiente de partición puede llegar a ser un orden de magnitud superior en aceros aleados que en hierro puro. La competencia de los sitios en los límites de grano durante la cosegregación no ha sido muy estudiada.

### **1.7.2. STEM (Scanning Transmission Electron Microscope), microscopio de electrones por transmisión de escaneo.**

Este sistema permite determinar posibles segregaciones cuando no se ha conseguido una fractura intergranular, que sería un requisito imprescindible para poder utilizar tanto AES como XPS. Esta técnica se utiliza especialmente cuando hay escalonado del límite de grano (conocido en inglés como “*facetting*”) que ocurre porque tanto la segregación como la energía del límite de grano son sensibles a los posibles sitios en el límite de grano que a su vez dependen de la

orientación relativa de los cristales y los límites, que pueden ser determinados en STEM. Así pues, la técnica contribuye a la comprensión del fenómeno de “*facetting*” y permite conocer la estructura de los sitios preferentes para la segregación.

## **CAPÍTULO II**

### **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL *Materiales***

- Secciones de lámina de acero ASTM A36.
- Cables (electrodos) de cobre de 2mm de diámetro.
- Corrector líquido blanco.

#### **2.2. Equipos**

##### **2.2.1. Equipos empleados para la elaboración de las probetas**

- Fresadora #2 Marca Olivetti modelo 936 año 72 gira a 160 RPM.
- Taladro radial marca UCIMU modelo R12002 30-40 año 72 gira a 215 RPM.
- Esmeril de banco 2 piedras para el afilado de herramientas Marca Stanley modelo 257A año 86 gira a 2450 RPM.
- Cepillo para desbastar probetas B. Elliot & Co. Trabaja a 80RPM. Año 75.
- Horno estándar para tratamiento térmico del acero.
- Maquina de soldar marca Hobart, modelo TDU292. Genera de 35A a 300A a 36V corriente DC.

##### **2.2.2. Máquinas para ensayos**

- Maquina universal de ensayos de tracción. Marca Losenhausen. Año 1969. Fuerza máxima 20MPondios. Voltaje: 220V corriente AC.
- Maquina de ensayos de fatiga marca Schenck (ver anexo II para información detallada sobre las partes de la máquina).

- Microscopio de barrido electrónico de la escuela de metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

### **2.2.3. Equipos para medición de esfuerzos en ensayos de fatiga**

- Galga extensiométrica.
- Pegamento con cianoacrilato
- Mordaza.
- Multímetro.
- Balanza.
- Sargento (para sujetar los pesos a las probetas de ensayo).
- Pesas de 1, 5 y 10Kg.
- Aparataje para aplicar masas de 1, 5 y 10 kg a las probetas de ensayo.
- Fuente de poder HP E3611. Rangos de voltaje: 0V a 20V corriente DC (0A a 1,5A) y 0V a 35V corriente DC (0A a 0,85A).
- Circuito “*punte de Wheatstone*” elaborado por el tutor académicos Prof. J. Perdigon.

### **2.2.4. Otros equipos de soporte**

- Vernier.
- Piedra de amolar.
- 2 generadores de voltaje DC.

## 2.3. Procedimientos experimentales

### 2.3.1. Elaboración y preparación de las probetas de ensayo

En la realización de los ensayos mecánicos de tracción y fatiga explicados más adelante se emplearon probetas planas de acero ASTM A36 elaboradas según las normas ASTM A370-Normas para Métodos de Ensayo y Definiciones para Ensayos Mecánicos de Productos de acero (*en inglés: “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”*).

Estas probetas de acero ASTM A36 fueron maquinadas para ensayos longitudinales (el eje más largo de las probetas es paralelo a la dirección de mayor extensión del acero durante los procesos de extrusión y forjado) a partir de una lámina del mismo material cuyo certificado de origen y especificaciones se detallan en la tabla 2.1 a continuación (copia del certificado de origen de la pieza de acero ASTM A36 puede ser observada en el anexo I).

**Tabla 2.1: Especificaciones físicas y mecánicas según certificado de calidad del acero ASTM A36 empleado para los ensayos de tracción y fatiga realizados.**

Especificaciones de la bobina de acero ASTM A36			Esfuerzo de fluencia [MPa]		Esfuerzo ultimo de tracción [MPa]	
Ancho [mm]	Espesor [mm]	Densidad lineal [Kg/m]	Min	Max	KSI	MPa
1200	5	47,100	250	--	400	550

**Tabla 2.2: Composición química según certificado de calidad del acero ASTM A36 empleado para los ensayos de tracción y fatiga realizados.**

% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cu	% Al	% Mo	% Ni	% Cr
0,26	0,999	0,040	0,050	0,040	0,020	0,0099	0,0150	0,0150	0,0150

Tanto las probetas de tracción como las de fatiga fueron mecanizadas a su forma rectangular en un torno, luego fue mecanizada la sección reducida (cuello de la probeta) de cada una empleando una fresadora y los agujeros en la sección de agarre de las probetas de fatiga fueron realizadas mediante un taladro.

Una vez finalizado estos procesos, las probetas fueron cepilladas y pulidas para afinar y mejorar su acabado final.

Posteriormente las probetas fueron sometidas a un proceso de recocido por 30 minutos a una temperatura  $800^{\circ}\text{C}$  para aliviar las posibles tensiones residuales superficiales resultantes de los procesos de mecanizado. El proceso de recocido se realiza a esta temperatura por tratarse de un acero de alta aleación, pero manteniendo siempre una temperatura de recocido inferior a la temperatura transformación austenita-perlita del material.

Las figuras 2.1 y 2.2 esquematizan la forma de las probetas empleadas para los ensayos de tracción y fatiga respectivamente.

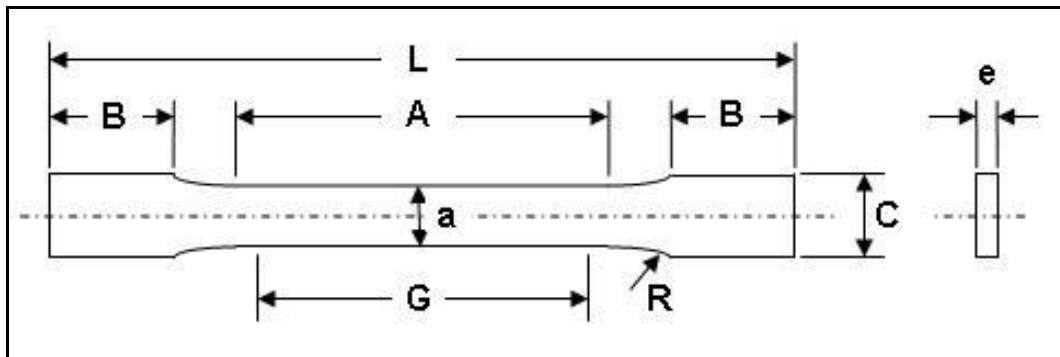


Figura 2.1: Esquema de las probetas planas empleadas para los ensayos de tracción. Especificaciones de la probeta en la tabla 2.2.

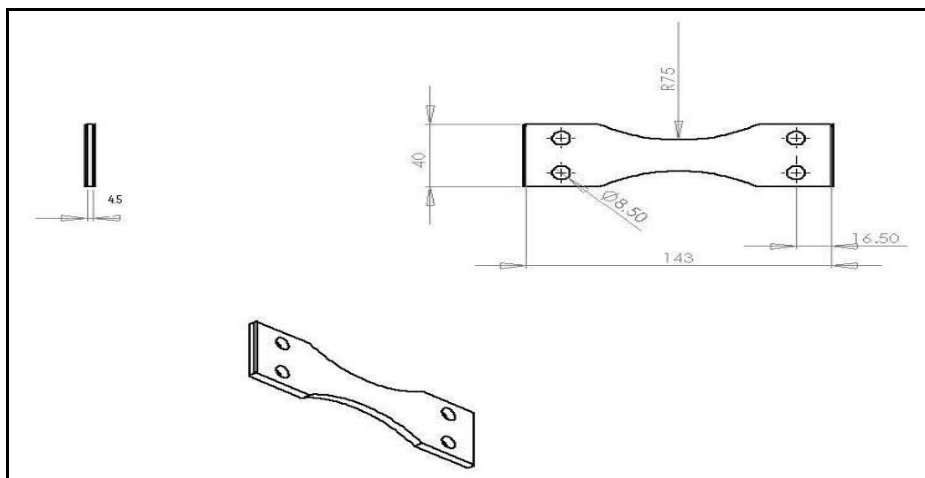


Figura 2.2: Esquema y medidas de las probetas empleadas para los ensayos de fatiga.

Las probetas empleadas para los ensayos de fatiga sin incrustaciones de cobre fueron medidas y marcadas en el centro de una de las caras, para realizar una muesca en dicha marca que sirviese como concentrador de esfuerzos (ver figura 2.2), empleando un proceso de electroerosión, lo que permite evitar que se generen concentraciones de esfuerzos en la superficie de la probeta para garantizar que no sean alterados las propiedades mecánicas y los resultados de los ensayos.

### **2.3.2. Incrustación (contaminación) de cobre en probetas de acero ASTM A36**

No existe un procedimiento escrito o normalizado para realizar incrustaciones (contaminación) de un metal en otro o, específicamente de cobre en acero, que permita simular la contaminación que ocurre por cortocircuito, durante un proceso de soldadura de campo. Por lo tanto, es importante definir y explicar el proceso utilizado para realizar dichas incrustaciones (contaminación) de cobre en las probetas de acero empleadas para los ensayos de tracción y fatiga y para su posterior análisis en el microscopio de barrido electrónico.

Se diseñó un procedimiento experimental sencillo con la finalidad de recrear las incrustaciones (contaminación) de cobre en estructuras de acero observadas en los trabajos de soldadura de campo.

La intención de este procedimiento es simular un cortocircuito entre un cable de cobre desnudo y el acero. Para ello se emplea una máquina de soldar que trabaja a 36 V corriente DC y 120 A, que son los parámetros de soldadura típicamente empleados en el trabajo de campo.

Una vez completado el proceso de elaboración de las probetas para ensayos de fatiga y tracción, se procede a realizar las incrustaciones (contaminación) de cobre en el centro de una de las caras de la probeta de acero. Primero se mide y marca el centro de una de la cara de la probeta. Después se sujeta la probeta a la mesa de trabajo por un extremo empleando una mordaza y por el otro extremo empleando un sargento.

Luego, con la cara marcada hacia arriba, se conecta la probeta al extremo positivo del equipo de soldadura. El extremo negativo del equipo de soldadura se conecta a una pinza utilizada para sujetar el cable desnudo de cobre (que en el trabajo de campo sostiene un electrodo). Previamente, la punta de este cable de cobre de 2mm es rebajada y afilada empleando una piedra de amolar, lo que permite controlar y disminuir el tamaño de la incrustación de cobre en el acero, haciéndola más homogénea.

Finalmente, se acerca la punta afilada del cable de cobre al centro de la probeta de acero, se da un toque y se retira inmediatamente, simulando el cortocircuito sucedido en los trabajos de campo. Las incrustaciones de cobre realizadas a las probetas de acero tenían forma semi-esférica, con un promedio de 1mm de profundidad (penetración en el acero) y 2mm de diámetro. La figura 2.3 a continuación muestra el proceso realizado para incrustar (contaminar) las probetas de acero ASTM A36 empleando un cable de cobre desnudo de 2mm de diámetro.



**Figura 2.3: Contaminación de probetas de acero ASTM A36 con incrustaciones de cobre realizadas por un proceso de soldadura un cable de cobre desnudo de 2mm de diámetro.**

### 2.3.3. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados según las normas ASTM A370 Y E8-03 “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*” (Métodos de Ensayo Estándar para Ensayos de Tensión de Materiales Metálicos) en una máquina universal para ensayos de tracción empleando una escala de 10megaPondios, con velocidad constante de separación entre los cabezales que sostienen las puntas de la probeta.

Se sometieron 4 probetas de acero ASTM A36 a ensayos de tracción a temperatura ambiente, 2 probetas (probetas 1E y 2E, donde “E” se refiere a probetas sin ningún tipo de interrupción o defecto material macroscópico, es decir, elaborada según la norma ASTM A370) y 2 probetas con incrustaciones de cobre (probetas 1C y 2C).

Las probetas fueron marcadas con corrector líquido blanco en los extremos del cuello de la probeta (sección de tensión) para medirlas antes y después de finalizado el ensayo y determinar la elongación total de las mismas según la ecuación a continuación:

$$\Delta L = L_f - L_o \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde “ $\Delta L$ ” es la variación de la longitud, “ $L_f$ ” es la longitud final y “ $L_o$ ” la longitud inicial, expresadas todas en milímetros (mm).

Igualmente, se tomaron en cada ocasión 3 medidas del ancho y espesor del cuello de la probeta (donde se genera la deformación durante el ensayo) antes de iniciar el ensayo. Estas medidas son utilizadas para calcular el área transversal de la probeta, según la ecuación 2.2 a continuación:

$$A = a \times e \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde “A” es el área de la sección transversal medida, “a” es el ancho del cuello de la probeta y “e” es el espesor de la probeta; según lo observado en la figura 2.1 anterior.

