



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUÍMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN METALURGIA Y  
MATERIALES**

**“EFECTO DEL RELEVADO DE ESFUERZOS SOBRE LA  
TENACIDAD, DUREZA Y MICROESTRUCTURA EN LA  
ZONA DE SOLDADURA DEPOSITADA POR EL PROCESO  
GMAW EN UN ACERO ESTRUCTURAL”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN  
INGENIERIA METALURGICA**

**PRESENTA**

**ARLETHE LEON ESPINOZA**

**DIRECTORES DE TESIS**

**DR. JOSE ANTONIO ROMERO SERRANO**

**DR. BENJAMIN VARGAS ARISTA**



**MEXICO D.F.**

**DICIEMBRE 2012**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F., siendo las 12:00 horas del día 6 del mes de Diciembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIQIE para examinar la tesis titulada:

"EFECTO DEL RELEVADO DE ESFUERZOS SOBRE LA TENACIDAD, DUREZA Y MICROESTRUCTURA EN LA ZONA DE SOLDADURA DEPOSITADA POR EL PROCESO GMAW EN UN ACERO ESTRUCTURAL"

Presentada por el alumno:

LEÓN

Apellido paterno

ESPINOZA

Apellido materno

ARLETHE

Nombre(s)

Con registro: 

B	1	0	1	6	7	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

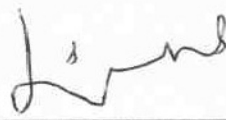
Directores de tesis

  
DR. JOSÉ ANTONIO ROMERO SERRANO



  
DR. BENJAMÍN VARGAS ARISTA

  
DR. ALEJANDRO CRUZ RAMÍREZ


  
DR. FELIPE HERNÁNDEZ SANTIAGO

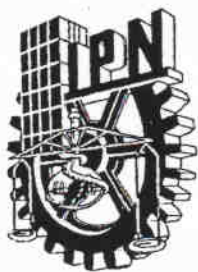
  
DR. HÉCTOR JAVIER DORANTES ROSALES



  
DR. CARLOS GÓMEZ YÁÑEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
DR. ROGELIO SOTELO BOYÁS



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA SESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de         México D. F.         el día   7   del mes   de diciembre         del año   2012  , el (la) que suscribe Ing. Arlethe León Espinoza alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica con número de registro B101671, adscrito a Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. J. Antonio Romero Serrano y cede los derechos del trabajo intitulado “ EFFECTO DEL RELEVADO DE ESFUERZOS SOBRE LA TENACIDAD, DUREZA Y MICROESTRUCTURA EN LA ZONA DE SOLDADURA DEPOSITADA POR EL PROCESO GMAW EN UN ACERO ESTRUCTURAL ”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [romeroipn@hotmail.com](mailto:romeroipn@hotmail.com) , [krazydeny@hotmail.com](mailto:krazydeny@hotmail.com) . Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Arlethe León Espinoza

Nombre y firma

## CONTENIDO

<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ii</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>I. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>JUSTIFICACION.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>3</b>
<b>II. ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
<b>Descripción del proceso de soldadura MIG/MAG.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Tratamientos Térmicos del Acero .....</b>	<b>9</b>
2.4.1 Tipos de Tratamientos Térmicos .....	9
2.4.2 Efecto de los elementos aleados .....	10
2.4.3 Hornos para Tratamientos Térmicos.....	11
<b>2.5 Ensayo de Dureza.....</b>	<b>12</b>
<b>2.6 Ensayo de Impacto (Charpy).....</b>	<b>12</b>
2.6.1 Equipo para pruebas de Impacto con probetas Entalladas .....	13
2.6.2 Probetas para la prueba de Impacto .....	14
2.6.3 Factores que afectan los resultados de una prueba de Impacto .....	14
<b>2.7 Trabajos Previos .....</b>	<b>16</b>
<b>III. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Equipo y material empleado.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Equipos y material periféricos: .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Diseño experimental.....</b>	<b>22</b>
3.3.1 Aplicación del proceso de soldadura. ....	22
3.3.2 Maquinado (corte, fresado y rectificado).....	22
3.3.3 Análisis químico .....	23
3.3.4 Metalografía.....	23
3.3.5 Tratamiento de Relevado de Esfuerzos.....	23
3.3.6 Mallado de Microdurezas .....	24
3.3.7 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido.....	24
3.3.8 Ensayo de Impacto.....	24
3.3.9 Curvas de Transición Dúctil-Frágil .....	26
<b>IV. RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Unión de placas .....</b>	<b>27</b>

<b>4.2 Análisis Químico .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Identificación de las Diferentes Zonas .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4 Ensayo de Durezas .....</b>	<b>28</b>
4.4.1 Resultados de dureza de la probeta A .....	33
4.4.2 Resultados de dureza de la probeta B .....	34
4.4.3 Calculo del tamaño de grano .....	35
<b>4.5 Ensayo de impacto .....</b>	<b>36</b>
4.5.1 Resultados de probeta A .....	36
4.5.2 Resultados de probeta B .....	38
<b>4.6 Curvas de transición .....</b>	<b>42</b>
4.6.1 Curvas de transición y evolución microestructural en diferentes zonas microestructurales de la probeta A .....	43
4.6.2 Curvas de transición y evolución microestructural en diferentes zonas microestructurales de la probeta B.....	49
<b>4.7 Microanálisis.....</b>	<b>55</b>
<b>4.7 Análisis con difracción de rayos x.....</b>	<b>58</b>
<b>5. Análisis de Resultados.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1 Microdureza probeta A .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2 Microdureza probeta B .....</b>	<b>60</b>
<b>5.3 Energía de impacto probeta A.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4 Energía de impacto probeta B .....</b>	<b>62</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>62</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1 Aplicaciones industriales a) Camiones utilizados por la industria minera</b>	
<b>b) Eje diferencial de un camión de carga .....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2 Fotografía de dos materiales metálicos soldados.....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3 Clasificación de los procesos de soldadura [13] .....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 4. Elementos que intervienen en el proceso de soldadura MAG. ....</b>	<b>8</b>

<b>Figura 5. Diagrama de secuencia experimental .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 6 Maquina de soldar marca Miller modelo 23 para proceso GMAW .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 7 Horno de tubo marca Lindberg-Blue M .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 8 Microscopio Electrónico de Barrido Marca Jeol 6900.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 9 Microdurometro marca -Tech Microhadness Tester FM .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 10 Equipo para ensayo de impacto OTTO WOLPERT-WERKE G•m•b•H Germany .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 11 Termómetro digital marca Fluke .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 12 Depósito de cordones con diferentes condiciones como se indico en la tabla 2 probeta A (izquierda) y probeta B (derecha).....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 13. Identificación de las zonas que se presentan en soldadura.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 14 Mallado de micrografías en cupon C3 de probeta A como se recibió. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 15 Mallado de micrografía en cupon L3 de probeta A con tratamiento térmico de Relevado de esfuerzos a 450°C.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 16 Mallado de micrografías en cupon X3 de probeta B como se recibió. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 17 Indentaciones en cupones de probeta A a diferentes temperaturas de tratamiento de relevado de esfuerzos: a) condiciones iniciales, b) 350°C, c) 450°C y d) 550°C.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 18 Indentaciones en cupones de probeta B a diferentes temperaturas de tratamiento de relevado de esfuerzos a) condiciones iniciales, b) 350°C, c) 450°C y d) 550°C. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 19 Grafica de durezas vs temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de la probeta A. ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 20 Gráfica de durezas vs temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos de la probeta B .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 21 Gráfica de impacto vs temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de los cupones de la probeta A en diferentes zonas de la soldadura (ZAC, ZE y ZF). ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 22 Grafica de impacto vs temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de los cupones de la probeta A en diferentes zonas de la soldadura (ZAC, ZE y ZF). ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 23 Fractografía de probeta A1 en condiciones iniciales barrido a sobre la superficie.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 24 Variación del efecto térmico a diferentes tiempos y temperaturas .....</b>	<b>42</b>

<b>Figura 25 Curva de Transición Dúctil-frágil en la ZAC de probeta A.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 26 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZAC de la probeta A.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 27 Curva de transición dúctil-frágil en la zona de enlace de probeta A.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 28 Curva de Transición dúctil-frágil para la zona de fusión de Probeta A.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 29 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZE de la probeta A.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 30 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZF de la probeta A.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 31 Curva de Transición para ZAC de Probeta B.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 32 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZAC de Probeta B.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 33 Curva de ttransición dúctil-frágil para ZE de Probeta B.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 34 Curva de transición dúctil-frágil para ZF de Probeta B.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 35 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZE de Probeta B.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 36 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil- frágil en ZF de Probeta B.....</b>	<b>54</b>

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Composición química nominal del metal base A633 y metal de aporte ER 70 S-6.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Condiciones de depósito de placa A y B.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3 Identificación de probetas para el ensayo de impacto .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4 Identificación de los cupones para la construcción de curvas de transición en diferentes zonas presentes en la soldadura.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5 Análisis químico de las probetas soldadas.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 6 Identificación de Zonas presentes en soldadura.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7 Promedio de microdurezas de las diferentes zonas presentes en soldadura, de los cupones de la probeta A con las diferentes temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos. ....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 8 Promedio de microdurezas de las diferentes zonas presentes en soldadura (MB, ZAC, ZE y ZF) a diferentes temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 9 Tamaño de grano de probetas A y B en diferentes zonas a diferentes temperatura de tratamiento de relevado de esfuerzos.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 10 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A a condiciones iniciales. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 11 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con tratamiento de relevado de esfuerzos a 350°C. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 12 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con tratamiento de relevado de esfuerzos a 450°C.....</i>	<i>37</i>



<i>Tabla 13 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con relevado de esfuerzos a 550°C.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 14 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B como se recibió. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 15 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 350°C.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 16 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 450°C. ....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 17 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 550°C.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 18 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona afectada por el calor (ZAC) de las probetas A y B.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 19 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona de enlace de las probetas A y B .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 20 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona de fusión de las probetas A y B. ....</i>	<i>43</i>

## **RESUMEN**

El proceso de soldadura GMAW es uno de los más utilizados en la industria metalmeccánica debido a los múltiples beneficios que brinda, en combinación con una gran variedad de aceros con los cuales se puede utilizar en este proceso. Es de suma importancia conocer las características y propiedades microestructurales de la soldadura para poder hacer una evaluación completa de las propiedades mecánicas.

Los tratamientos térmicos que se realizan a la pieza soldada ayudan a modificar y por lo tanto a mejorar las características microestructurales que se afectan por el calor que se genera al momento de realizar el depósito de la soldadura.

Las pruebas que se realizan en la mayoría de las industrias no son suficientes para prever el funcionamiento de las piezas debido a que solo se enfocan en las características mecánicas y no en las características microestructurales. Por este motivo es necesario desarrollar una serie de estudios que ayuden a mejorar la caracterización de las piezas soldadas.