Para poder calcular el esfuerzo último de tracción es necesario medir el área de la sección transversal de la probeta en el cuello de fractura. Para determinar los esfuerzos de cedencia y esfuerzo máximo o último de tracción se pueden emplear las ecuaciones 1.5 y 1.6 mencionadas anteriormente. Las cuales son empleadas a su vez para calcular el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo de tracción empleando el área final de la probeta en la sección de fractura, según las ecuaciones presentadas a continuación

#### **2.3.4. Medición del esfuerzo de fatiga con galga extensiométrica**

La máquina empleada para los ensayos de fatiga (marca Schenck) no especifica la medida de las fuerzas aplicadas a las probetas ensayadas. Por ende, es necesario utilizar un instrumento adicional para la medición de los esfuerzos aplicados a las probetas durante los ensayos de fatiga. Para la determinación de estos esfuerzos se utilizó una galga extensiométrica, que a través de un *punte de Wheatstone*, conectado a una fuente de poder, arroja un valor de voltaje para cada nivel de esfuerzo aplicado a la probeta. Además, es necesario conocer cuál es el nivel de esfuerzo al que se pueden someter las probetas sin sobrepasar el límite de fluencia, para no pasar de una deformación elástica a una plástica.

Antes de realizar los ensayos de fatiga fue necesario calibrar las galgas extensiométricas, aplicando diferentes pesos que funcionan como fuerzas de corte (doblado) conocidas para medir la variación de voltaje con cada peso que experimenta la probeta de ensayos de tracción.

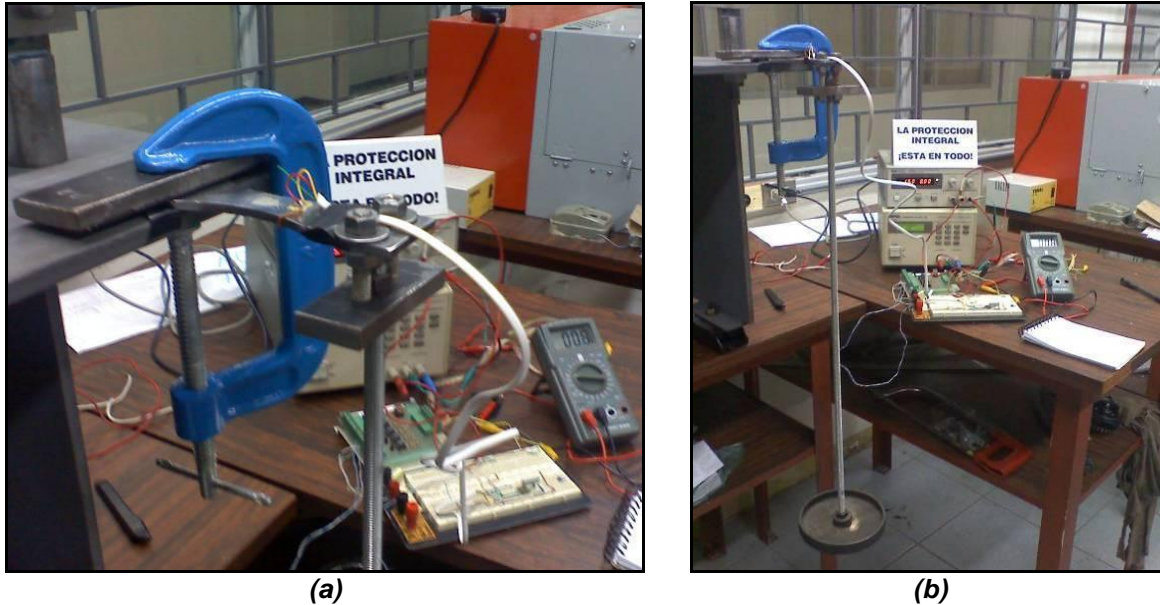
Primero, se añaden dos galgas extensiométricas, una en el centro de cada cara de la probeta para ensayos de fatiga, utilizando un pegamento con cianoacrilato, tal como se muestra en la figura 2.4, de manera que podamos medir la deformación en tracción y en compresión. Es decir, al someter la probeta a esfuerzos de flexión una de las caras experimenta esfuerzos de tracción mientras la otra experimenta esfuerzos de compresión. Esto nos ayuda a igualar los esfuerzos de tracción y compresión de manera a calibrar la máquina de ensayos de fatiga para obtener la fibra neutra en el centro de la probeta



**Figura 2.4:** Detalle de la colocación de una galga extensiométrica sobre la superficie (una de las caras) de la probeta empleada para ensayos de fatiga.

Después, se sujeta un extremo de la probeta de ensayo a un banco de trabajo usando una mordaza. El otro extremo de la probeta se sujeta con un sargento que a su vez es utilizado para sujetar los diferentes pesos a los cuales se va a someter la probeta durante el proceso de calibrado de las galgas extensiométricas. El aparataje empleado para sujetar los pesos tenía un peso de 1,5Kg. Se añadieron pesos de 1Kg, 5Kg o 10Kg por vez, de manera progresiva, y se anotaron las mediciones del voltaje tanto en la galga que se encuentra a tracción en la cara superior de la probeta como de la galga que se encuentra a compresión en la parte inferior.

La figura 2.5 muestra la manera como quedó sujeta la probeta de ensayo empleada para la calibración de las galgas extensiométricas, el aparataje empleado para añadir los diferentes pesos conocidos a la probeta y las conexiones del circuito electrónico (puente de Wheatstone) empleado para medir las variaciones de voltaje en las galgas.



**Figura 2.5: Detalle del montaje de la probeta de ensayos de fatiga empleada para la calibración de las galgas extensiométricas.**

Empleando las medidas de la probeta de fatiga y los pesos aplicados que generan esfuerzos de flexión se calculó el esfuerzo generado con cada peso empleando la siguiente ecuación:

$$S = \frac{M \times c}{I} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde “ $M$ ” es el momento aplicado, “ $c$ ” es la distancia de la fibra neutra a la superficie de la probeta donde está aplicado el esfuerzo e “ $I$ ” es la inercia de la sección estudiada.

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 a continuación permiten calcular el momento “ $M$ ” de la fuerza aplicada y la inercia “ $I$ ” de la sección rectangular (transversal) de las probetas ensayadas:

$$M = P \times L_F \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$I = \frac{a \times e^3}{12} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde “ $P$ ” es el peso aplicado, “ $L_M$ ” es la longitud de la probeta de fatiga, “ $a$ ” es el ancho del cuello de la probeta de ensayo y “ $e$ ” es el espesor de dicha probeta.

De sustituir las ecuaciones 2.4 y 2.5 en la ecuación 2.3 se obtiene la ecuación 2.6 presentada a continuación y que fue utilizada para calcular el esfuerzo de flexión sobre la probeta ensayada, cuando es empleada en el montaje mostrado en la figura 2.5 para calibrar las galgas extensiométricas:

$$S = \frac{6 \times P \times L_F}{a \times e^2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

A medida que se añadía un peso en el montaje observado en la figura 2.5 anterior, se tomaban 3 medidas del voltaje y se calculaba el promedio y la respectiva desviación estándar. Para cada peso añadido se tenía entonces una variación de voltaje promedio equivalente. Se tomaron las medidas de voltaje para 6 pesos diferentes, se tabularon los resultados y se construyó una gráfica de voltaje contra peso (mV contra Kg) que permitió determinar a través de una línea de tendencia recta la ecuación necesaria para convertir las medidas de voltaje en peso. La ecuación a continuación define la línea de tendencia recta entre el voltaje y el peso:

$$y = mx + b \quad \text{Ec. 2.7}$$

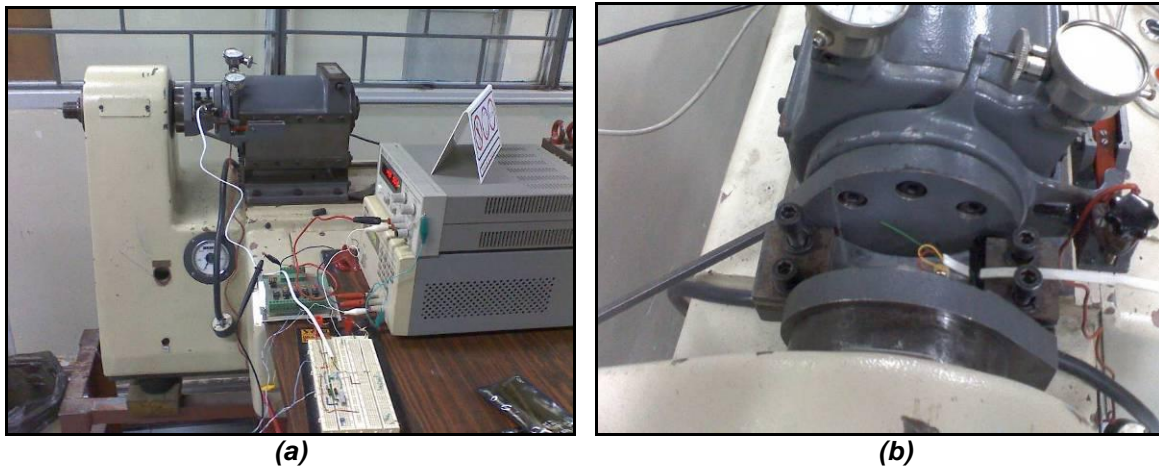
Donde “ $y$ ” es el voltaje (en mV) correspondiente a “ $x$ ” cantidad de peso (en Kg), “ $m$ ” es la pendiente de la recta que relaciona ambas variables y “ $b$ ” es igual a cero “0” (intersección de la recta con el eje  $y$ ), ya que para 0Kg de pesos la variación del voltaje también es igual 0mV.

En el anexo III se puede observar el detalle de las pruebas de calibración de las galgas extensiométricas y la gráfica empleada para la relación entre el voltaje y el peso los experimentos realizados. Allí se puede ver que el valor de “ $m$ ” igual a 0,26, con  $r^2=0,994$  donde  $r^2$  es el coeficiente de correlación que mide la relativa fortaleza de la relación lineal ( $r^2=1$  significa una perfecta relación lineal directamente proporcional). La ecuación según los resultados de calibración para los siguientes experimentos de fatiga se define a continuación:

$$y = 0,26x$$

Ec. 2.8

Una vez calibradas las galgas extensiométricas, se procedió a realizar la calibración de la máquina Schenck para ensayos de fatiga. La figura 2.4 a continuación muestra el montaje de las probetas en la máquina Schenck y el puente de Wheatstone que será empleado para los ensayos de fatiga.



**Figura 2.6: Detalle del montaje del ensayo de fatiga (a) máquina Schenck y puente de Wheatstone y (b) detalle de la máquina de Schenck donde se coloca la probeta conectada al puente de Wheatstone.**

La máquina Schenck empleada para los ensayos de fatiga cuenta con un tornillo que permite variar la excentricidad con que se mueve el eje o cigüeñal responsable por generar los esfuerzos de flexión a los cuales son sometidos las probetas ensayadas.

El punto inicial (cero vueltas) es el tope girando la manivela en sentido de las agujas del reloj. Esto nos da la seguridad que en ese punto el esfuerzo aplicado a la probeta es cero “0”.

Partiendo de la ecuación 2.4, se procedió a calibrar la máquina Schenck para ensayos de fatiga empleando la misma probeta estándar empleada para calibrar las galgas extensiométricas en el puente de Wheatstone. Se midió la fuerza ejercida por esta máquina sobre las probetas ensayadas usando las diferencias de voltaje señaladas por dichas galgas. Iniciando con media vuelta (0,5

vueltas) y haciendo incrementos de media vuelta cada vez, se varió la fuerza de flexión ejercida por la máquina Schenck para ensayos de fatiga sobre la probeta y empleando la ecuación 2.4 se procedió a medir dichos esfuerzos. Esto nos ayuda a igualar los esfuerzos de tracción y compresión de manera a calibrar la máquina de ensayos de fatiga para obtener la fibra neutra en el centro de la probeta

En el anexo IV se puede observar el detalle de las pruebas de calibración de la máquina Schenck para ensayos de fatiga. Según los resultados obtenidos en estas pruebas (ver anexo IV) se puede observar que el esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 se supera con cinco vueltas al tornillo de ajuste de la excentricidad de la máquina de Schenck. En base a estos resultados se determinó que los ensayos de fatiga serían realizados con 2,5; 3; 3,5 y 4 vueltas.

En el mismo anexo IV se puede observar los esfuerzos correspondientes a cada media vuelta (0,5 vueltas) del tornillo de la máquina Schenck, hasta un total de 6 vueltas.

Para determinar si el número de vueltas de dicho tornillo es directamente proporcional al esfuerzo ejercido por la máquina sobre la probeta ensayada (variación del voltaje medido por las galgas extensiométricas) se construyó una gráfica con los resultados del porcentaje de esfuerzo respecto del valor de fluencia (250MPa según certificado de Calidad en el anexo II) contra el número de vueltas del tornillo de la máquina de Schenck. A la curva obtenida se aplicó una línea recta de tendencia y se determinó el valor de la pendiente “ $m$ ” y del coeficiente de correlación “ $r^2$ ” que mide la relativa fortaleza de la relación lineal. La ecuación de la recta obtenida para dicha línea de tendencia es:

$$y_s = 0,186x_s \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde “ $y_s$ ” es el porcentaje del esfuerzo aplicado por la máquina Schenck respecto del esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 (250 MPa), “ $y_s$ ” es el número de vueltas aplicado a la máquina Schenck y “ $m$ ” es la relación directamente proporcional entre ambos.

Se puede observar que la ecuación 2.9 representa una ecuación de la recta que corta los ejes “x” y “y” en cero “0” porque el punto inicial (cero vueltas) donde el tope girando la manivela en sentido de las agujas del reloj, el esfuerzo de flexión aplicado a la probeta ensayada también es cero “0”.