Este trabajo consiste en el análisis de dos placas de acero estructural unidas mediante el proceso de soldadura GMAW en las cuales se varió la velocidad de alimentación del microalambre. El estudio comprende ensayos de impacto y perfil de dureza en las diferentes zonas presentes en la soldadura (Zona Afectada por el Calor (ZAC), Zona de Enlace (ZE) y Zona de Fusión (ZF) para observar la evolución del tratamiento térmico de relevado de esfuerzos a diferentes temperaturas (350, 450 y 550°C). De igual manera se construye la curva de transición dúctil-frágil por medio de la prueba de impacto.

## **ABSTRACT**

The welding process GMAW is one of the most used in the metalmechanic industry because of the benefits it offeres, in combination with a variety of steels which can be used in this process. It is very important to know the characteristics and microstructural properties of the welding to make a complete assessment of the mechanical properties.

The heat treatments are performed to modify the welded piece and improve the microstructural characteristics that are affected by the heat generated at the time of deposition welding.

The test performed in most industries are not sufficient to predict the performance of parts, it is focused only on the mechanical properties and microstructural characteristics. It is therefore necessary to develop a series of studies to improve the characteristics of weldments.

This work involves the analysis of two structural steel plates joined by GMAW welding process whit two different microwire feed rates (180mm/s and 190mm/s). The study includes impact test and hardness profile in the different zones present in the weld (heat affected zone (HAZ), liaison area (ZE) and fusion zone (FTZ) to observe the evolution of heat treatment stress relieving at different temperatures (350, 450 and 550°C) Similary the curve ductile-brittle transition is constructed through impact test.

## **I. INTRODUCCION**

El tratamiento de relevado de esfuerzos es ampliamente utilizado debido a que es de gran ayuda para la industria metal-mecánica, en lo que respecta a la disminución de esfuerzos residuales ya que estos son generados al momento de golpear el material de metal, después de un temple o soldar placas metálicas con cualquier proceso de soldadura.

Las piezas soldadas son muy importantes debido a su gran utilidad en infinidad de componentes como estructuras de camiones de alta capacidad minera como los mostrados en la figura 1 (a) o los ejes para este tipo de camiones como los que se muestran en la figura 1 (b), entre muchos otros. En México se encuentra una empresa la cual emplea el proceso de soldadura GMAW para la fabricación de dichas estructuras de los camiones y demás componentes. Su gran uso se debe a que cuentan con excelentes propiedades mecánicas; que sin embargo, dichas propiedades se ven afectadas al momento de unir las piezas con cualquier proceso de soldadura, ya que se genera una gran cantidad de esfuerzos residuales llamados macro y micro tensiones. Es importante la calidad de los materiales, para lo cual deben de realizarse estudios que ayuden a mantener y mejorar las propiedades necesarias para un buen desarrollo de dichos materiales.

Estas fallas se deben a que al momento de realizar el depósito de la soldadura las estructuras se afectan por el calor de entrada, lo cual provoca esfuerzos residuales haciendo que las piezas sean muy frágiles debido a la generación de grietas.

Las pruebas que se realizan en la mayoría de las industrias no son suficientes para prever el funcionamiento de las piezas debido a que solo se enfocan en las características mecánicas y no en las características microestructurales. Por este motivo es necesario desarrollar una serie de estudios que ayuden a mejorar la caracterización de las piezas soldadas.

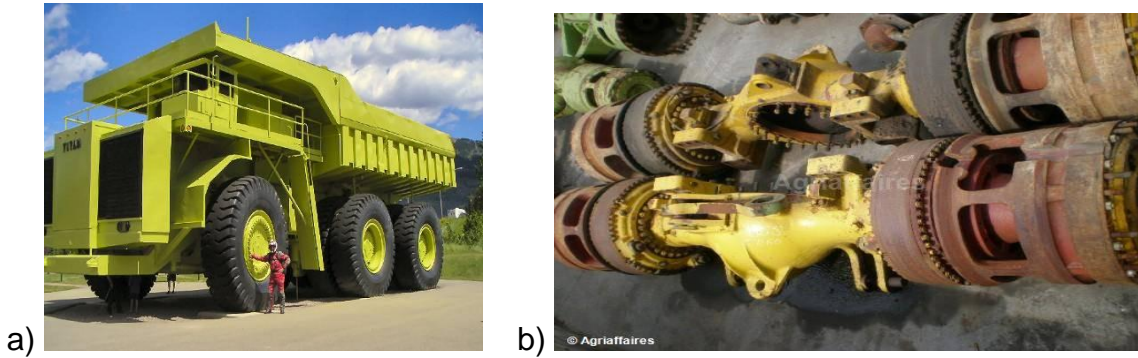


Figura 1 Aplicaciones industriales a) Camiones utilizados por la industria minera b) Eje diferencial de un camión de carga

### **JUSTIFICACION**

Por lo tanto, el presente estudio pretende aplicar el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos el cual permite disminuir considerablemente los esfuerzos residuales en piezas soldadas. Adicionalmente, se realizará un seguimiento de la microdureza vickers y su relación con la evolución microestructural en las zonas presentes en soldadura, Zona Afectada por el Calor (ZAC), Zona de Enlace (ZE) y Zona de Fusión (ZF). Se determinará el comportamiento dúctil-frágil del material mediante ensayos de impacto a diferentes temperaturas.

De esta forma se realizará la caracterización de placas soldadas empleando técnicas destructivas. El proceso de Soldadura por Arco con Gas de Protección con Electrodo Consumible (Gas Metal Arc Welding GMAW) es ampliamente utilizado en la industria metal mecánica por lo cual es el proceso de interés de este trabajo.

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el tratamiento térmico de Relevado de Esfuerzos a diferentes temperaturas, de placas de acero estructural que fueron unidas mediante el proceso de soldadura “Soldadura Eléctrica al Arco con Electrodo Consumible y Gas de Protección” (GMAW) bajo diferentes velocidades de alimentación del microalambre y efectuar su caracterización mecánica y

microestructural. Construcción de las curvas de transición Dúctil-Frágil en las zonas presentes en la soldadura.

#### OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ☆ Realizar el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos y determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas de la soldadura.
- ☆ Efectuar el análisis de las propiedades mecánicas en base a la técnica de microdureza y prueba de impacto.
- ☆ Caracterizar las tres zonas microestructurales (zona afectada por el calor, zona de enlace y zona de fusión) presentes en la soldadura.
- ☆ Construir de las curvas de transición dúctil-frágil para las tres zonas presentes en la soldadura (zona afectada por el calor, zona de enlace y zona de fusión) y análisis fractográfico.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Aspectos generales de la soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, como los mostrados en la figura 2. Estos materiales son generalmente metales o termoplásticos. La unión se logra a través de la fusión en la cual las piezas que serán soldadas se funden parcialmente entre ellas o con un material de aporte (metal o plástico). Existen procesos de soldadura blanda (en inglés soldering) y de soldadura fuerte (en inglés brazing), que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo.

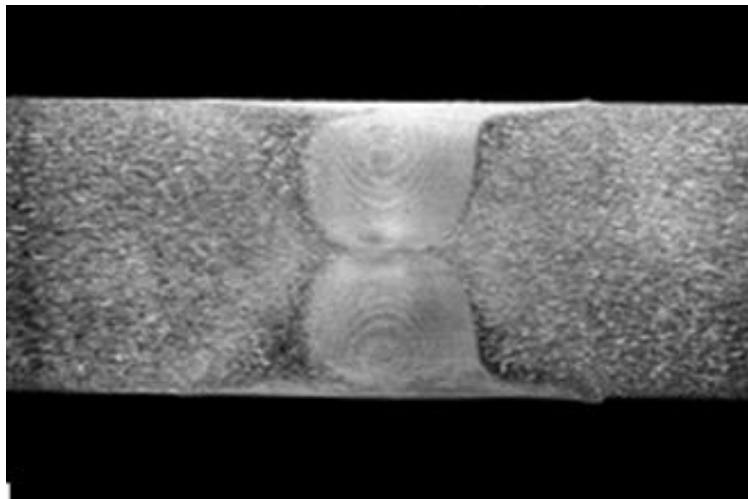


Figura 2 Fotografía de dos materiales metálicos soldados.

Existen muchas fuentes de energía diferentes que pueden ser utilizadas para el proceso de soldadura, como la flama de gas, el arco eléctrico, un láser, un haz de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas metálicas generalmente proviene de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente.

El uso de la soldadura ha ido en aumento debido a una gran diversidad de aplicaciones en ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, debajo del agua y en el espacio. Sin embargo,

la soldadura sigue siendo peligrosa y se deben tomar precauciones para evitar quemaduras, descarga eléctrica, humos venenosos y la sobre exposición a la luz ultravioleta entre otros.

A finales del siglo XIX, el único proceso de soldadura era la soldadura de forja, que consiste en unir metales calentándolos y golpeándolos, este proceso lo utilizaron los herreros durante siglos. La tecnología de la soldadura tuvo un crecimiento notable a principio del siglo XX, mientras que la Primera y Segunda Guerra Mundial promovieron la demanda de métodos de unión confiables y baratos. Posteriormente se desarrollaron varias técnicas modernas de soldadura, incluyendo métodos manuales, como la soldadura manual de metal por arco (ahora uno de los más populares métodos de soldadura) así como procesos semiautomáticos y automáticos tales como Soldadura GMAW, soldadura de arco sumergido, soldadura de arco con núcleo de fundente etc. Los procesos de soldadura se clasifican en función del material y de las variables que se utilicen en el proceso, como lo muestra el diagrama de la figura 3.

Actualmente la soldadura robotizada está llegando a ser más común en las instalaciones industriales. Los investigadores continúan desarrollando nuevos métodos de soldadura y ganando mayor comprensión de la calidad y de las propiedades de la soldadura.