### **2.3.5. Ensayos de fatiga**

Los ensayos de fatiga fueron realizados según las normas antes mencionadas, en una máquina Schenck para ensayos de fatiga a 1500 RPM (25 Hz) con una tensión máxima constante de compresión y de tracción que fue variada entre un ensayo y otro.

Los ensayos de fatiga realizados fueron de amplitud constante, con ciclos de inversión completa y esfuerzos alternantes de flexión aplicados por la máquina Schenck sobre las probetas ensayadas.

Se realizaron varios ensayos de fatiga a temperatura ambiente, con probetas estándar y con probetas con incrustaciones de cobre. Los ensayos de fatiga son de naturaleza estadística, lo que hace necesario experimentar con el mayor número de probetas posibles, a un mismo nivel de esfuerzo. Para cada ensayo, la probeta era sujeta por ambos extremos en la máquina Schenck y se establecía la cantidad de vueltas que se daban al tornillo de dicha máquina, lo que determinaba el esfuerzo máximo promedio de compresión y tracción.

En cada ensayo realizado se tomaba nota del número de ciclos iniciales y finales para calcular el número de ciclos que tomaba a cada probeta en fracturarse completamente. Según se explicó anteriormente, se hicieron ensayos con 2,5; 3; 3,5 y 4 vueltas al tornillo de la máquina de Schenck.

### **2.3.6. Análisis superficial con MBE (*Microscopio de Barrido Electrónico*)**

Para realizar el análisis superficial con MBE se entregó al Centro de Microscopia Electrónica de la Facultad de Ingeniería Escuela de Metalurgia de la Universidad Central de Venezuela una probeta fracturada con incrustación de

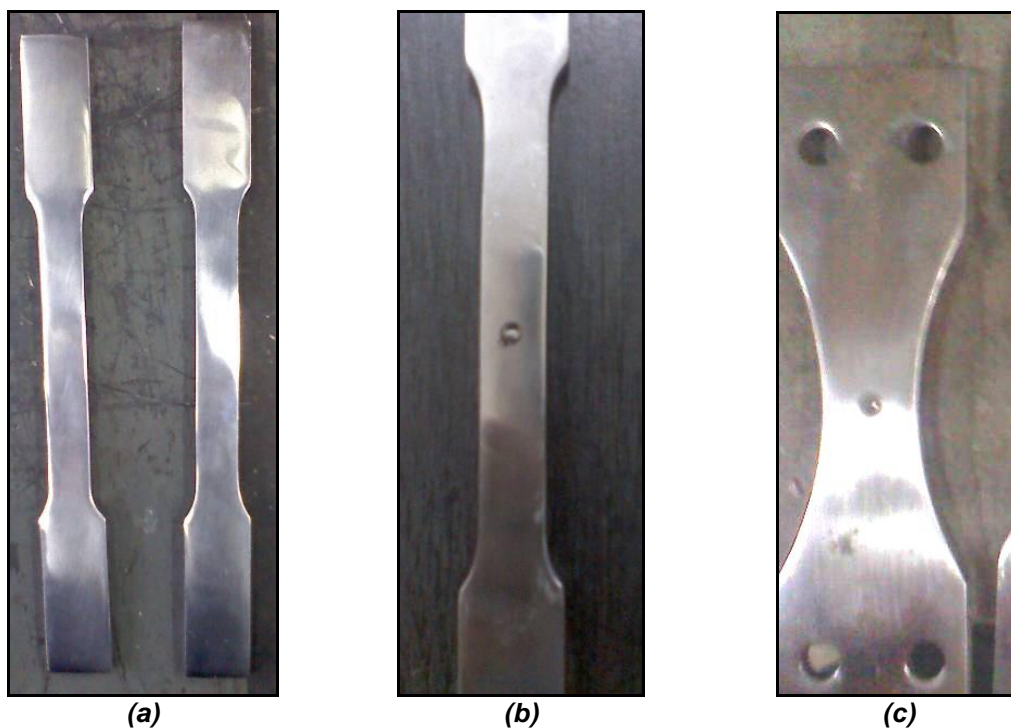
cobre, que había sido empleada previamente en un ensayo de fatiga, para el análisis de la superficie de fractura. Este laboratorio se encargó de preparar la probeta y realizar los ensayos relacionados con el MBE. Posteriormente entregaron los resultados respectivos.

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

#### 3.1. Acabado de probetas

La figura 3.1 a continuación contiene ejemplares de las probetas empleadas para ensayos de tracción uniaxial y de fatiga con y sin incrustaciones de cobre. Las probetas empleadas para los ensayos cumplen con las especificaciones de la norma ASTM A370. Sin embargo, las incrustaciones (contaminación) de cobre no están sujetas a normas alguna especificación ASTM puesto que no existe una bibliografía al respecto.



**Figura 3.1: Modelos de probetas empleadas para (a) ensayos de tracción sin incrustación de cobre; (b) ensayos de tracción con incrustación de cobre; (c) ensayos de fatiga con incrustación de cobre.**

Siguiendo las contemplaciones establecidas en el procedimiento experimental seguido para realizar las incrustaciones (contaminación) del cobre en

las probetas de acero ASTM A36, no se observaron daños o imperfecciones macroscópicas en las superficies de las probetas, diferentes a las incrustaciones realizadas.

### 3.2. Resultados puente de Wheatstone

En la tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos en la calibración y determinación de esfuerzos ejercidos por la máquina Schenck sobre las probetas de fatiga, para las condiciones de 2,5; 3,0; 3,5 y 4,0 vueltas al tornillo de ajuste de la excentricidad de la máquina Schenck (ver anexo III y IV para calibración de las galgas extensiométricas y de la máquina Schenck). También se puede observar el porcentaje de esfuerzo alcanzado respecto al esfuerzo de fluencia nominal del acero ASTM A36 (250MPa).

**Tabla 3.1: Porcentaje del esfuerzo de flexión respecto del esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 según el número de vueltas que se da al tornillo responsable por ejercer dichos esfuerzos en la máquina Schenck empleada para los ensayos de tracción.**

No. vueltas al tornillo de la máquina Schenck para ensayos fatiga	Esfuerzo [MPa]	% del esfuerzo aplicado por la máquina respecto del esfuerzo de fluencia
2,5	104,92	41,97%
3,0	133,54	53,42%
3,5	155,80	62,32%
4,0	191,83	76,73%

### 3.3. Ensayos de tracción:

Las figuras 3.2 a 3.5 contienen las curvas de tracción uniaxial-deformación ingenieril, graficadas por la máquina universal de tracción uniaxial en los ensayos de tracción realizados a cuatro (4) probetas de las cuales: dos (2) son estándar y dos (2) presentaron incrustaciones de cobre. En el papel milimetrado empleado para la construcción de las gráficas, un (1) centímetro en el sentido de “eje y” corresponde a 0,5Mpondios de fuerza aplicada por la máquina.

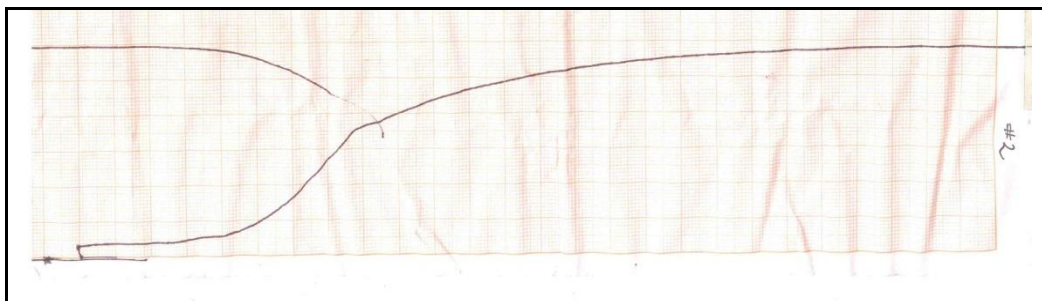


Figura 3.2: Curva de tracción-deformación de la probeta 1E. 1cm eje y = 0,5Mpondio.

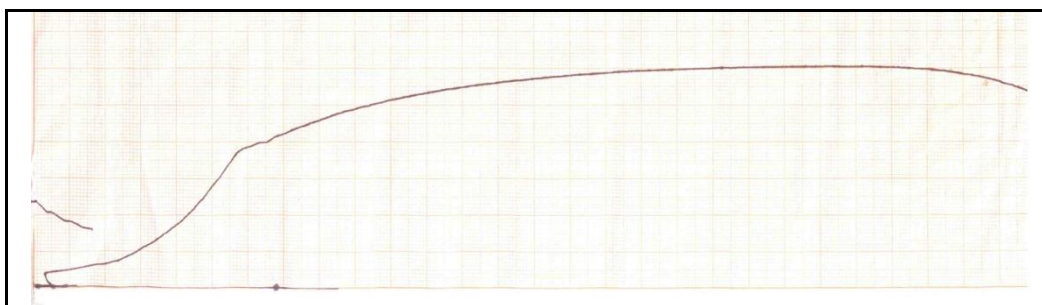


Figura 3.3: Curva de tracción-deformación de la probeta 2E. 1cm eje y = 0,5Mpondio.

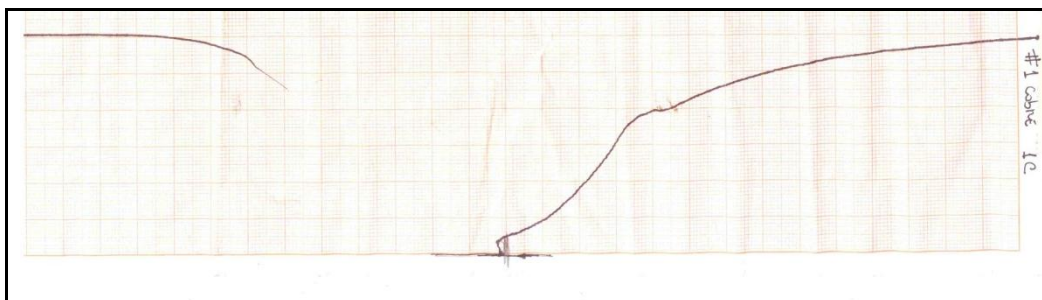


Figura 3.4: Curva de tracción-deformación de la probeta 1C. 1cm eje y = 0,5Mpondio.

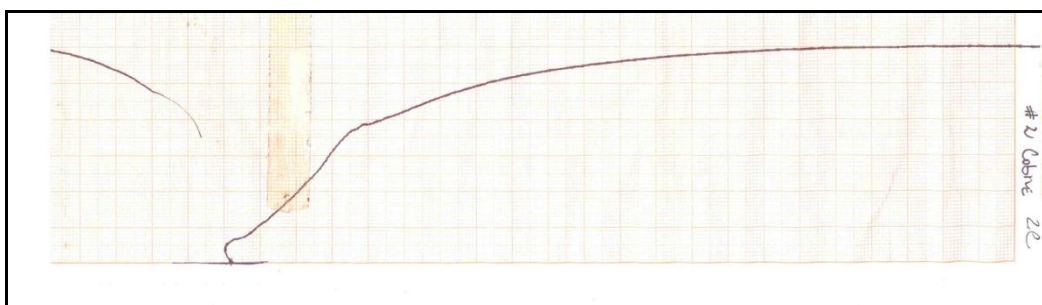


Figura 3.5: Curva de tracción-deformación de la probeta 2C. 1cm eje y = 0,5Mpondio.

La tabla 3.2 mostrada a continuación resume los datos obtenidos durante los ensayos de tracción uniaxial realizados.

**Tabla 3.2: Datos experimentales recolectados de los ensayos de tracción realizados a las cuatro (4) probetas.**

Probeta	Espesor = e			$e_{prom}$ [mm]	Ancho = a			$a_{prom}$ [mm]	Fuerza de fluencia [MPondios]	Fuerza máxima de tracción [MPondios]
	1ra	2da	3ra		1ra	2da	3ra			
1E	4,9	4,9	4,9	4,9	13,0	13,4	13,1	13,2	2,0	3,2
2E	4,9	4,8	4,9	4,9	13,0	13,3	13,0	13,1	1,9	3,0
1C	4,9	4,9	4,8	4,9	12,8	13,2	13,1	13,0	2,0	3,1
2C	4,9	4,9	4,9	4,9	12,8	12,8	13,0	12,9	1,9	3,0

La tabla 3.3 mostrada a continuación resume los resultados de esfuerzo y deformación de los ensayos de tracción uniaxial calculados a partir de las curvas mostradas en la Figura 3.2 a 3.5 y en los datos colectados en la tabla 3.2..

**Tabla 3.3: Resultados de esfuerzo experimentales realizados a partir de los datos recolectados en la tabla 3.2 de los ensayos de tracción realizados a las cuatro (4) probetas.**

Probeta	Área	Fuerza de fluencia		$S_y$	$S_{y\ prom}$	Fuerza máxima de tracción		$S_{ut}$	$S_{ut\ prom}$
	[mm <sup>2</sup> ]	[Kgf]	[Nw]	[MPa]	[MPa]	[Kgf]	[Nw]	[MPa]	[MPa]
1E	64,68	2.000	19.613	303,24	296,75	3.200	31.381	485,18	471,75
2E	64,19	1.900	18.633	290,27		3.000	29.420	458,33	
1C	63,70	2.000	19.613	307,90	301,34	3.100	30.401	477,25	471,34
2C	63,21	1.900	18.633	294,77		3.000	29.420	465,43	

En las figuras 3.2 a la 3.5 y en la tabla 3.3, se observan evidencias que bajo esfuerzos uniaxiales (esfuerzos de tracción), el límite de fluencia y el límite último de tracción del material no presentan variaciones apreciables debido a presencia de incrustaciones (contaminación) de cobre.