Se dice que en realidad el proceso de soldadura es un **“sistema”** porque intervienen los elementos propios de éste, es decir, las 5 M: mano de obra, materiales, máquinas, medio ambiente y medios escritos (procedimientos). La unión satisfactoria implica que debe pasar las pruebas mecánicas (tensión y doblez). Las técnicas son los diferentes procesos (SMAW, SAW, GTAW, etc.) utilizados para la unión más conveniente y favorable de dos materiales, lo que hace que sea lo más económica, sin dejar de lado la seguridad. [11]



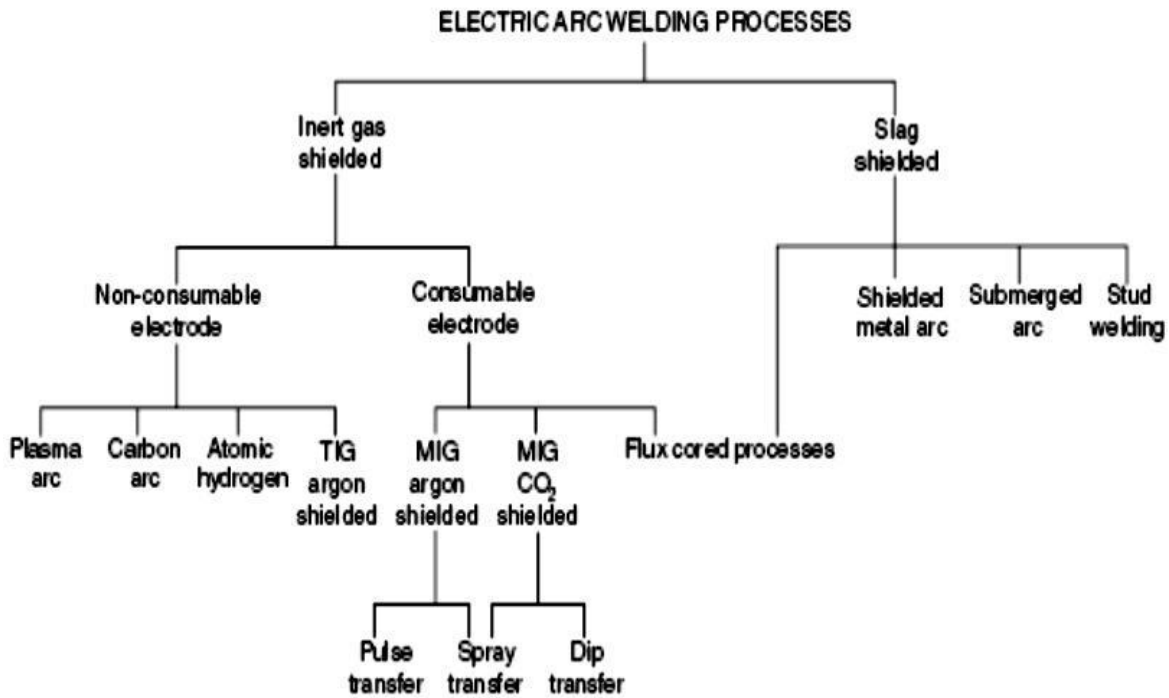


Figura 3 Clasificación de los procesos de soldadura [13]

## 2.2 Metalurgia de la soldadura

Los metales que son unidos mediante los procesos de soldadura presentan muchas variaciones en sus propiedades debido al efecto que produce el calor. Estas variaciones en sus propiedades se ven reflejadas principalmente en su microestructura y esto a su vez en la estructura cristalina.

Todos los metales y aleaciones tienen una estructura cristalina definida, por ejemplo el hierro presenta a temperatura ambiente una estructura cúbica centrada en el cuerpo, el cobre tiene una estructura cúbica centrada en las caras y lo mismo sucede con todos los metales. Estas estructuras se determinan por el método de Rayos X.

Las propiedades de los metales dependen de la forma de los cristales, del número de átomos que forma cada estructura cristalina, la distancia entre los átomos de la estructura cristalina y de la interrelación de estas estructuras. Otros factores importantes de los que dependen las propiedades son las características del proceso de solidificación, o los fenómenos asociados con la transformación de los metales del estado líquido al estado sólido. Esto puede verse

de manera gráfica en un diagrama de fases o de equilibrio. Estos diagramas son una representación clara de la temperatura sobre la cual son estables las fases de un metal.

La palabra *equilibrio* se emplea para describir que cualquier cambio que ocurra en un metal puro o en una aleación será reversible. En estos diagramas puede predecirse algunas características sobre la constitución y microestructura de las aleaciones sólidas así como también sobre las fases que puedan existir. La fase se refiere al estado de un metal puro o de una aleación, tal como un metal en estado líquido, gaseoso o un metal en una de sus estructuras cristalinas.

Los aspectos metalúrgicos que se presentan en la zona de la soldadura durante el enfriamiento son diferentes de los que se observan durante el enfriamiento de una pieza fundida.

En la soldadura, el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos. Lo cual provoca que las transformaciones de fase son diferentes a las que se esperaría con enfriamientos lentos. Al avanzar con el depósito del metal la temperatura del depósito desciende, debido a la transferencia del calor hacia el metal base y a la radiación hacia la atmósfera y el metal se solidifica.

Los granos aparecen primero en la línea de fusión, en donde la temperatura es relativamente baja y crecen a diferente velocidad, porque al aumentar de tamaño y al hacer presión los cristales unos contra otros. Los granos en crecimiento pueden empujar las inclusiones no metálicas hacia afuera. Esta es la razón por la que la soldadura se aplica hacia arriba, la escoria aparece sobre la superficie de la soldadura y no sobre la raíz del cordón. [11]

## **2.3 PROCESO DE SOLDADURA GMAW**

### **Descripción del proceso de soldadura MIG/MAG**

La Soldadura por Arco con Gas de Protección con Electrodo Consumible es un proceso en el que el arco se produce entre un alambre o electrodo de hilo continuo y el material que se va a soldar, esto con una protección de la atmósfera con un gas inerte (para el proceso MIG se utiliza argón o helio) o por un gas activo (para el proceso MAG se utiliza CO<sub>2</sub>) [14]. La

figura 4 describe los elementos importantes que intervienen en el proceso de soldadura MAG.

El proceso puede ser:

**Semiautomático:** La tensión de arco, la velocidad de alimentación del alambre, la intensidad de soldadura y el caudal de gas se regulan previamente. El avance de la antorcha de soldadura se realiza manualmente.

**Automático:** Todos los parámetros, incluso la velocidad de soldadura, se regulan previamente, y su aplicación en el proceso es de forma automática.

**Robotizado:** Todos los parámetros de soldadura, así como las coordenadas de localización de la junta a soldar, se programan mediante una unidad específica para este fin.

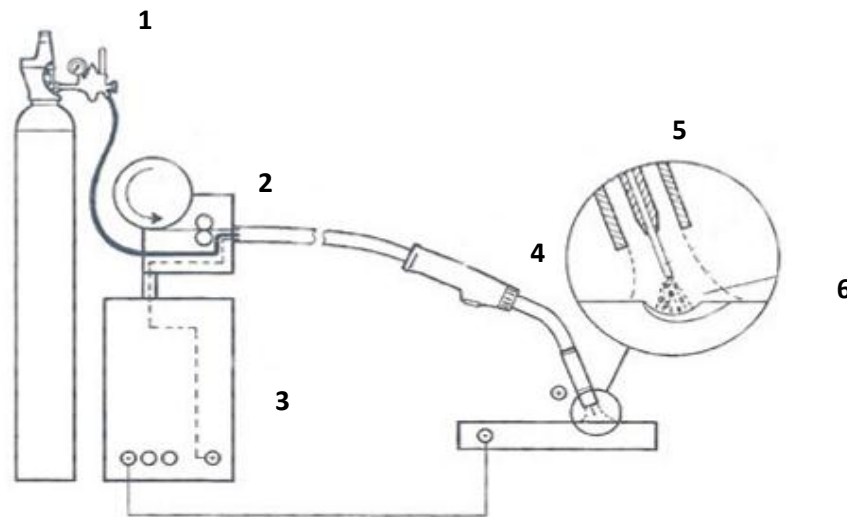


Figura 4. Elementos que intervienen en el proceso de soldadura MAG.

1. Gas de protección. Depende del proceso, si es MIG se utiliza Argón o Helio, si es MAG se utiliza  $\text{CO}_2$ .
2. Rodillo, se encarga de girar para realizar la alimentación del alambre.
3. Máquina de soldadura para proceso MIG/MAG.
4. Antorcha por la que viajan el gas de protección, el alambre y la corriente.

5. Atmósfera de protección
6. Arco eléctrico [15]

### **Aplicaciones**

Se utiliza para soldar aceros de bajo y medio contenido de carbono, así como para soldar acero inoxidable, aluminio y otros metales no ferrosos.

### **Ventajas del Proceso**

Produce soldaduras de gran calidad en piezas automotriz, calderería y recipientes a presión o estructura metálica en general, construcción de buques y un gran número de otras aplicaciones, es un proceso continuo y relativamente rápido.

### **Desventajas del Proceso**

Por el uso de los gases de protección éste es un proceso relativamente caro.

#### *2.4 Tratamientos Térmicos del Acero*

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas deseadas. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las transformaciones de fase que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férreas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

##### 2.4.1 Tipos de Tratamientos Térmicos

- **Temple.** El temple tiene como objetivo endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior  $A_c$  (entre 900-950°C) y se enfría luego rápidamente en un medio como agua, aceite, etc.

- **Revenido.** Es un tratamiento habitual a las piezas que han sido previamente templadas. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada.
- **Recocido.** Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenización (800-925 °C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas. [21].
- **El relevado de esfuerzos.** Es un tratamiento que consiste en eliminar las tensiones o esfuerzos producidos durante el maquinado o aplicación de soldaduras, previo a su tratamiento definitivo, evitando con ello deformaciones o posibles consecuencias no deseables en sus piezas.

Siempre que las piezas se fabriquen a partir de métodos de maquinado en los que se retira mucho material, o en donde las piezas tienen geometrías complicadas, o muchos cambios de sección, es recomendable relevar los esfuerzos inducidos por estas operaciones. Además, también los procesos de soldadura en estructuras generan esfuerzos por lo que se recomienda su relevado de esfuerzos antes de darle su medida final. Si se relevan esfuerzos a una pieza terminada se corre el riesgo de deformación [22].

#### 2.4.2 Efecto de los elementos aleados

La presencia de muchos elementos aleados como cromo, níquel, molibdeno, tungsteno, etc., no se puede apreciar en un análisis microscópico, debido a que las estructuras perlíticas, bainíticas etc., son similares a los de los aceros al carbono que la de los aceros especiales. Sin embargo, después de tratamiento térmicos relativamente idénticos en los aceros aleados se obtienen estructuras diferentes a las de los aceros comunes con el mismo contenido de carbono, como resultado de la presencia de estos elementos aleantes.

Existe una diversidad de elementos que se pueden encontrar en los aceros presentes de diferentes maneras:

**1.- Disueltos en la ferrita.** Algunos elementos se disuelven en el hierro alfa o ferrita. Los elementos más destacados son el níquel, silicio, aluminio, manganeso, cobre, fósforo y cromo.

**2.- Combinados con el carbono.** Hay elementos que tienen la facilidad de formar con el carbono carburos simples o complejos, los cuales son partículas muy duras que provocan en los aceros un aumento en la resistencia al desgaste. Entre estos elementos se encuentra el cromo, molibdeno, manganeso, wolframio y vanadio.

**3.- Combinados con otros elementos.** Algunos elementos forman inclusiones no metálicas. El Si forma silicatos o silico-aluminatos de calcio o de hierro, manganeso y cromo. El aluminio forma alúmina y silico-aluminatos. El titanio puede presentarse en forma de óxido de titanio, nitruros y cianonitruros de titanio. El manganeso forma silicatos y sulfuros.

**4.-Dispersos.** Formando cuerpos extraños, el Cu cuando su porcentaje es mayor de 0.75% y el Pb.

### **2.4.3 Hornos para Tratamientos Térmicos**

Los tratamientos térmicos se pueden realizar en una amplia gama de hornos, estufas e incubadores. Las temperaturas máximas llegan hasta 1800°C [18].

Es difícil definir todas las utilidades para la gran variedad de modelos de hornos, pero cabe destacar las aplicaciones más importantes:

- ☆ Tratamiento térmico – resistencia, temple y recocido.
- ☆ Procesos de envejecimiento
- ☆ Pruebas de ignición
- ☆ Cocción de material cerámico
- ☆ Fusión de elementos no ferrosos

La ventilación de la cámara permite la extracción de humos de la cámara generados durante el proceso. Tiene control por semiconductores por lo que el control es fiable y uniforme por el cambio a voltaje cero y el rápido ciclo de inversión debido al uso de semiconductores.