Por lo antes expuesto se puede indicar que la presencia de incrustaciones de cobre en los materiales, los cuales estén sometidos a esfuerzos de tracción no tenderán a presentar fallas a menores esfuerzos que los nominales del material base.

### 3.4. Ensayos de fatiga

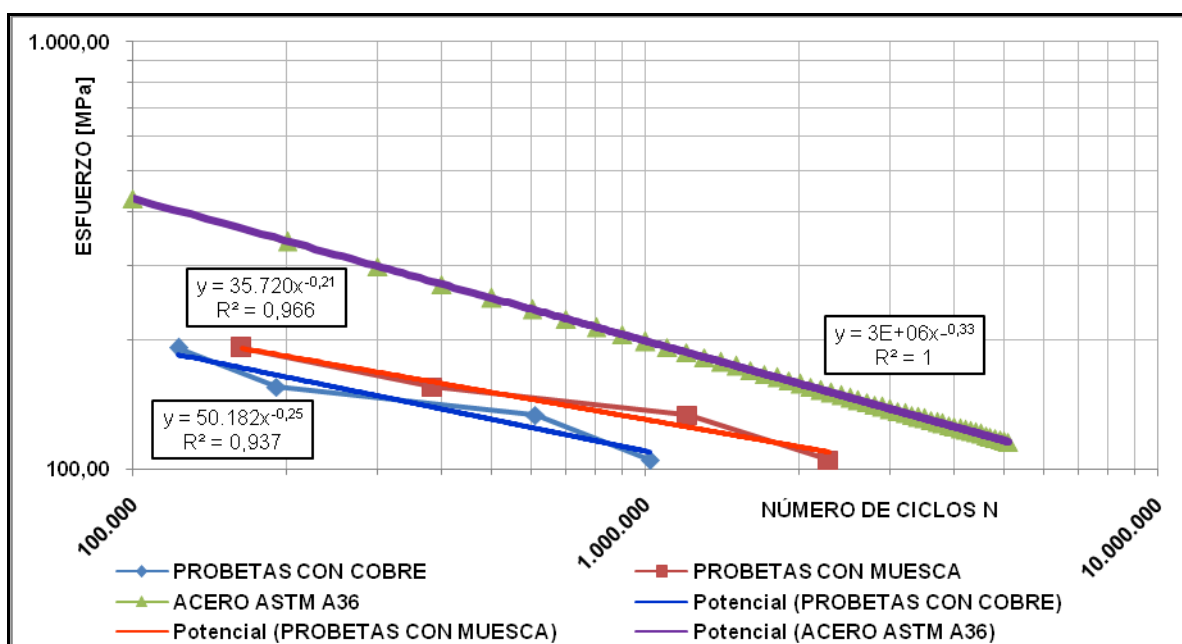
La tabla 3.4 presentada a continuación muestra los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga realizados. Cada número de vueltas dado al tornillo de ajuste de la excentricidad de la máquina Schenck corresponde a un determinado valor de esfuerzo (unidades en MPa).

Luego, para cada ensayo se determinó la cantidad de ciclos transcurridos desde el inicio del experimento hasta el momento de fractura y se calculó el número de ciclos promedio para cada determinado número de vueltas de dicho tornillo.

**Tabla 3.4: Datos recolectados durante los ensayos de fatiga realizados a las probetas de acero ASTM A36 con muesca y con incrustaciones de cobre.**

No. Vueltas	Esfuerzos [MPa]	ENSAYOS DE PROBETAS CON INCRUSTACIONES COBRE			ENSAYOS DE PROBETAS CON MUESCA		
		Probeta	Total Ciclos	Ciclos Promedio	Probeta	Total Ciclos	Ciclos Promedio
2,5	104,92	1	1.103.100	1.018.480	1	2.230.800	2.274.200
		2	953.500		2	1.865.100	
		3	1.320.100		3	2.205.500	
		4	801.600		4	2.795.400	
		5	914.100				
3,0	133,54	1	615.200	608.680	1	986.300	1.209.525
		2	463.300		2	913.300	
		3	859.900		3	1.258.200	
		4	580.000		4	1.680.300	
		5	525.000				
3,5	155,80	1	155.000	190.420	1	263.200	384.425
		2	155.000		2	301.800	
		3	162.100		3	368.500	
		4	200.000		4	604.200	
		5	280.000				
4,0	191,83	1	108.100	122.480	1	143.400	240.550
		2	156.500		2	158.100	
		3	142.100		3	350.200	
		4	91.600		4	310.500	
		5	114.100				

La figura 3.6 a continuación contiene el diagrama S-N construido a partir de los ensayos realizados a las probetas de acero ASTM A36 con muesca y con incrustación de cobre. Además, se adicionó una curva teórica correspondiente al acero ASTM A36 (fuente: *Guidelines for design of wind turbines, primera edición, Tetnorske Veritas and Wind Energy Deparment, Riso National Laboratory, Noruega. Año 2001*), que permite comparar los resultados obtenidos en la práctica.



**Figura 3.6: Diagrama S-N de los ensayos de fatiga realizados a las probetas con muesca (color rojo con línea de tendencia color rojo), con incrustaciones de cobre (color azul con línea de tendencia color azul) y una curva teórica para el acero ASTM A36 con su respectiva línea de tendencia (curvas verde y púrpura respectivamente).**

Como se puede observar en el diagrama S-N construido a partir de los ensayos realizados (ver datos en la tabla 3.4), las probetas de acero ASTM A36 con incrustaciones (contaminación) de cobre fallaron a valores inferiores de esfuerzos que las probetas con muesca.

Así mismo, al comparar la gráfica anterior los resultados experimentales con la curva teórica del diagrama S-N para el acero ASTM A36 sin ningún tipo de concentrador de tensiones, se puede observar que para ambos modelos

experimentales de probetas empleados (con muesca y con incrustaciones de cobre) las fallas suceden a esfuerzos menores para un determinado número de ciclos.

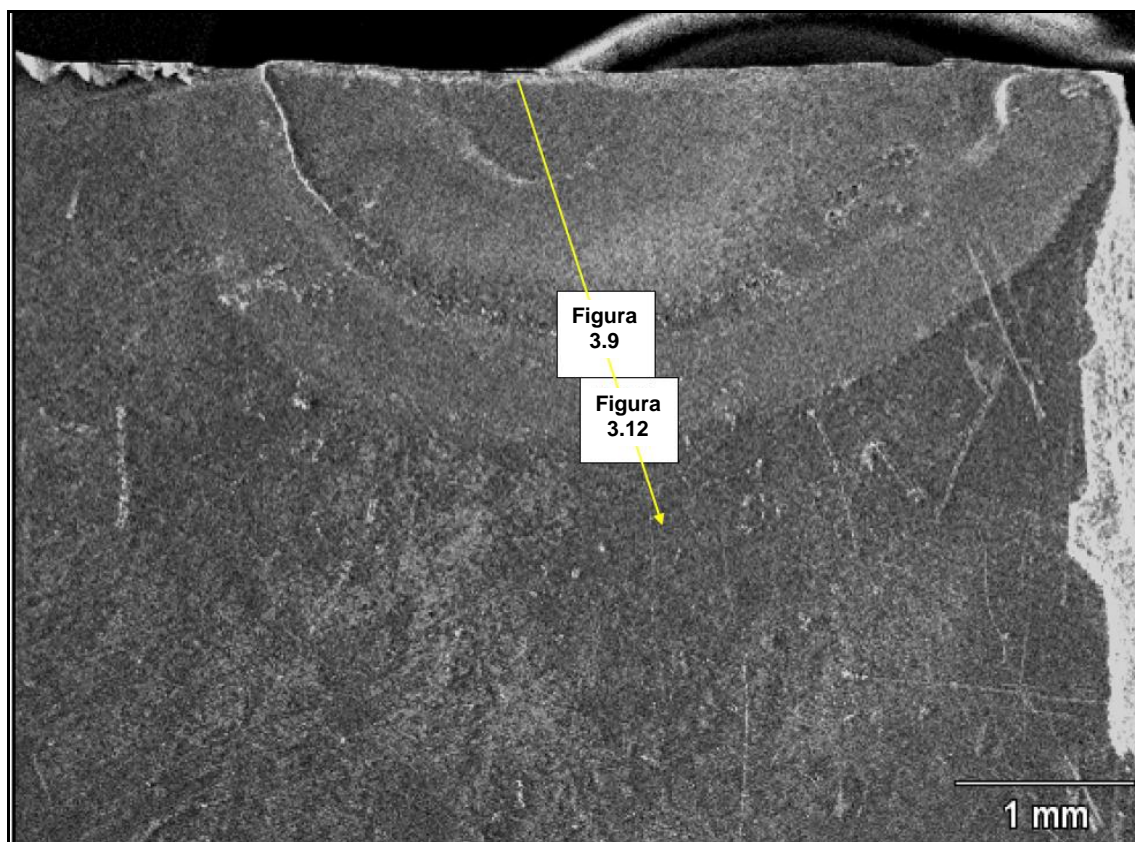
Se podría decir entonces que las fallas en campo de las estructuras metálicas de acero ASTM A36 se deben a una disminución en su resistencia a la fatiga como consecuencia de las incrustaciones de cobre en ellas observadas.

Por otra parte es importante destacar que en este estudio solamente se evaluaron los concentrados de esfuerzos debido a cortos circuitos bajo las condiciones de esfuerzos de tracción uniaxial y flexión alternativa.

En situaciones reales las estructuras están sometidas a estados tensiles biaxiales y/o triaxiales donde los esfuerzos cortantes son menores, motivo por el cual las grietas se propagan con mayor facilidad. Sumado a lo antes expuesto y debido a las condiciones operativas durante los procesos constructivos, las uniones entre diversas partes de un componente no se pueden realizar al mismo tiempo lo que esta condición contribuye a la no uniformidad de esfuerzos.

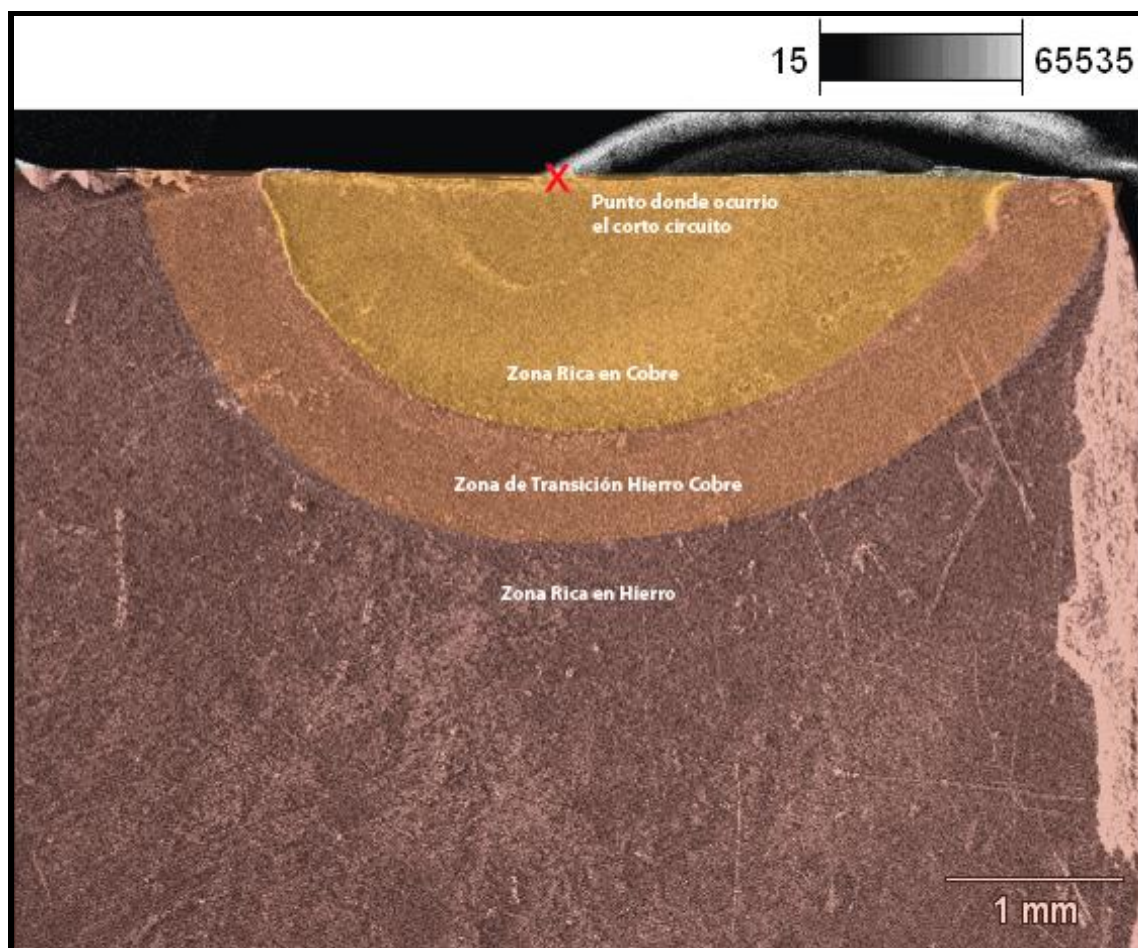
### **3.5. Microscopio de Barrido Electrónico “MBE”**

En la figura 3.6, se puede observar la vista superior de un espécimen (probeta) analizado en el MBE. Este estudio se realizó sobre la cara superior de una probeta, en la cual se hizo la incrustación (contaminación) del cobre por cortocircuito. En esta figura a continuación, se puede distinguir la forma circular de la incrustación de cobre en el acero. Adicionalmente, en esta figura se señala la ubicación de las figuras 3.9 y 3.12 presentadas más adelante. La línea amarilla representa la dirección y sentido en que se realizó el estudio químico mediante EDS.