## **2.5 Ensayo de Dureza**

La dureza es función de otras propiedades mecánicas del material sobre todo de su límite elástico y en menor grado de su tendencia al endurecimiento por trabajo y del módulo de elasticidad. Si se tiene un material de composición dada y se conoce su historial, se puede relacionar su límite elástico (para fines prácticos, la resistencia a la fluencia), con la resistencia a la tensión, su ductilidad y su tenacidad; por tanto, las pruebas de dureza proporciona datos que pueden relacionarse con muchas propiedades mecánicas.

Puesto que las pruebas de dureza se pueden llevar a cabo fácil y rápidamente, se usan en forma amplia para controlar procesos, así como un control de calidad para materiales y componentes. Las pruebas de dureza comunes se basan en la aplicación lenta de una carga constante a un penetrador o indentador que se abre paso sobre la superficie lisa de la muestra. Una vez que se quita la carga, se mide el área o la profundidad de la penetración, lo cual indica la resistencia a la carga.

## **2.6 Ensayo de Impacto (Charpy)**

El acero dúctil puede tener un comportamiento frágil bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial, se puso gran atención a la fractura frágil de barcos contruidos a base de soldadura ya que algunos de estos barcos se partieron completamente en dos partes, mientras que otros solo mostraban fracturas en algunas regiones. La mayoría de las fallas ocurrieron durante los meses de invierno; sin embargo, cabe mencionar que las fallas por fractura frágil también se presentan en tanques, recipientes a presión, tuberías, puentes, etc.

Hay tres factores básicos que contribuyen a la fractura frágil por clivaje:

- a) Un estado de esfuerzos triaxial
- b) Baja temperatura
- c) Una velocidad de deformación alta o una alta velocidad de aplicación de la carga

No es necesario que estén presentes estos tres factores a la vez para que se produzca una fractura frágil. Por ejemplo, un estado de esfuerzos triaxial, como el que se encuentra en una entalla y baja temperatura son los responsables de la mayoría de las fallas en servicios por fractura frágil. No obstante, debido a que estos efectos se acentúan a una alta velocidad de aplicación de carga, se hace uso de las pruebas de impacto para determinar la susceptibilidad de los metales a la fractura frágil. Aceros que poseen propiedades idénticas cuando se someten a ensayos de tensión o torsión, los cuales involucran velocidades bajas de deformación, pueden mostrar grandes diferencias en su tendencia a la fractura frágil cuando son sometidos a pruebas de impacto con probetas entalladas.

#### 2.6.1 Equipo para pruebas de Impacto con probetas Entalladas

Por lo general, se fabrican máquinas para probar tanto vigas voladizas como simplemente apoyadas e incluso algunas pueden usarse para probetas de tensión. Básicamente, la máquina consiste en un péndulo de oscilación libre, montado en un cojinete, un marco rígido y una prensa de tornillo o yunque para sostener la probeta. La energía del impacto se hace variar cambiando la masa del péndulo, modificando la altura de la caída o mediante ambos procedimientos. La energía que absorbe la probeta es la diferencia entre la energía que queda después del impacto y la de entrada en el momento de producirse el impacto.

Puesto que las vibraciones pueden absorber energía, el péndulo y el sujetador de la probeta se diseñan de tal forma, que el péndulo golpee a la probeta en su centro de percusión. El marco y el yunque deben ser también muy rígidos para evitar que absorban energía por



deformación. Después de que la muestra se rompe, el péndulo impulsa a una aguja indicadora de poco peso a lo largo de una escala calibrada para indicar la lectura en ft-lb u otras unidades equivalentes de energía absorbida por la muestra. La magnitud del trabajo de deformación y destrucción se determina por la diferencia de la energía potencial del péndulo en el momento inicial

#### 2.6.2 Probetas para la prueba de Impacto

Las probetas para la prueba Charpy contienen una ranura que se calibra y que coincide con un hueco (en su base), cuyo diámetro es ligeramente mayor al ancho de la ranura. La entalladura estándar en forma de V es muy usada, debido a que se hace con facilidad utilizando una fresa especial. La profundidad de las entalladuras debe ser mayor de 2.0 mm, si lo que se quiere es detectar diferencias de tenacidad en materiales muy dúctiles.

La diferencia entre las pruebas de Charpy y de Izod radica en la forma en que la probeta se sujeta y se carga. La probeta Izod se carga como una viga voladiza, por ello su longitud es algo mayor que la de la probeta de Charpy y la muesca es excéntrica para facilitar su sujeción en el tornillo del banco del aparato. Ambas probetas se colocan en tal forma que produzcan esfuerzos en la raíz de la entalladura. La probeta de Izod se sujeta mediante un tornillo de banco, mientras que la de Charpy se coloca simplemente sobre sus soportes.

#### 2.6.3 Factores que afectan los resultados de una prueba de Impacto

Los factores que influyen en una prueba de impacto con probeta entallada son:

**a) El tamaño y la forma de la muestra**

Para la mayoría de los materiales metálicos usados en ingeniería, se han establecido normas definidas respecto al tamaño y la forma de la muestra; así como la profundidad y lo pronunciado de la entalladura. Los materiales plásticos tienen una tenacidad tan baja, por lo

que es necesario usar muestras muy anchas. La tenacidad de los plásticos se expresa en kg-cm/cm de anchura de muestra.

**b) La forma y lo pronunciado de la muesca**

La forma y lo pronunciado de la entalladura influyen en los resultados. Las probetas de Charpy estándar de acero tienen muescas de 5 mm y con radio de 0.07. Mientras menos profunda y aguda sea la muesca, mayor será la diferencia entre los resultados obtenidos con materiales tenaces y los de poca tenacidad. No obstante, si la muesca tiene muy poca profundidad, la probeta no se romperá, por lo que casi siempre se prefiere la profundidad de 2 mm.

Puesto que es difícil producir en una máquina una muestra perfectamente aguda se ha adoptado generalmente un radio de 0.25 mm para la mayoría de las pruebas, el efecto de la muesca es concentrar esfuerzos triaxiales que restrinjan el flujo plástico y aumenten el límite elástico del material. Cuando se produce una hendidura en la raíz de la entalla, el esfuerzo se intensifica enormemente y la hendidura progresa con rapidez a través de la sección transversal. Sin la muesca, las probetas de muchos materiales sencillamente se doblarían sin tener fractura y no podría detectarse su capacidad total para absorber energía.

La prueba de impacto con probetas entalladas constituye una forma apropiada de estudiar esta respuesta, que se conoce como sensibilidad de entalladura de los materiales. La temperatura tiene un efecto muy importante en los resultados de las pruebas de impacto de probeta entallada en algunas aleaciones, sobre todo en los materiales de composición ferrosa. La resistencia al impacto de una probeta de acero cúbica centrada en el cuerpo disminuye casi siempre en forma brusca. [20]

## 2.7 Trabajos Previos

A. Martínez y colaboradores estudiaron la Influencia de la técnica de soldadura multipasada y de los tratamientos de precalentamiento y post-soldadura en comportamiento de uniones GMAW de un acero microaleado HARDOX 400(.)

Analizaron el efecto del precalentamiento, soldeo multipasada y postcalentamiento en uniones GMAW del acero Hardox 400. Realizaron análisis macro y microestructurales de las zonas características de la unión y el comportamiento mecánico de la misma en función de las variables indicadas. Los resultados indican el efecto beneficioso del precalentamiento debido al alejamiento de la zona de menor dureza en la ZAT respecto al borde del cordón. También demuestra que el precalentamiento aumenta el índice de heterogeneidad en la unión, lo que mejora su comportamiento a la fatiga. El tratamiento térmico postsoldeo también presenta un efecto beneficioso ya que refuerza ligeramente la zona de menor dureza ZAT y favorece la plasticidad en la rotura. El efecto beneficioso del tratamiento del tratamiento postsoldeo es mayor en uniones soldadas con precalentamiento. La soldadura multipasada no presenta ninguna mejora destacable frente al soldeo en pasada única.

Analizaron el comportamiento mecánico de uniones de chapa de 6mm de espesor de acero HARDOX 400 soldadas mediante el proceso de soldadura GMAW bajo condiciones industriales. Este acero es utilizado para aplicaciones en las que se requiere buenas características estructurales, conformabilidad y alta resistencia al desgaste.

Contreras y colaboradores realizaron El Ensayo Miniatura de Punzonado (EMP) El cual consiste en el punzonado hasta rotura de una probeta plana de pequeñas dimensiones (10x10 mm y 0.5 mm de espesor), incrustada en todo su contorno, mediante el desplazamiento de un punzón de cabeza semiesférica de 2.5 mm de diámetro. En este trabajo se realizó el ensayo sobre muestras de acero estructural desde temperatura ambiente hasta temperaturas criogénicas con objeto de obtener la temperatura de transición dúctil-frágil del acero, demostrándose que la temperatura de transición de este ensayo es muy inferior a la calculada utilizando ensayos Charpy. Asimismo, se evaluó la variación de los parámetros mecánicos fundamentales que se deducen del ensayo EMP del acero con el

descenso de la temperatura y, con la ayuda del microscopio electrónico de barrido, se han determinado los micromecanismos de fractura operativos.

Monsalve y colaboradores estudiaron el efecto del amperaje en la microestructura, dureza y resistencia al desgaste abrasivo de dos aleaciones para recubrimientos duros con base hierro, alto Cr y C. se aplicaron dos y tres capas de cada electrodo mediante el proceso SMAW sobre platinas de acero ASTM A 36. La resistencia al desgaste abrasivo se calculó midiendo la masa perdida después de un ensayo de acuerdo al estándar internacional ASTM G65. La microestructura fue analizada usando microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM) y el porcentaje de dilución fue calculado en forma gráfica para un cordón de soldadura. Los resultados muestran que al disminuir la entrada de calor se reduce el porcentaje de dilución y se promueve la formación de carburos primarios. La más alta resistencia al desgaste abrasivo se obtiene cuando la microestructura estuvo compuesta de carburos primarios y una matriz eutéctica.

Torres y colaboradores estudiaron cómo mediante el empleo de la difracción de Rayos X se determina el valor de las tensiones de primer género, tanto normales como tangenciales, de cordones de soldadura de acero austenítico al manganeso (Hadfield), así como la influencia que ejercían en éstas las concentraciones de cromo. También como el modelo estadístico-matemático que relaciona la influencia de la variación de la composición química del cromo con las tensiones de primer género de la red cristalina del metal deformado plásticamente.