**Figura 3.6:** Vista superior del espécimen (probeta) analizado en el MBE. Se empleo la cara superior de la probeta, sobre la cual se hizo la incrustación (contaminación) del cobre. Se puede observar el detalle (mapa) de las figuras 3.8 y 3.11 mostradas más adelante. La línea amarilla representa la dirección y sentido del estudio realizado en MBE.

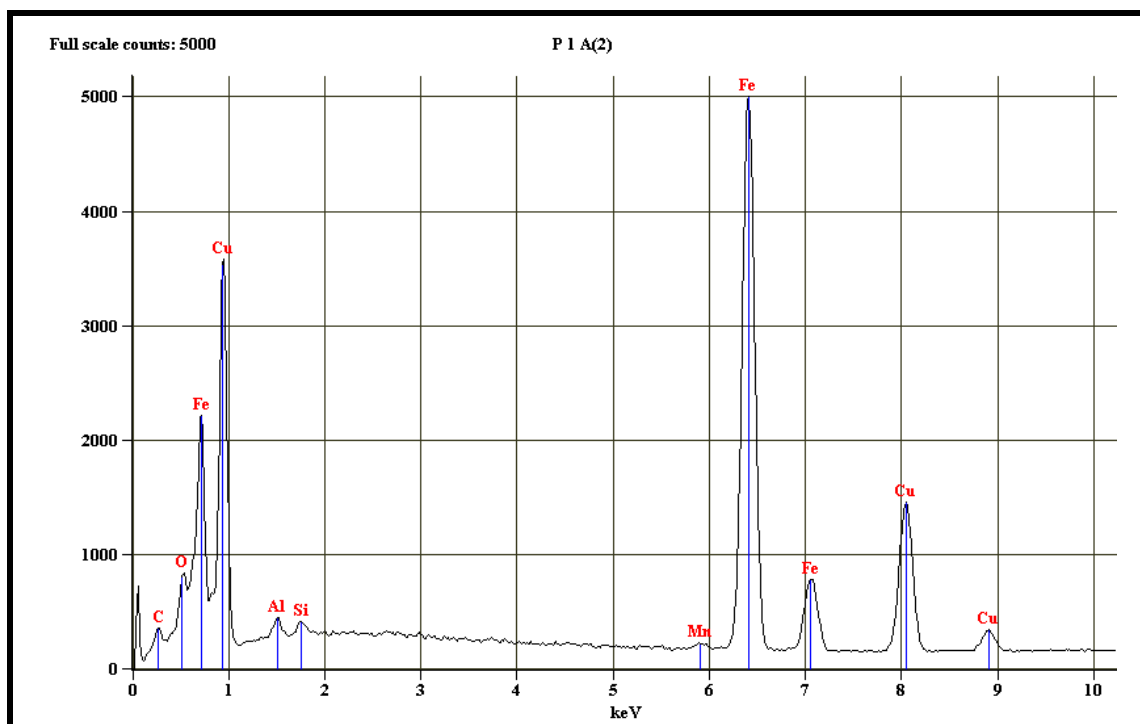
En la figura 3.7 a continuación presenta la misma vista que la figura 3.6 anterior, pero los detalles en colores permiten apreciar 3 zonas importantes en la superficie del espécimen estudiado y que serán detalladas en las figuras 3.9: una zona rica en cobre alrededor del punto donde sucede el corto circuito (cruz roja), una interfase o zona de transición hierro-cobre y una zona rica en hierro en la parte inferior de la figura.



**Figura 3.7:** Misma vista de la Figura 3.6. En esta figura se encuentran señalados los puntos de interés a ser estudiados. La cruz en color rojo señala en punto donde sucedió el cortocircuito. Se pueden distinguir 3 zonas importantes: zona rica en cobre, interfase zona de transición hierro-cobre y zona rica en hierro.

La zona de transición hierro-cobre, también llamada interfase hierro-cobre en adelante, rodea como una corona a la zona rica en cobre, separándola de la zona rica en hierro, según se puede observar en la figura 3.7. Esta zona o interfase en la superficie del espécimen estudiado contiene cantidades similares de cobre y hierro, como podrá apreciarse más adelante (figura 3.17).

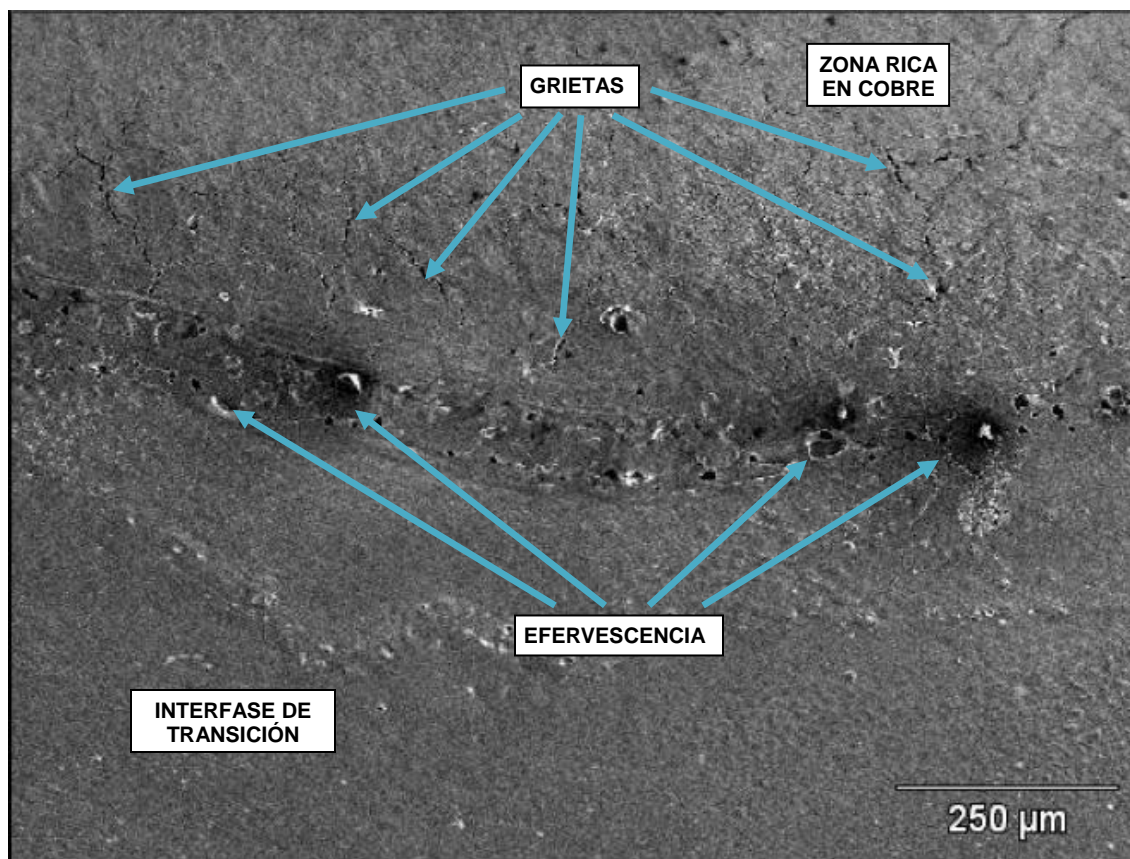
En la figura 3.8 presentada a continuación contiene un mapeo de la superficie estudiada con el MBE, donde se detalla la composición química. Se puede observar una alta presencia de hierro y cobre en dicha superficie.



**Figura 3.8:** Mapeo de la superficie estudiada con el MBE. Se observa el detalle de la composición química de dicha superficie.

En la figura 3.9 a continuación, se presenta la zona mostrada en la figura 3.6 donde se distinguen las zonas rica en cobre (en la parte superior de la figura) y la interfase hierro-cobre (en la parte inferior). En la zona rica en cobre se puede observar la presencia de varias micro-grietas, las cuales pueden ser un indicio del motivo de la falla prematura de las estructuras metálicas de acero ASTM A36.

También se observan unos “hoyuelos” en la parte media de esta figura, en el límite donde termina la parte rica en cobre y comienza la interfase hierro-cobre, lo que indica una efervescencia por el contacto cobre-hierro cuando sucede el cortocircuito.



**Figura 3.9:** Detalle del límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre señalados en la figura 3.7. En la figura 3.6 se muestra un mapa de la ubicación de estudio de esta figura. se puede observar un . Se observan micro-grietas en la zona rica en cobre y efervescencia en el límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre.

En las figura 3.10 y 3.11 se puede observar la cantidad cualitativa de cobre y hierro en la interfase. Se puede observar a través de la figura 3.9, donde sólo muestra el cobre la presencia de cobre, que hay gran cantidad de este elemento presente en la superficie de las zonas rica en cobre y de la interfase hierro-cobre. En la figura 3.11 se puede distinguir tanto la presencia de cobre como de hierro en la misma superficie. Igualmente, en la parte media de esta figura, cerca de la zona donde se encuentran las efervescencias, se puede observar un “cordón” de cobre sobre la superficie de hierro consecuencia de las salpicaduras de cobre cuando sucede el cortocircuito.

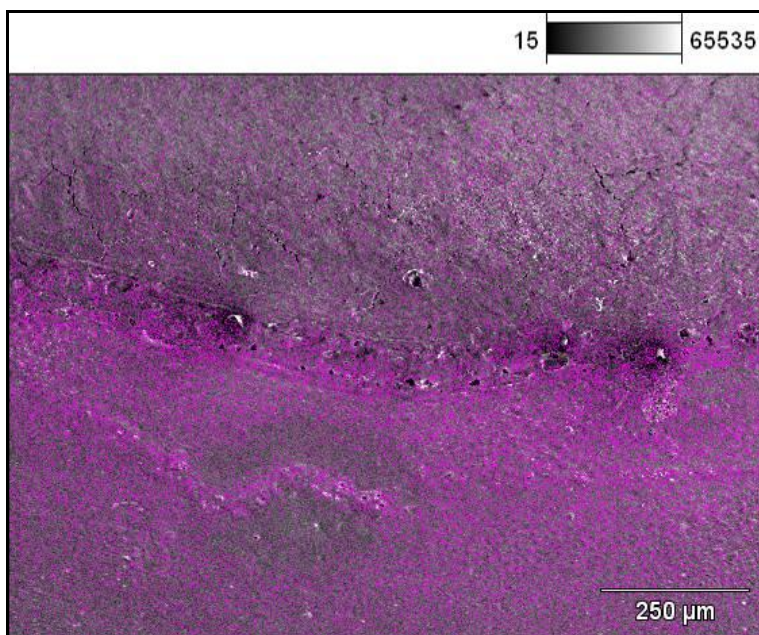


Figura 3.10: Misma vista de la figura 3.9. Se puede observar la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) en la superficie estudiada.

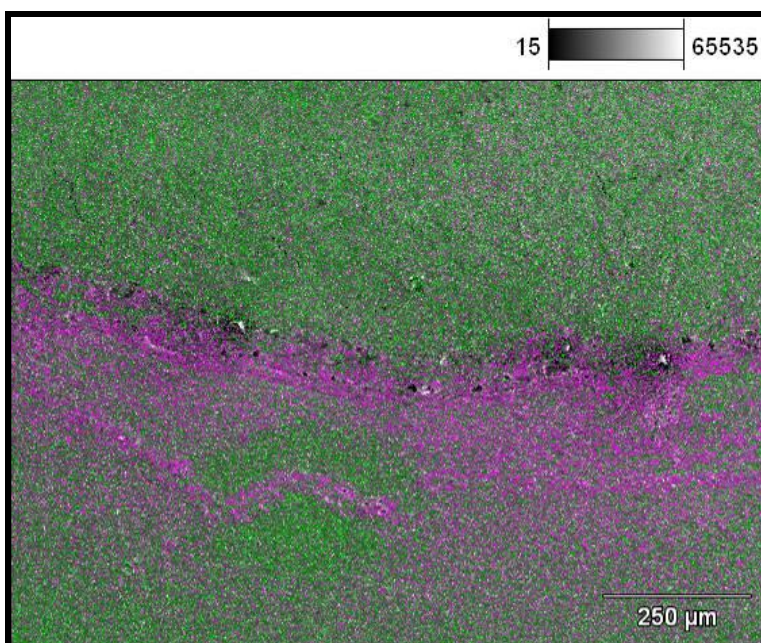
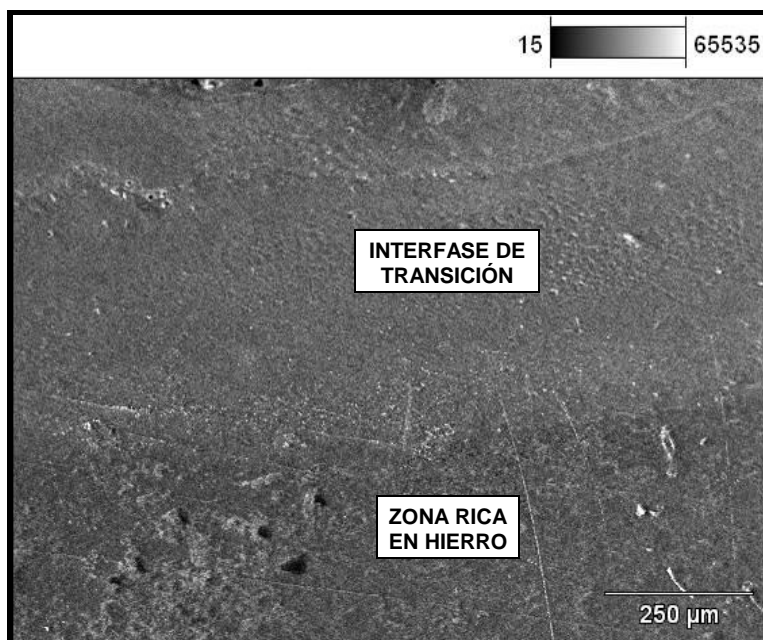


Figura 3.11: Misma vista de la figura 3.9. Se observa la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) en relación con el hierro (color verde) presente en la superficie estudiada.