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental consiste de las etapas mostradas en la figura 5, donde se indica que se parte de 2 piezas soldadas (A y B) a las que posteriormente se les realiza el maquinado corte y rectificado para dar las dimensiones adecuadas para la prueba de impacto de acuerdo a la norma ASTM E 32, enseguida se pasa a la etapa de metalografía para la identificación de las diferentes zonas a estudiar (Zona Afectada por el Calor, zona de Enlace y Zona de Fusión). Una vez identificadas las zonas se selecciona una cantidad de probetas para realizar el tratamiento térmico de Relevado de Esfuerzos a diferentes temperaturas (350, 450 y 550° C). Otra parte de las probetas se analizarán sin tratamiento térmico. A las probetas se les realiza el ensayo de microdureza, ensayo de impacto y posteriormente se observan en el microscopio de barrido. Se toma otra parte de probetas que corresponden a las probetas A y B para la construcción de las curvas de transición de las diferentes zonas a estudiar y posteriormente se analizan en el Microscopio Electrónico de Barrido.

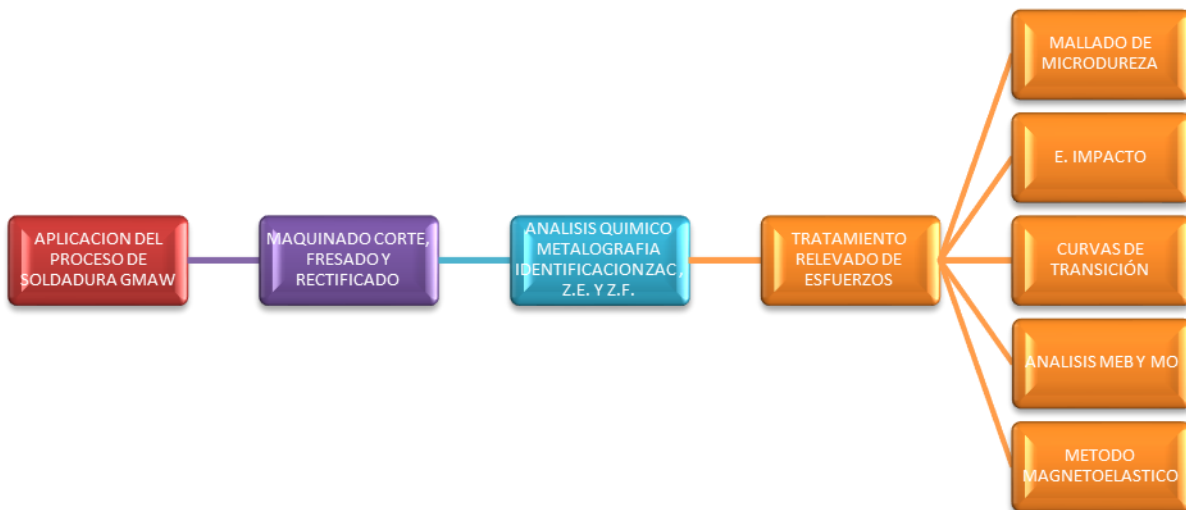


Figura 5. Diagrama de secuencia experimental

### 3.1 Equipo y material empleado

El material a emplear consiste en dos placas con un bisel a 45° cada una, unidas con ocho cordones. El metal de aporte que se utilizó fue el ER 70S-6 mediante el proceso de soldadura GMAW semiautomático con una máquina de soldadura marca Miller modelo 23 como se ilustra en la figura 6

Desarrolla el proceso:

- ❖ GMAW = Soldadura por arco con gas de protección con electrodo consumible. El cual se divide en dos subprocesos, dependiendo del gas de protección que se utilice.
- ❖ MIG= Metal Inert Gas: Utiliza Argón ó Helio como gas de protección.
- ❖ MAG= Metal Active Gas: Utiliza CO<sub>2</sub> como gas de protección.  
(proceso utilizado)
- ❖ Metal Base: Acero estructural ASTM A633. La tabla 1 muestra la composición química nominal.
- ❖ Metal de Aporte: ER70S-6. La tabla 1 muestra la composición química nominal.
- ❖ Horno de tubo marca Lindberg-Blue m (Figura 7)
- ❖ Microscopio Electrónico de Barrido Jeol 6300. (Figura 8)
- ❖ Microdurometro Future-Tech Microhardness Tester FM (Figura 9)
- ❖ Equipo para Ensayo de Impacto OTTO WOLPERT-WERKE G•m•b•H Germany (Figura 10)
- ❖ Termómetro digital marca Fluke (Figura 11)

Tabla 1 Composición química nominal del metal base A633 y metal de aporte ER 70 S-6

Elementos										
Material	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
A 633	0.20	0.70- 1.35	0.15- 0.50	0.035	0.04	0.25	0.25	0.08		0.35
ER 70S-6	0.06- 0.15	1.40- 1.85	0.80- 1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.50

### 3.2 Equipos y material periféricos:

- ❖ Cortadora Mecánica Tipo Cinta W.F. Wells and Sons, INC.
- ❖ Pulidora Struers
- ❖ Desbastadora Behuler
- ❖ Fresadora Mecánica
- ❖ Nitrogeno Líquido
- ❖ Dioxido de Carbono (CO2)
- ❖ Alcohol



Figura 7 Horno de tubo marca Lindberg-Blue M

Figura 6 Maquina de soldar marca Miller modelo 23 para proceso GMAW



Figura 8 Microscopio Electrónico de Barrido Marca Jeol 6900



Figura 9 Microdureómetro marca -Tech  
Microhardness Tester FM

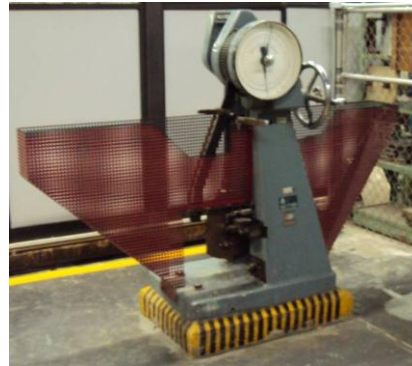


Figura 10 Equipo para ensayo de  
impacto OTTO WOLPERT-WERKE  
G•m•b•H Germany



Figura 11 Termómetro digital marca Fluke



### 3.3 Diseño experimental

#### 3.3.1 Aplicación del proceso de soldadura.

Se obtuvieron 2 piezas soldadas las cuales fueron depositadas a diferentes condiciones con el proceso de soldadura GMAW. La tabla 2. describe las condiciones del depósito para las probetas A y B.

Tabla 2 Condiciones de depósito de placa A y B

CONDICIONES DE DEPOSITO DE PROBETAS A y B										
PROBETA	Metal Base	Metal Aporte	Espesor	Posición	Diámetro	Gas protección	Flujo gas	Voltaje Arco	Vel. Alim ER	Amperaje
<b>A</b>	ASTM A-633	ER 70S-6	1/2"	1G	0.045	Ar 75% /CO2 25%	35	29	180mm/s	I=257.62
<b>B</b>	ASTM A-633	ER 70S-6	1/2"	1G	0.045	Ar 75% /CO2 25%	35	31	190mm/s	I=271.75

El proceso de soldadura consiste en la generación de calor, con el cual se pueda llegar al punto de fusión para poder unir los materiales. Este calor debe ser controlado, ya que si es insuficiente, no se logra la fusión que trae como consecuencia una mala unión entre los materiales. Al incrementar la velocidad de alimentación del alambre se genera más corriente la cual produce que el calor del depósito aumente.

#### 3.3.2 Maquinado (corte, fresado y rectificado)

En esta etapa se hace la selección de las zonas donde se realizará el corte y posteriormente el rectificado para dar las dimensiones para la prueba de impacto de acuerdo a la norma ASTM E23, como se indica en las figuras 13(a) y 13(b).

Figura No. 13(a) Diagrama de probeta para ensayo de impacto reducida 10x5, 13(b) diagrama para probeta de impacto 5x5 reducida

### 3.3.3 Análisis químico

El análisis químico se realizó en un espectrómetro de Rayos X con el fin de confirmar la composición química del metal de aporte y del metal base.

### 3.3.4 Metalografía

Se realizó con el fin de identificar las diferentes zonas presentes en la soldadura (ZAC, Zona de Enlace y Zona de Fusión) y posteriormente seleccionar la zona de entalla para las probetas del ensayo de impacto. Se prepararon 37 cupones de la probeta A y 37 para la probeta B para el tratamiento de relevado de esfuerzos a diferentes temperaturas y una para microdurezas, DR-X y MEB.

Para la construcción de las curvas de transición para las tres zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC; zona de enlace y zona de fusión) se prepararon 54 cupones, para la probeta A y 54 para la probeta B (18 para cada una de las zonas).

### 3.3.5 Tratamiento de Relevado de Esfuerzos

Se realizó el tratamiento térmico de Relevado de Esfuerzos a diferentes temperaturas (350, 450 y 550°C) en un horno de tubo, con tiempos de 3 horas a la temperatura establecida (350, 450 y 550°C) y 4 horas de enfriamiento con el fin de reducir esfuerzos residuales.

Las temperaturas y tiempos del tratamiento de relevado de esfuerzos se determinaron por medio de la siguiente ecuación de efecto térmico de Larson-Miller, la cual relaciona el efecto del tiempo y la temperatura obtenida de “Heat Treater’s Guide” [referencia ]

$$\text{Efecto térmico} = T (\log_{10} t + 20) 10^{-3}$$

**Donde: T Es la temperatura (Rankine)**

**t es el tiempo (h)**

### 3.3.6 Mallado de Microdurezas

El ensayo de durezas se realizó de acuerdo un mallado de microdurezas aproximadamente 12 indentaciones cada 4 milímetros horizontalmente y 6 indentaciones cada 2 milímetros verticalmente, con el fin de relacionar la dureza con la microestructura de las diferentes zonas presentes en la soldadura.

### 3.3.7 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido

En esta etapa se realiza el análisis mediante microscopia óptica y electrónica de barrido con el fin de identificar los tipos de precipitados, tamaño de grano, microestructura, etc. Del mismo modo la evolución en cuanto al tamaño de grano.

Se utilizan electrones secundarios, voltaje de aceleración de 20keV y diferentes distancias de trabajo.

### 3.3.8 Ensayo de Impacto

El ensayo de impacto se efectúa para la determinación del comportamiento de un material a velocidades de deformación elevadas altas. Los Péndulos clásicos determinan la energía absorbida en el impacto por una probeta estandarizada, midiendo la altura de elevación del martillo del Péndulo tras el impacto. Este ensayo se realiza a una temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  de acuerdo a lo que marca la norma AWS A5 18/A5.18M:2005 para el electrodo ER70S-6 y a norma ASTM E23. En la tabla 3 se indica la cantidad de probetas, la identificación de cada una y las temperaturas del tratamiento de Relevado de esfuerzos.

Tabla 3 Identificación de probetas para el ensayo de impacto

Temperaturas de Tratamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )	PROBETA A	PROBETA B
	A1*	M1

<b>Sin Tratamiento</b>	A2*	M2
	B1	N1
	B2	N2
	C1	X1
	C2	X2
	C4, 5 Y 6*	X4, 5 Y 6
	C3*	X3
<b>350 °C</b>	G1	U1
	G2	U2
	H1	V1
	H2	V2
	I1	W1
	I2	W2
	I4, 5 Y 6	W4, 5 Y 6
I3	W3	
<b>450°C</b>	J1	R1
	J2	R2
	K1	S1
	K2	S2
	L1	T1
	L2	T2
	L4, 5 Y 6	T4, 5 Y 6
L3	T3	
<b>550°C</b>	D1	O1
	D2	O2
	E1	P1
	E2	P2
	F1	Q1
	F2	Q2
	F4, 5 Y 6	Q4, 5 Y 6
F3	Q3	

Nota: \* Los números indican la zona en donde se realizó la muesca para la prueba de impacto, el número 1 corresponde a la Zona Afectada por el Calor (ZAC), el número 2 corresponde a la Zona de Fusión (ZF) y los números 4, 5 y 6 a la Zona de Enlace (ZE).

Las probetas marcadas con el número 3 fueron utilizadas para el Mallado de Microdureza, Análisis de Difracción de Rayos X y Microscopia de Barrido.

### 3.3.9 Curvas de Transición Dúctil-Frágil

Se construyeron curvas de transición dúctil-frágil en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC, ZE Y ZF) con el fin de conocer las temperaturas a las cuales el material presenta el comportamiento dúctil o frágil y a cual temperatura puede presentar fallas. En la tabla 4 se presenta la identificación de los cupones que corresponden a las probetas A y B, las temperaturas en las que se realizó la prueba y la zona (ZAC, ZE y ZF) en donde se realizó la entalla.

Tabla 4 Identificación de los cupones para la construcción de curvas de transición en diferentes zonas presentes en la soldadura.

Temp. de prueba °C	PLACA A ZAC	PLACA B ZAC	PLACA A ZE	PLACA B ZE	PLACA A ZF	PLACA B ZF
-150	ZZ1.1	YZ1.1	ZE1.1	YE1.1	ZF1.1	YF1.1
-150	ZZ1.2	YZ1.2	ZE1.2	YE1.2	ZF1.2	YF1.2
-150	ZZ1.3	YZ1.3	ZE1.3	YE1.3	ZF1.3	YF1.3
-110	ZZ2.1	YZ2.1	ZE2.1	YE2.1	ZF2.1	YF2.1
-110	ZZ2.2	YZ2.2	ZE2.2	YE2.2	ZF2.2	YF2.2
-110	ZZ2.3	YZ2.3	ZE2.3	YE2.3	ZF2.3	YF2.3
-60	ZZ3.1	YZ3.1	ZE3.1	YE3.1	ZF3.1	YF3.1
-60	ZZ3.2	YZ3.2	ZE3.2	YE3.2	ZF3.2	YF3.2
-60	ZZ3.3	YZ3.3	ZE3.3	YE3.3	ZF3.3	YF3.3
-20	ZZ4.1	YZ4.1	ZE4.1	YE4.1	ZF4.1	YF4.1
-20	ZZ4.2	YZ4.2	ZE4.2	YE4.2	ZF4.2	YF4.2
-20	ZZ4.3	YZ4.3	ZE4.3	YE4.3	ZF4.3	YF4.3
22	ZZ5.1	YZ5.1	ZE5.1	YE5.1	ZF5.1	YF5.1
22	ZZ5.2	YZ5.2	ZE5.2	YE5.2	ZF5.2	YF5.2
22	ZZ5.3	YZ5.3	ZE5.3	YE5.3	ZF5.3	YF5.3

## IV. RESULTADOS

#### 4.1 Unión de placas

Se realizó la unión de las placas A y B con el proceso de soldadura GMAW como se muestra en la figura 12.



Figura 12 Depósito de cordones con diferentes condiciones como se indico en la tabla 2 probeta A (izquierda) y probeta B (derecha).

#### 4.2 Análisis Químico

La unión de las placas las cuales corresponden a un acero estructural ASTM A633 se llevó a cabo con electrodo ER 70S-6, la composición química se muestra en la tabla 5

Tabla 5 Análisis químico de las probetas soldadas.

<b>Material</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>
<b>Aporte ER 70S-6</b>	97.5	0.067	0.271	1.41	0.114	0.0368	0.129	0.270	0.0201
<b>Base</b>	97.5	0.179	0.239	0.973	0.411	0.170	0.164	0.178	0.0368

#### 4.3 Identificación de las Diferentes Zonas

Se identificaron y seleccionaron las diferentes zonas que se presentan en la soldadura en los cupones que corresponden a las probetas A y B, como se muestra en la figura 15, estas se delimitaron con diferentes colores para su identificación como se indica en la tabla 6

Tabla 6 Identificación de Zonas presentes en soldadura

COLOR	ZONA
	Metal base
	Zona Afectada por Calor
	Zona de Enlace
	Zona de Fusión

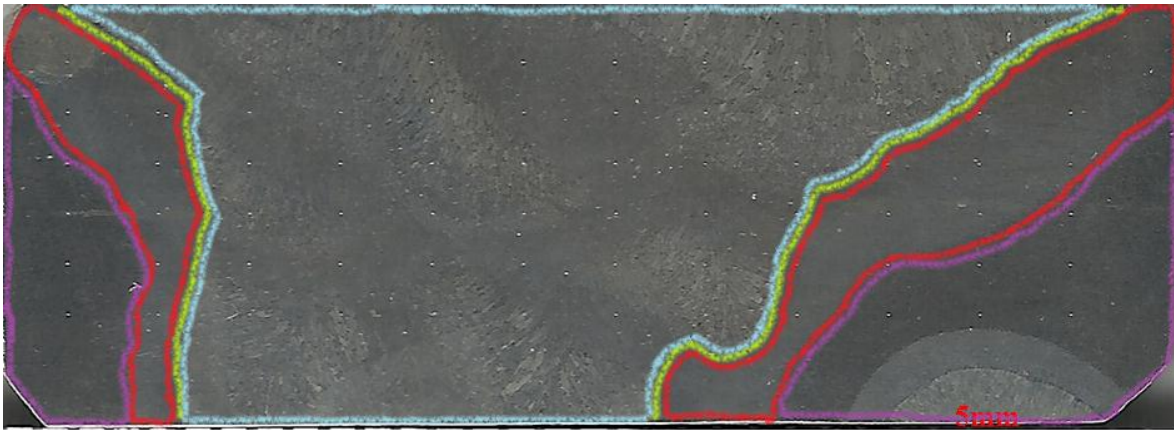


Figura 13. Identificación de las zonas que se presentan en soldadura.

Una vez identificadas las zonas se hizo un promedio de las microdurezas de cada una y se realizó la gráfica correspondiente.

#### 4.4 Ensayo de Durezas

El ensayo de durezas se realizó con una carga de 300 gF en un tiempo de 12 seg. Se hizo un muestreo de microdurezas aproximadamente 12 indentaciones cada 4 mm horizontalmente y 6 indentaciones cada 2 mm verticalmente.

De igual manera se hizo un mallado de fotomicrografías a 1000X a un costado de las indentaciones de las microdurezas en los cupones que corresponden a la probeta A como se muestra en la figura 14. Las fotomicrografías corresponden al cupon C3 de la probeta A como se recibió. La figura 15 muestra el mallado de fotomicrografías del cupon L3 de la probeta A con tratamiento de relevado de esfuerzos de 450°C.

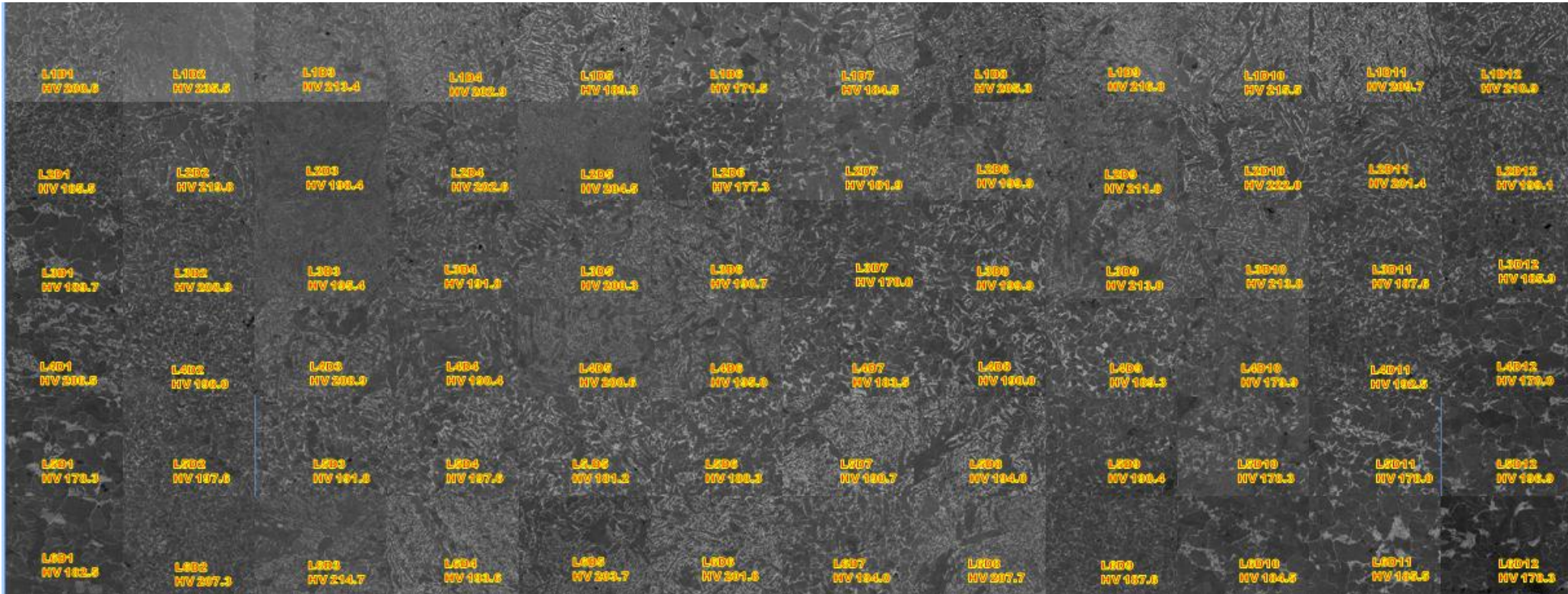


Figura 14 Mallado de micrografías en cupon C3 de probeta A como se recibió.