En la figura 3.12 se presenta una vista de el límite donde finaliza la interfase hierro-cobre (en la parte superior de la figura) y comienza la zona rica en hierro (parte inferior), que fueron señaladas en la figura 3.7. En la figura 3.6 se muestra un mapa de esta ubicación en estudio. En esta figura se puede apreciar la diferencia entre las superficies de ambas zonas.

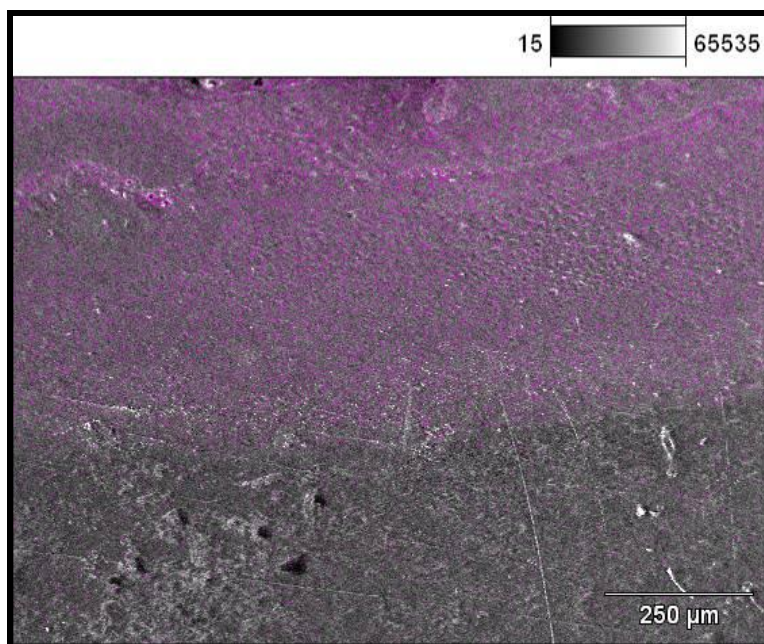


**Figura 3.12:** Detalle del límite entre la zona de transición cobre-hierro en la parte superior y la zona rica en hierro en la parte inferior, señaladas en la figura 3.7. En la figura 3.6 se muestra un mapa de la ubicación de estudio de esta figura.

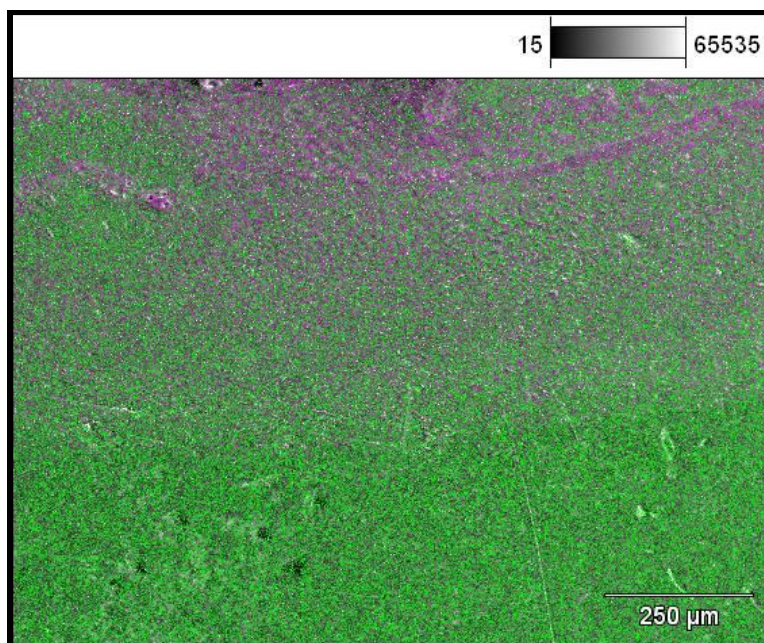
Las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 presentan la misma vista de la figura 3.12 anterior, pero permiten detallar en colores la cantidad cualitativa de cobre y hierro presentes en la superficie de esta vista.

Se puede observar en estas figuras que la presencia de cobre disminuye y la presencia de hierro se incrementa a medida que se acerca el límite entre la interfase hierro-cobre y la zona rica en hierro, hasta que finalmente sólo se observa la presencia de hierro en la zona rica en hierro.

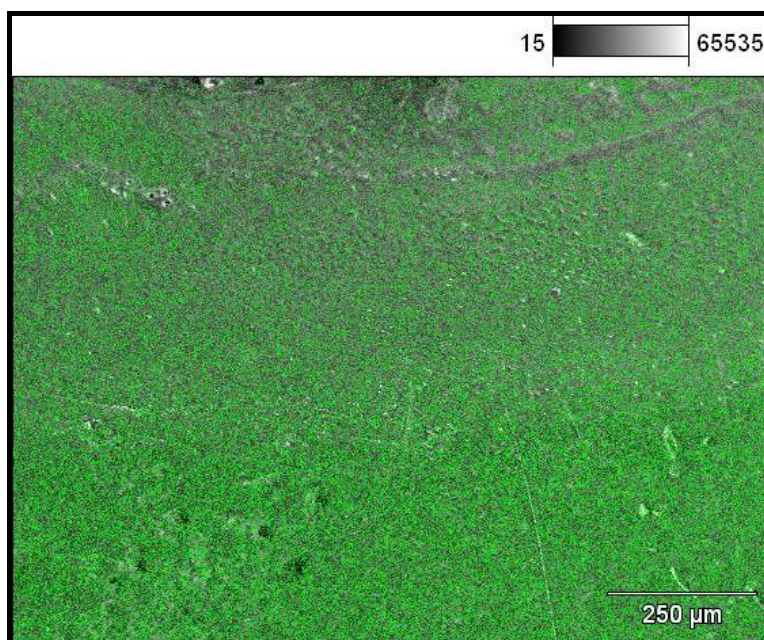
También, se puede distinguir fácilmente el límite entre la interfase hierro-cobre y la zona rica en hierro por la carencia de cobre en esta última.



**Figura 3.13:** Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) presente en la superficie estudiada en esta vista. Se observa la presencia de cobre en la interfase hierro-cobre (parte superior de la figura) y la carencia del mismo en la zona rica en hierro (parte inferior).

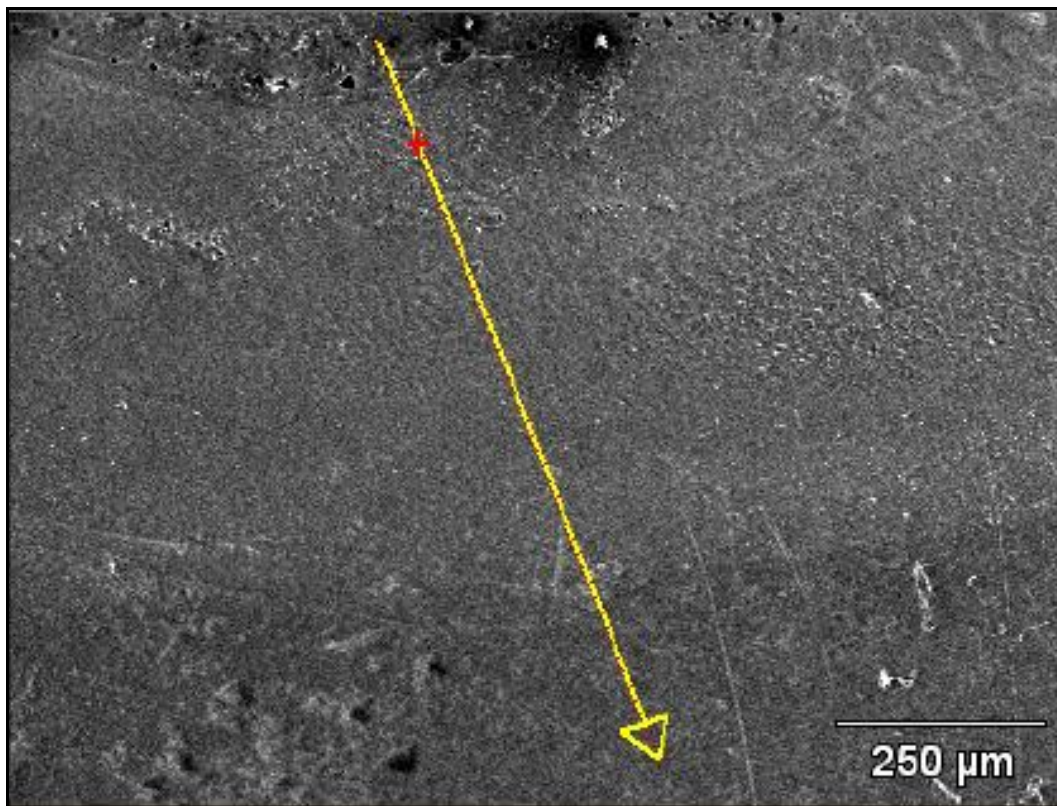


**Figura 3.14:** Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de cobre (color rosado) y hierro (color verde) presentes en la superficie estudiada en esta vista. A medida que se acerca el límite de la interfase hierro-cobre y comienza la zona rica en cobre disminuye la presencia del cobre.



**Figura 3.15:** Misma vista de la figura 3.12. Detalle de la cantidad cualitativa de hierro (color verde) presente en la superficie estudiada en esta vista. A medida que se acerca el límite de la interfase hierro-cobre y comienza la zona rica se incrementa la presencia de hierro en la superficie estudiada.

La figura 3.16 a continuación presenta la misma vista de la figura 3.12, el límite entre la interfase hierro-cobre y la zona rica en hierro. Se identifica la dirección y sentido de otro estudio realizado con el MBE (flecha amarilla) y se señala con una cruz roja el punto de estudio que señala la gráfica mostrada en la figura 3.17.



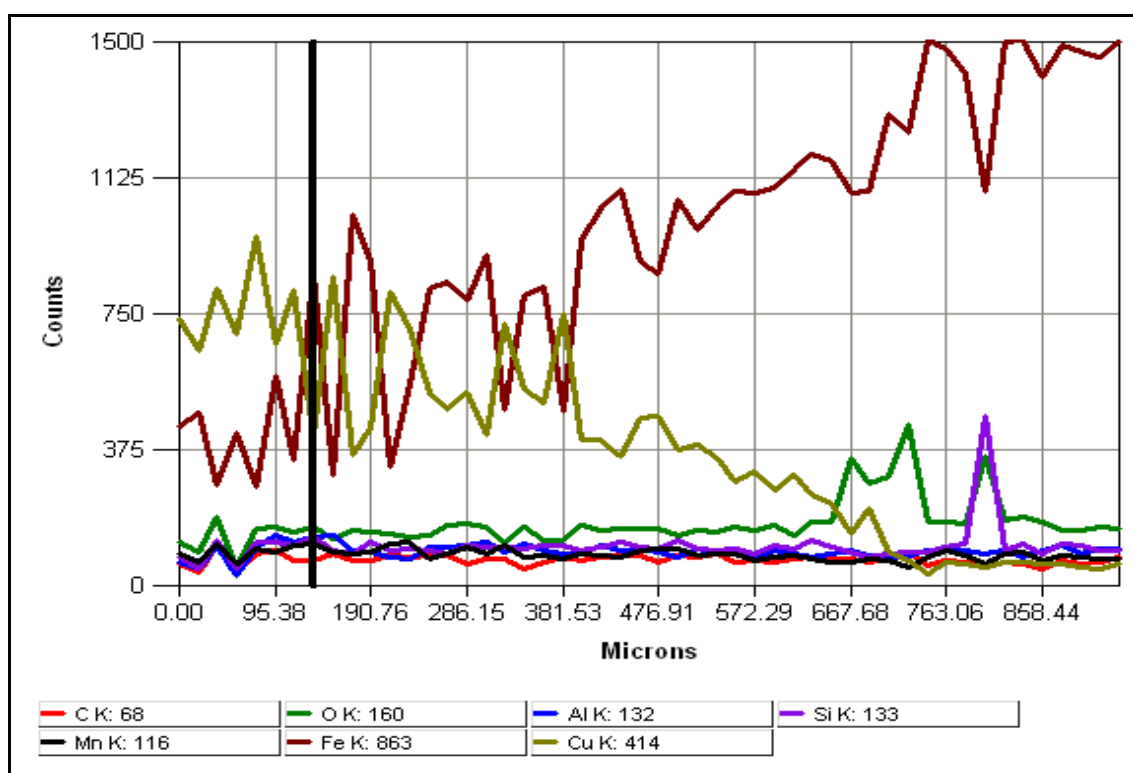
**Figura 3.16:** Misma vista de la figura 3.12. Se muestra con una flecha amarilla la dirección y sentido del estudio realizado con el MBE sobre la superficie y se señala con una cruz roja el punto de estudio que señala la gráfica mostrada en la figura 3.17.