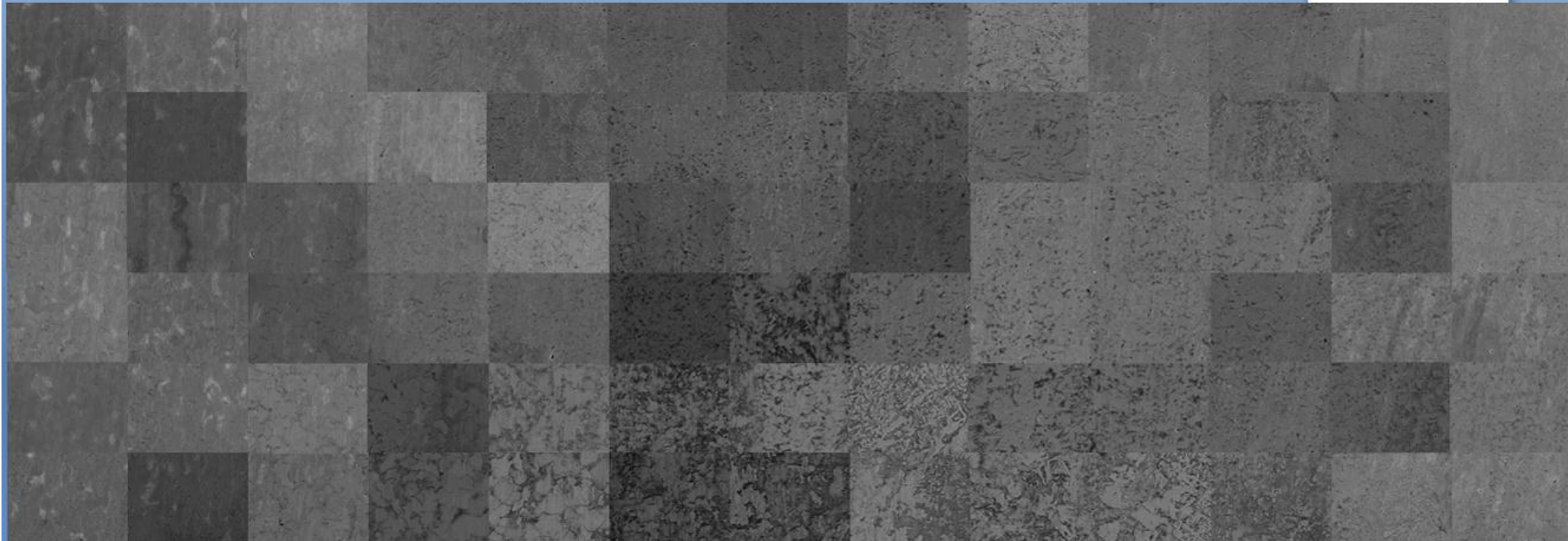


Figura 15 Mallado de micrografía en cupon L3 de probeta A con tratamiento térmico de Relevado de esfuerzos a 450°C

En la figura 16 se muestra el mallado de microfografías del cupon X3 de la probeta B en condiciones iniciales.

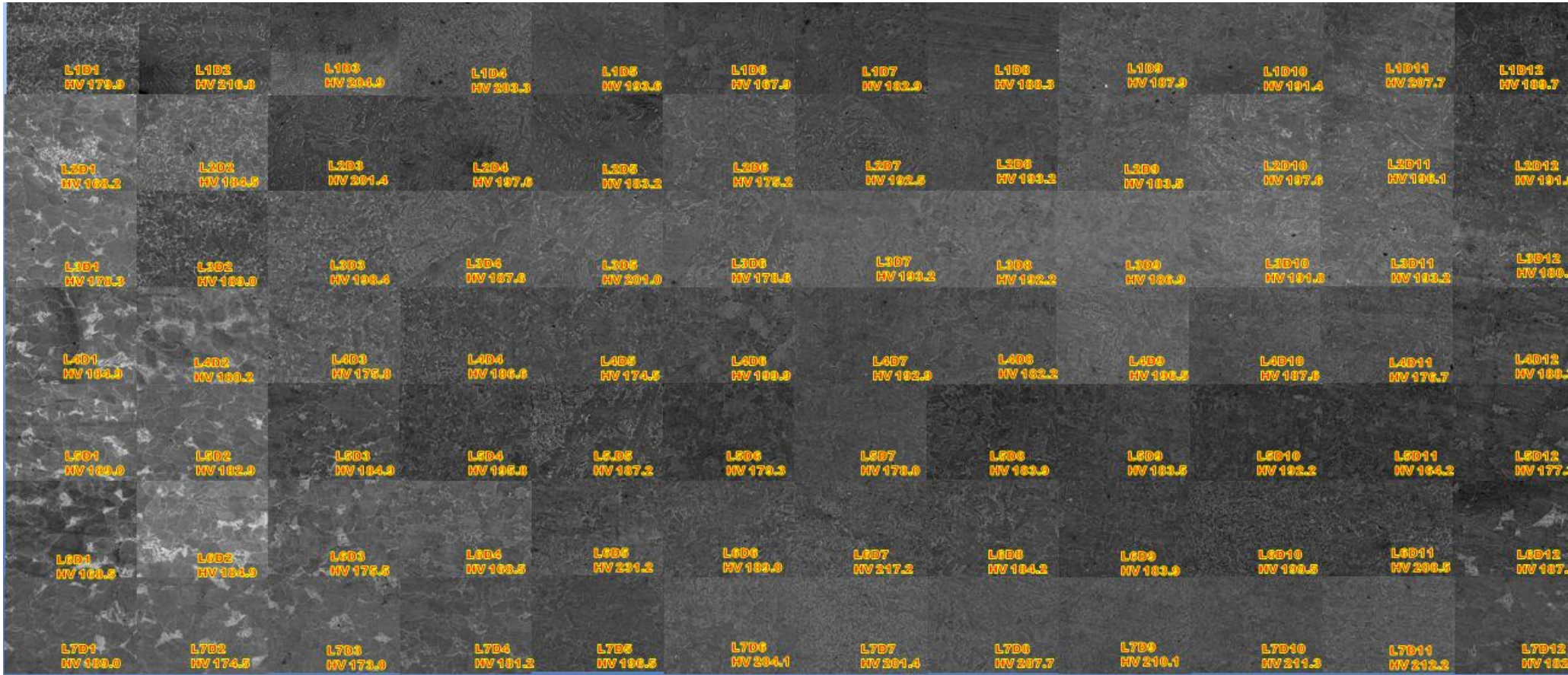


Figura 16 Mallado de microfografías en cupon X3 de probeta B como se recibió.

En la figura 17(a, b, c y d) se muestran los cupones en los que se realizó el mallado de microdurezas, fotomicrografías y DR-X de la probeta A; Estos corresponden a cada una de las condiciones para diferentes temperaturas a la que se realizó el tratamiento térmico de Relevado de Esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C).

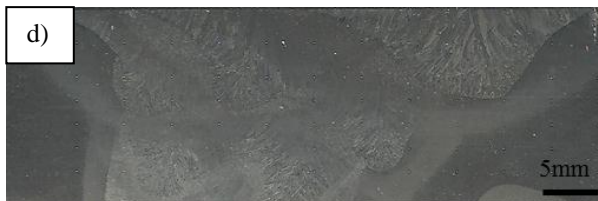
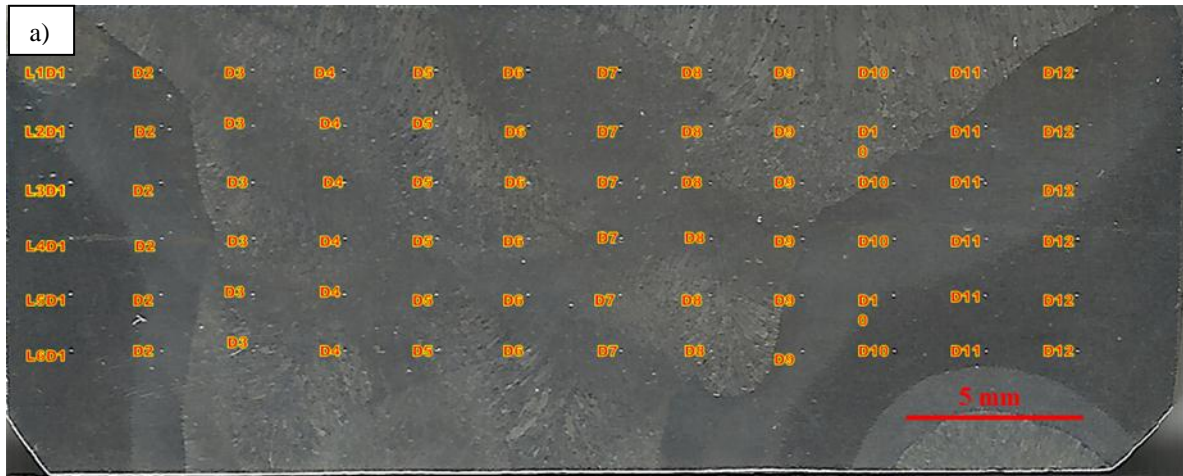


Figura 17 Indentaciones en cupones de probeta A a diferentes temperaturas de tratamiento de relevado de esfuerzos: a) condiciones iniciales, b) 350°C, c) 450°C y d) 550°C.

En la figura 18(a, b, c y d) se muestran los cupones en los que se realizó el mallado de microdurezas, fotomicrografías y DR-X de la probeta B; Estos corresponden a cada una de las condiciones para diferentes temperaturas a la que se realizó el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C)

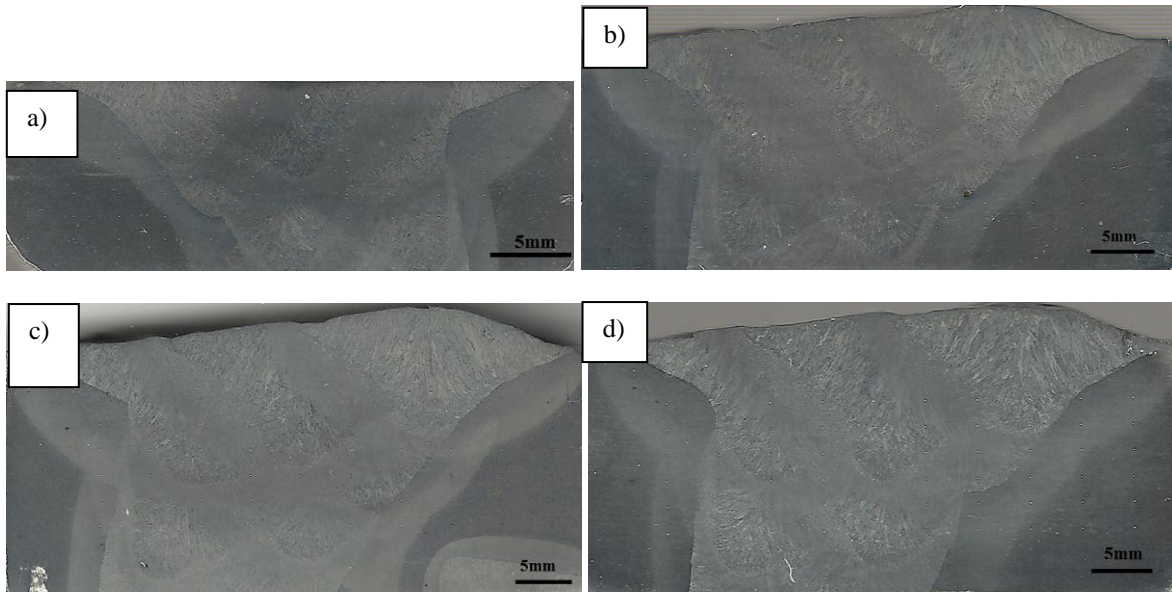


Figura 18 Indentaciones en cupones de probeta B a diferentes temperaturas de tratamiento de relevado de esfuerzos a) condiciones iniciales, b) 350°C, c) 450°C y d) 550°C.