En la figura 3.17 a continuación se presenta un gráfico que cuantifica la presencia de los diferentes elementos señalados en la leyenda del mismo (carbono, oxígeno, aluminio, silicio, manganeso, hierro y cobre) a lo largo de la flecha amarilla mostrada en la figura 3.16. Esta flecha comienza en la interfase hierro-cobre, pasa por el límite entre ambas zonas y finaliza en la zona rica en hierro.

La barra negra vertical que intersecta las curvas en este gráfico corresponde a la cruz roja mostrada en la figura 3.16 y a los valores de los diferentes elementos mostrados en la leyenda.

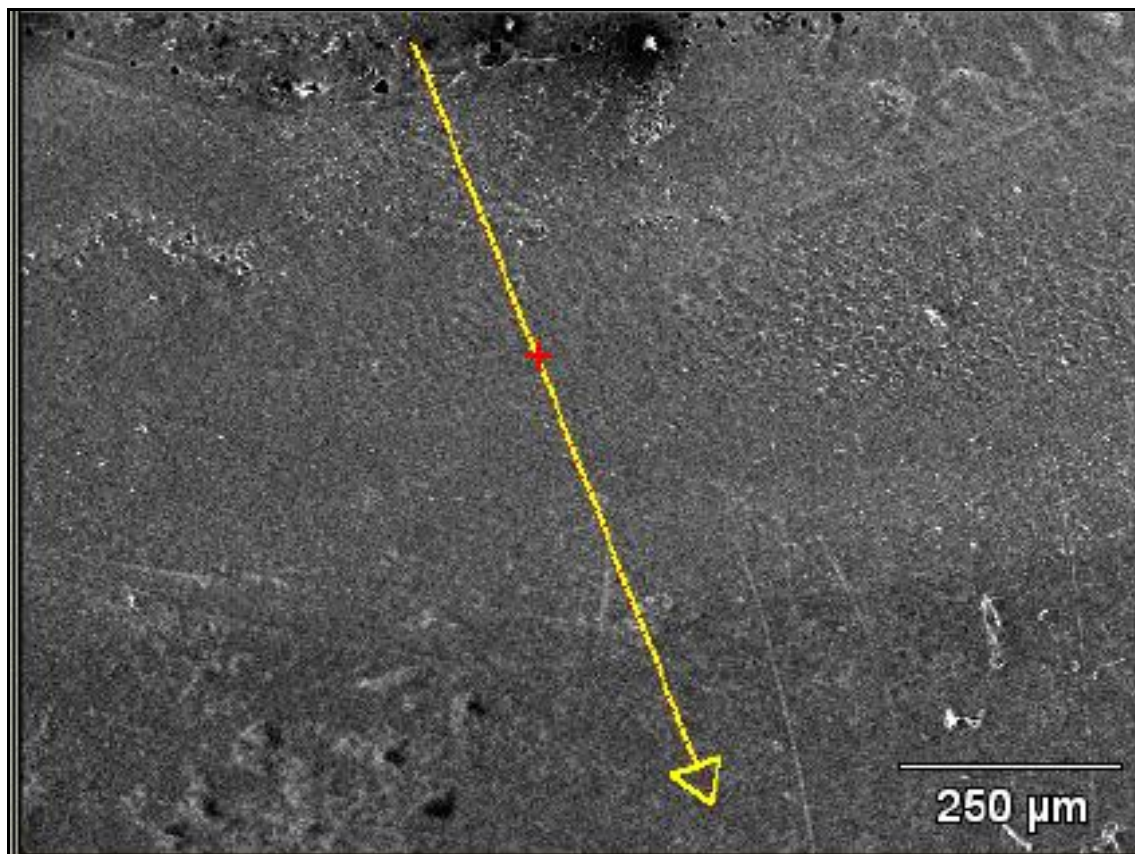
Como se puede observar, el punto señalado por la cruz roja en la figura 3.16, el cual se encuentra en la interfase cobre-hierro cercana al límite, posee ambos elementos (hierro y cobre) en cantidades similares; esto concuerda con lo

señalado en la figura 3.7 anterior, donde se identificó la interfase hierro-cobre como una corona que separaba las zona rica en cobre y la zona rica en hierro y cuya composición de hierro y cobre es similar.



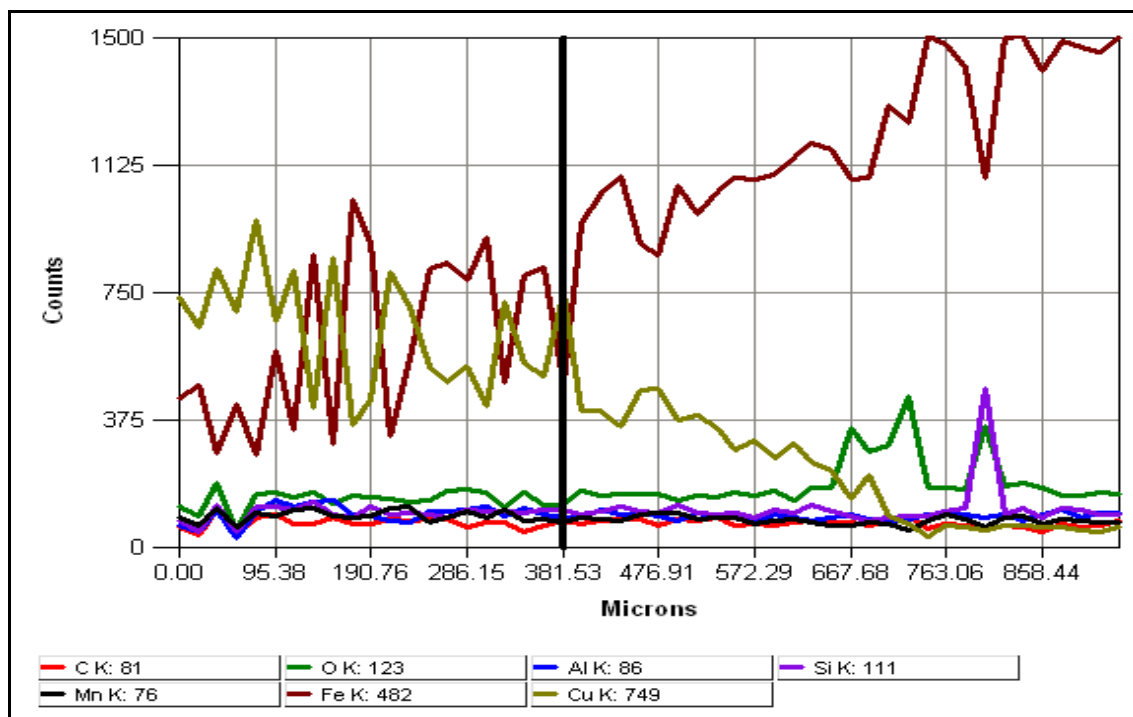
**Figura 3.17:** Mapeo de la superficie mostrada en la figura 3.16. Muestra la composición química en la superficie estudiada. La barra negra vertical indica la composición química en el punto señalado con una cruz roja en la figura 3.16.

La figura 3.18 a continuación presenta la misma vista de la figura 3.16, pero en esta ocasión se señala con una cruz roja un nuevo punto para el estudio de la superficie realizado con el MBE en la gráfica mostrada en la figura 3.19.



**Figura 3.18:** Misma vista de la figura 3.16. Se muestra con una flecha amarilla la dirección y sentido del estudio realizado con el MBE sobre la superficie y se señala con una cruz roja el punto de estudio que señala la gráfica mostrada en la figura 3.19.

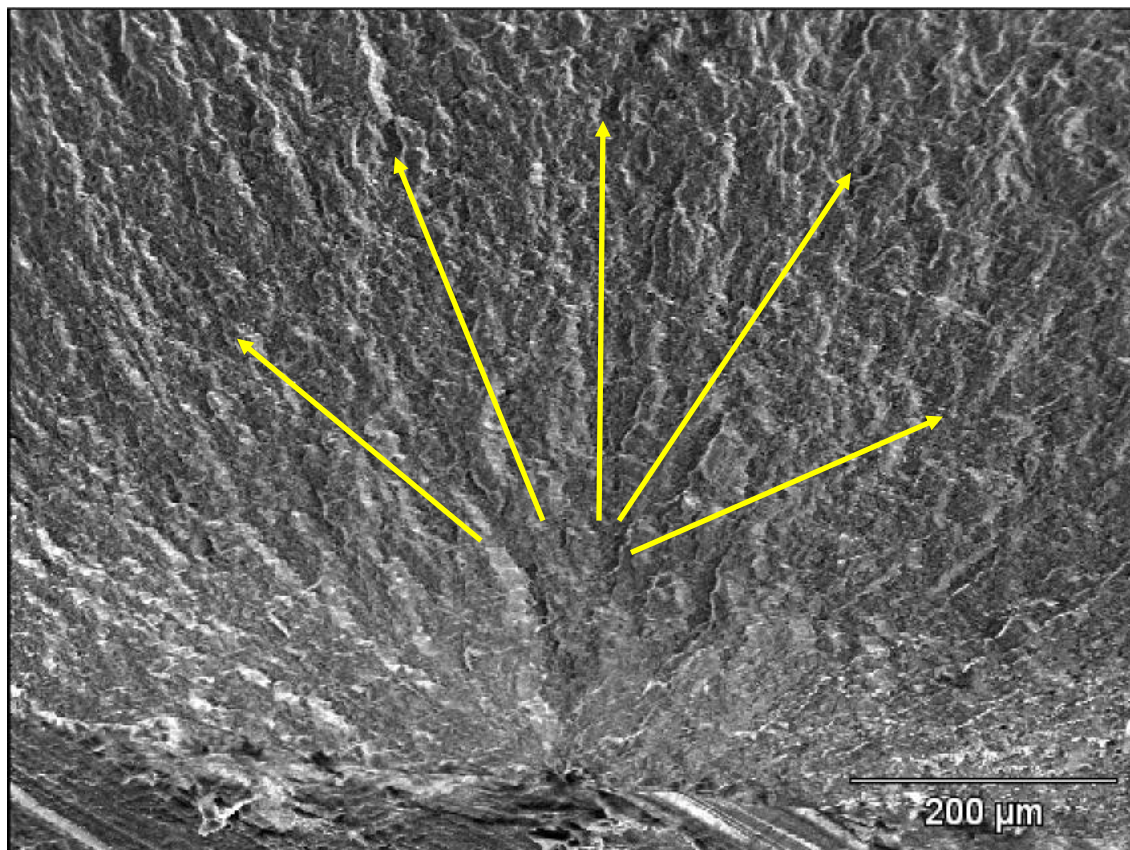
En la figura 3.19 a continuación se muestra el mismo gráfico de la figura 3.17, pero la barra negra vertical corresponde a la cruz roja mostrada en la figura 3.18 que se encuentra en el límite entre la interfase hierro-cobre y la zona rica en hierro.



**Figura 3.19: Mapeo de la superficie mostrada en la figura 3.18. Muestra la composición química en la superficie estudiada. La barra negra vertical indica la composición química en el punto señalado con una cruz roja en la figura 3.18.**

Como se puede observar en el gráfico mostrado en la figura anterior, a partir del punto señalado por la cruz roja en la figura 3.18, disminuye rápidamente la presencia de cobre en la superficie y se incrementa la cantidad de hierro, lo que soporta las observaciones realizadas anteriormente en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15. Este punto señala el límite donde termina la interfase hierro-cobre y se inicia la zona rica en hierro.

En la figura 3.20 mostrada a continuación presenta una vista en un punto cercano al límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre. En ella se puede apreciar el punto de origen de una micro – grietas; a un punto de cobre concentrador de esfuerzos. Esto puede ser otro indicador de que las incrustaciones (contaminación) del cobre en el acero generan los puntos concentradores de esfuerzos donde posteriormente se puede originar la falla del material.



**Figura 3.20:** Vista del límite entre la zona rica en cobre y la interfase hierro-cobre. Se observa la convergencia de microgrietas a un punto de cobre concentrador de esfuerzos.

## **CAPÍTULO V**

### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. Conclusiones**

- Se observó que las fallas bajo esfuerzos alternantes de las probetas de acero ASTM A36 con incrustaciones de cobre ocurrieron a esfuerzos inferiores que las fallas de las mismas probetas sin incrustaciones de cobre.
- Observamos que bajo esfuerzos axiales de tracción simple, el límite de fluencia y el límite máximo de tracción de las probetas sin incrustaciones y con incrustaciones de cobre son similares.
- Se observaron la formación de tres zonas en las incrustaciones (contaminación) de cobre en el acero: una zona rica en cobre, una interfase hierro-cobre y una zona rica en hierro; donde la zona rica en cobre se caracteriza por la presencia de micro-grietas y la presencia de concentradores de esfuerzos (por convergencia de microgrietas).
- Se podría inferir que ciertas fallas durante los procesos fabricación y/o reparación de estructuras metalmecánica de acero ASTM A36, se deben a una disminución en su resistencia a la fatiga como consecuencia de las incrustaciones de cobre en ellas observadas.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Las empresas responsables por realizar las soldaduras de estructuras metalmecánicas de aceros, deben tener especial cuidado durante los trabajos de campo para evitar el contacto o roce entre los cables de corriente de los electrodos y las estructuras metálicas que están siendo soldadas.

- Se recomienda realizar nuevos estudios de microscopio de barrido electrónico y microestructura de grano para probetas (con y sin incrustaciones de cobre) sometidas a los ensayos de tracción y fatiga en la superficie de fractura, para poder profundizar en los mecanismos microestructurales del efecto del cobre en dicha superficies.
- Se recomienda comparar la superficie de fractura de especímenes de campo que hayan fallado con la superficie de fractura de las probetas con incrustaciones de cobre sometidas a ensayos de fatiga empleando el microscopio de barrido electrónico.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Shackelford, James (2005) **“Introducción a la ciencia de los Materiales para ingenieros”** 6ta edición, Prentice Hall, Madrid (1)

Millán Gómez, Simón (2006) **“Procedimientos de Mecanizado”** Madrid: Editorial Paraninfo.

M. Reina, (1988) **“Soldadura de los aceros. Aplicaciones”**, Gráficas Lormo, Madrid.

American Society of Metals ASM. (1.972). **“Atlas of Microstructures of Alloys”** 8va . Edición.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1976), Vol. 12, Ohio.

ASME (1983) **“Strain Gage for Stress Analysis”**. Catalogo No. 215

Hertzberg, R.W.. (1989). **“Deformation and fracture mechanics of engineering materials”**. John Willey & Sons Inc., New York.

Zegarra, G. Mario (2002)**“Aplicaciones de la microscopia electrónica de barrido (SEM)”** Universidad de Chile.

Calvo Muñoz, Jessica.(2004) **“Efecto de los elementos residuales e impurezas en la ductilidad y mecanismos de fragilización en caliente de un acero de construcción 0.23C-0.9Mn-0.13Si”**. Tesis Doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Programa de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (4)

Shigley, M. (1.990). **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**. 6ta edición, McGraw-Hill, México (3).

Arias Fidias G, (2000) **“El proyecto de investigación”**. Editorial Episteme.

O’Neil, D. S.(1998) **“An Investigation of Surface Hot Shortness in Low Carbon Steel”**. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. School of Materials Science and Engineering. Faculty of Science. The University of New South Wales. Australia.

M. Picat, B. Joseph, y Barbiera, F. (1995) **“Liquid metal embrittlement: A state-of-the-art appraisal”** Fontenay-aux-Roses Cedex, France

Koizumi K. Ina, H. (2001) **“Penetration of liquid metals into solid metals and liquid metal embrittlement”** *Department of Physics, Meiji University, Tama-ku, Kawasaki, Japan*

Popov, Egor P.(2002) **“Mecánica De Materiales”** Limusa Noriega Editores.

ASTM E370 (2003) **“Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”**. American Society for Testing and Materials,

ASTM 647 (2005) **“Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”** American Society for Testing and Materials.

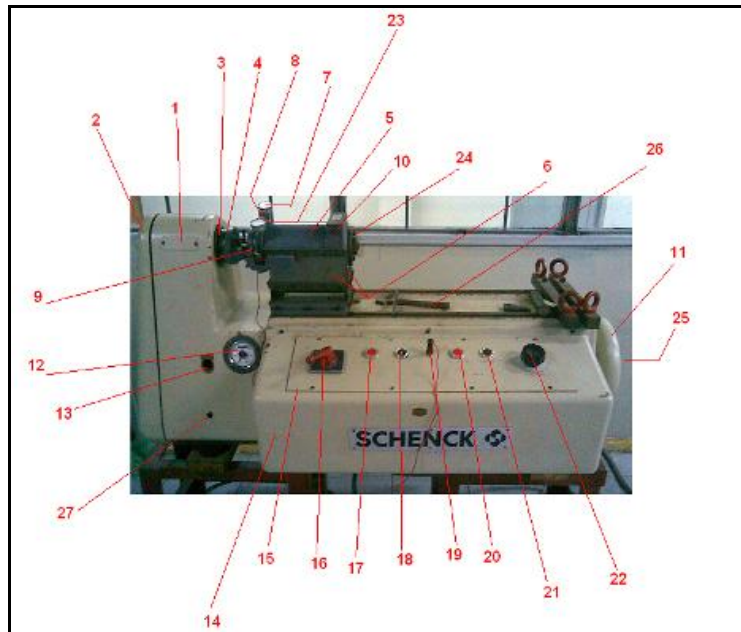
ASTM E8 (2003) **“Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”** American Society for Testing and Materials.

ASKELAND, Donald y PHULÉ, Prardeep (2004) **“Ciencia e Ingeniería de los Materiales”** Editorial Thompson. 4ta Edición (2).

C. Turn, JR., B. E. Wilde, C. A. Troianos. (1983) **“On the sulfide stress cracking of line pipe steels”**. Corrosion Vol. 30.

# ***ANEXOS***

**ANEXO I:** Esquema de las partes de una máquina marca Schenck empleada para la realización de los ensayos de Fatiga.



1. Carcasa.
2. Tapa.
3. Mordaza del eje de torsión.
4. Mordaza para probetas planas.
5. Aparato de medición de momento.
6. Guía de soporte.
7. Reloj comparador.
8. Tornillo de ajuste para el reloj comparador.
9. Contacto de Parada automática.
10. Tonillo para el ajuste del momento estático.
11. Rueda manual (volante) para el ajuste de la excentricidad a cero.
12. Contador de ciclos y control de la velocidad.
13. Abertura para ajustar la excentricidad.
14. Carcasa con los mecanismos de operación.
15. Panel de operaciones.
16. Interruptor principal.
17. Luz de convertidora de corriente.
18. Interruptor de encendido de convertidor de corriente.
19. Interruptor de parada automática.
20. Luz del motor apagado.
21. Interruptor para el encendido del motor.
22. Regulador de la velocidad.
23. Lengüeta de contacto entre relojes comparadores.
24. Tornillo para eliminar esfuerzos iniciales.
25. Parador para ajuste del volante.
26. Llave T para ajustar la excentrica.
27. Punto de acceso para la lubricación.

**ANEXO II:** Certificado de calidad de la empresa SIDOR C.A., responsable por la fabricación de las secciones de lámina de la aleación de acero ASTM A36 utilizada para la fabricación de las probetas. Este certificado muestra las especificaciones de la resistencia mecánica y la composición química nominal del material.

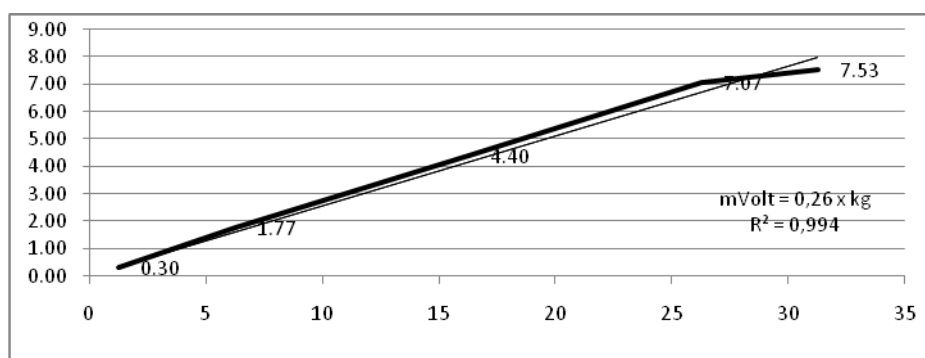
[illegible]

**ANEXO III:** Detalle de las pruebas de calibración de las galgas extensiométricas y el puente de Wheatstone empleando el montaje mostrado en la figura 2.5 y añadiendo pesos para determinar la relación Voltaje contra Peso.

La tabla a continuación contiene las diferencias de voltaje medidas por el puente de Wheatstone para cada una de las cargas señaladas. Este experimento fue realizado según el montaje mostrado en la figura 2.5. Para cada peso se tomaron 3 medidas de voltaje y se calculó el promedio y la desviación estándar para cada uno.

Carga	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	DesvEstand
[Kg]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
1,25	0,2	0,3	0,4	0,30	0,10
6,25	1,6	1,8	1,9	1,77	0,15
16,25	4,5	4,4	4,3	4,40	0,10
26,25	7,4	7,0	6,8	7,07	0,12
31,25	7,2	7,9	7,5	7,53	0,10
46,25	10	9,9	10,1	10,00	0,10

En base a los datos de la tabla anterior se construyó una curva de Voltaje contra peso, a la cual se agregó una línea de tendencia. Ambas se pueden observar en la gráfica a continuación



La ecuación de la línea de tendencia se utilizó posteriormente para calibrar la máquina Schenck para ensayos de fatiga (ver ecuación 2.8): “ $y = 0,26x$ ”.

**ANEXO IV:** Detalle de las pruebas de calibración de la máquina Schenck para ensayos de fatiga empleando el puente de Wheatstone y la ecuación 2.8 para determinar el esfuerzo de flexión ejercido sobre las probetas, con cada media vuelta que se da al tornillo responsable por los esfuerzos en dicha máquina.

La tabla a continuación contiene las diferencias de voltaje medidas por el puente de Wheatstone para cada media vuelta del tornillo responsable por los esfuerzos en la máquina Schenck para ensayos de fatiga.

Vueltas	Lectura en compresión					Lectura en tracción				
	Lect01	Lect02	Lect03	Prom	DesvEst	Lect01	Lect02	Lect03	Prom	DesvEst
	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt	mVolt
0,5	-0,9	-0,7	-0,9	-0,83	0,12	1,1	1,1	1,0	1,07	0,06
1,0	-1,5	-1,7	-1,8	-1,67	0,15	1,6	1,5	1,6	1,57	0,06
1,5	-1,8	-1,9	-1,9	-1,87	0,06	1,7	1,7	1,6	1,67	0,06
2,0	-2,2	-2,0	-1,9	-2,03	0,15	2,3	2,2	2,2	2,23	0,06
2,5	-2,6	-2,7	-2,6	-2,63	0,06	3,4	3,1	3,4	3,30	0,17
3,0	-3,4	-3,2	-3,3	-3,30	0,10	4,3	4,2	4,1	4,20	0,10
3,5	-4,2	-4,1	-4,1	-4,13	0,06	4,9	4,7	5,1	4,90	0,20
4,0	-4,8	-4,5	-4,3	-4,53	0,25	5,9	6,1	6,1	6,03	0,12
4,5	-5,5	-5,2	-5,0	-5,23	0,25	7,4	7,5	7,4	7,43	0,06
5,0	-5,9	-5,5	-5,5	-5,63	0,23	8,8	9,1	9,2	9,03	0,21
5,5	-6,7	-6,2	-6,0	-6,30	0,36	10,8	11,0	11,1	10,97	0,15
6,0	-6,8	-6,8	-6,3	-6,63	0,29	12,7	12,9	13,0	12,87	0,15

Los promedios de voltaje mostrados en la tabla anterior para cada media vuelta del tornillo de la máquina Schenck son llevados a su valor equivalente en fuerza (peso en kg) empleando la ecuación de la recta mostrada en el anexo III (ver ecuación 2.8):

$$y = 0,26x$$

A partir de la ecuación anterior y de la ecuación 2.6 mostrada a continuación se determinó el esfuerzo de flexión (en unidades de MPa) ejercido por la máquina Schenck sobre las probetas empleadas para dichos ensayos de fatiga.

$$S = \frac{6 \times P \times L_F}{w \times t^2}$$

La tabla a continuación resume los cálculos realizados para la calibración de la máquina para los ensayos de fatiga. Además en base a dichos resultados se decidió realizar los ensayos a 2,5 – 3 – 3,5 y 4 vueltas del tornillo de esta máquina, para no exceder el límite de fluencia del acero ASTM A36, el cual se supera con 5 vueltas a dicho tornillo.

No. vueltas tornillo	Promedio de la variación de voltaje [mV]	Peso equivalente según ecuación 2.8 [kg]	Esfuerzo ejercido por la máquina de fatiga (MPa)	% del Esfuerzo de cedencia del acero ASTM A36 (250MPa) ejercido por la máquina
<b>0,5</b>	<b>1,07</b>	4,10	33,91	13,55%
<b>1,0</b>	<b>1,57</b>	6,03	49,81	19,90%
<b>1,5</b>	<b>1,67</b>	6,41	52,99	21,17%
<b>2,0</b>	<b>2,23</b>	8,59	71,01	28,37%
<b>2,5</b>	<b>3,30</b>	12,69	104,92	41,92%
<b>3,0</b>	<b>4,20</b>	16,15	133,54	53,36%
<b>3,5</b>	<b>4,90</b>	18,85	155,80	62,25%
<b>4,0</b>	<b>6,03</b>	23,21	191,83	76,65%
<b>4,5</b>	<b>7,43</b>	28,59	236,34	94,43%
<b>5,0</b>	<b>9,03</b>	34,74	287,22	114,76%
<b>5,5</b>	<b>10,97</b>	42,18	348,69	139,32%
<b>6,0</b>	<b>12,87</b>	49,49	409,10	163,45%