#### 4.4.1 Resultados de dureza de la probeta A

La tabla 7 y la figura 19 muestran los valores de dureza de los cupones con diferentes temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (MB, ZAC, ZE y ZF) de la probeta A.

Tabla 7 Promedio de microdurezas de las diferentes zonas presentes en soldadura, de los cupones de la probeta A con las diferentes temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos.

ZONA DE IDENTACION	C3 como se recibió		I3 (350°C)		L3 (450°C)		F3 (550°C)	
	Hv	HRc	Hv	HRc	Hv	HRc	Hv	HRc
ZAC	196.26	10.13	203.47	10.69	206.73	22.40	191.66	8.74
ZE	201.53	11.25	227	17.2	215.98	14.62	227.76	17.32
ZF	197.33	10.21	206.24	11.98	201.57	11.25	193.57	9.26
MB	186.09	7.22	186.52	7.57	185.98	7.38	176.05	4.67

La figura 19 muestra los resultados de la variación de dureza en función de la temperatura para las diferentes condiciones de tratamiento térmico en las diferentes zonas microestructurales presentes de la soldadura (MB, ZAC, ZE; y ZF)

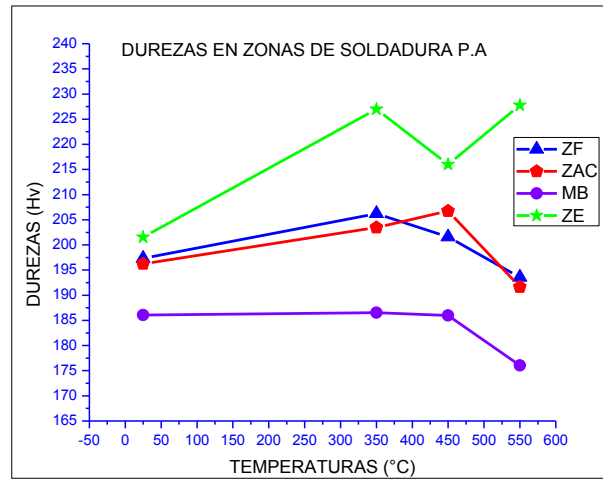


Figura 19 Grafica de durezas vs temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de la probeta A.

#### 4.4.2 Resultados de dureza de la probeta B

La tabla 8 muestra los resultados de durezas de los cupones con diferentes temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (MB, ZAC, ZE y ZF).

Tabla 8 Promedio de microdurezas de las diferentes zonas presentes en soldadura (MB, ZAC, ZE y ZF) a diferentes temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos

ZONA DE IDENTACION	X3 como se recibió		W3 (350°C)		T3 (450°C)		Q3 (550°C)	
	Hv	HRc	Hv	HRc	Hv	HRc	Hv	HRc
ZAC	189.40	8.2	202.22	11.43	200.12	10.85	195.48	9.71

ZE	197.72	10.34	204.84	12	240.24	54.74	188.5	8
ZF	191.37	8.76	202.04	11.40	200.89	11.10	186.18	7.46
MB	181.32	6.23	194.08	9.45	187.48	7.79	183.07	6.65

La figura 20 muestra los resultados de durezas vs las temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (MB, ZAC, ZE y ZF) de la probeta B.

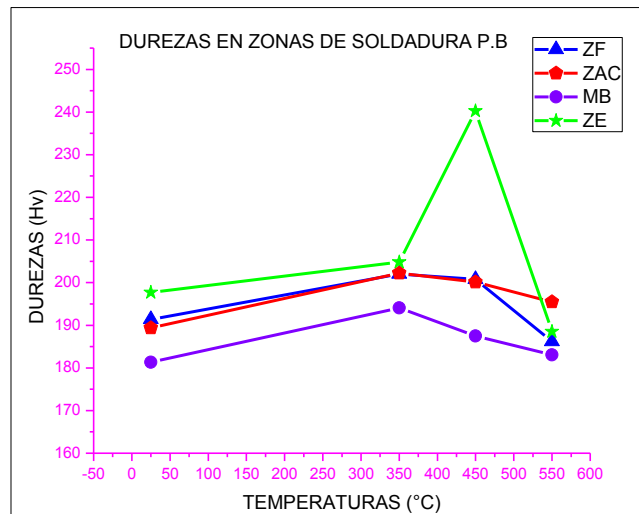


Figura 20 Gráfica de durezas vs temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos de la probeta B

#### 4.4.3 Calculo del tamaño de grano

La tabla 9 muestra los resultados de la medición del tamaño de grano para la probeta A y B en diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC, ZE, ZF y MB) sin tratamiento y a temperaturas de relevado de esfuerzos de 350, 450 y 550°C

Tabla 9 Tamaño de grano de probetas A y B en diferentes zonas a diferentes temperatura de tratamiento de relevado de esfuerzos.

Zona	PROBETA A				PROBETA B			
	C3	I3	L3	F3	X3	W3	T3	Q3

<b>ZAC</b>	4.6	3.3	5.2	4	4	4.5	4.15	5.1
<b>ZF</b>	5.5	4	4	5	3	5.9	8	6.4
<b>MB</b>	6	7.7	7.8	6	7	10.7	9	9.7

#### 4.5 Ensayo de impacto

##### 4.5.1 Resultados de probeta A

Las tablas 10, 11, 12 y 13 muestran los resultados del ensayo de impacto de los cupones correspondientes a la probeta A a condiciones iniciales, 350, 450 y 550°C en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

Tabla 10 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A a condiciones iniciales.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>E absorbida(J)</b>
ZAC	A1, B1, C1	52.62
ZE	C4, C5, C6	28.43
ZF	A2, B2, C2	72.56

Tabla 11 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con tratamiento de relevado de esfuerzos a 350°C.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>Energía absorbida (J)</b>
ZAC	G1, H1, I1	68.96
ZE	I4, I5, I6	28.76
ZF	G2, H2, I2	62.43

Tabla 12 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con tratamiento de relevado de esfuerzos a 450°C.

Zona de Entalla	Cupón	Energía absorbida (J)
ZAC	J1, K1, L1	53.60
ZE	L4, L5, L6	29.74
ZF	J2, K2, L2	57.53

Tabla 13 Energía absorbida de los cupones en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de la probeta A con relevado de esfuerzos a 550°C.

Zona de Entalla	Cupón	Energía absorbida (J)
ZAC	D1, E1, F1	62.43
ZE	F4, F5, F6	28.11
ZF	D2, E2, F2	82.37

En la figura 21 se presentan los resultados de la energía absorbida en los cupones con tratamiento de relevado de esfuerzos (a condiciones iniciales, 350, 450 y 550°C) de la probeta A en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

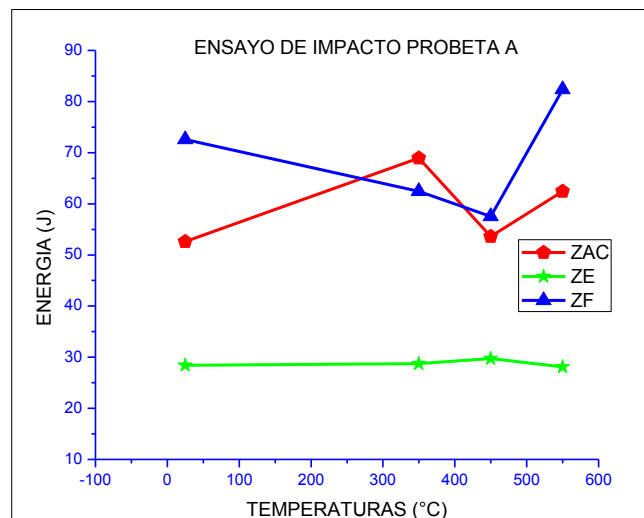




Figura 21 Gráfica de impacto vs temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de los cupones de la probeta A en diferentes zonas de la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

#### 4.5.2 Resultados de probeta B

Las tablas 10, 11, 12 y 13 muestran los resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta A (como se recibió, 350, 450 y 550°C) en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

Tabla 14 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B como se recibió.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>Energía absorbida (J)</b>
ZAC	M1, N1, X1	27.45
ZE	X4, X5, X6	32.68
ZF	M2, N2, X2	27.45

Tabla 15 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 350°C.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>Energía absorbida (J)</b>
ZAC	U1, V1, W1	118.03
ZE	W4, W5, W6	33.66
ZF	U2, V2, W2	91.92

Tabla 16 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 450°C.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>Energía absorbida (J)</b>
ZAC	R1, S1, T1	140.97
ZE	T4, T5, T6	33.66
ZF	R2, S2, T2	82.28

Tabla 17 Resultados del ensayo de impacto de los cupones que corresponden a la probeta B con tratamiento de relevado de esfuerzos de 550°C.

<b>Zona de Entalla</b>	<b>Cupón</b>	<b>Energía absorbida (J)</b>
ZAC	O1, P1, Q1	133.33
ZE	Q4, Q5, Q6	32.36
ZF	O2, P2, Q2	79.96

La figura 22 Temperatura vs energía muestra los resultados de la energía absorbida en los cupones con tratamiento de relevado de esfuerzos a diferentes temperaturas (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de la probeta B en diferentes zonas de la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

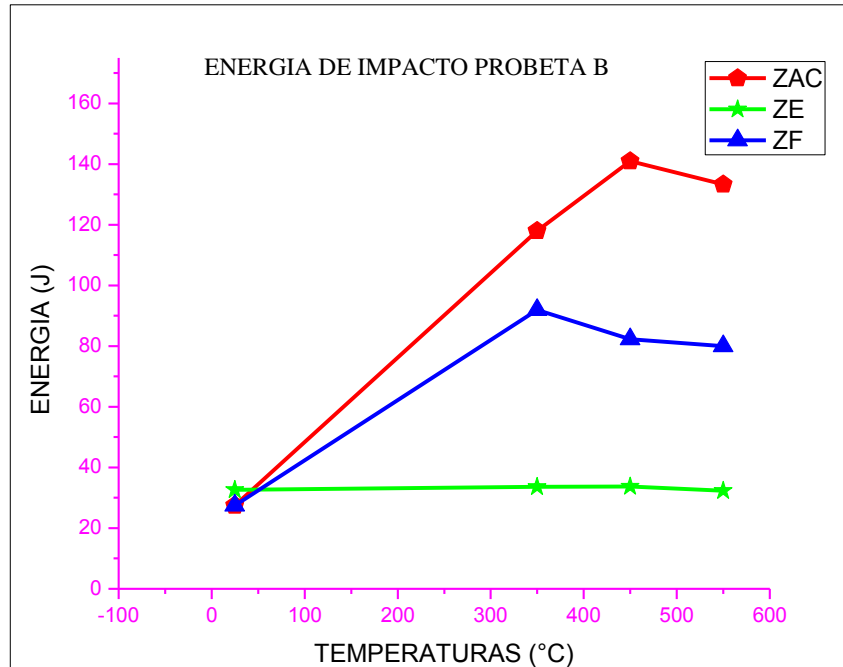


Figura 22 Grafica de impacto vs temperaturas de relevado de esfuerzos (como se recibió, 350, 450 y 550°C) de los cupones de la probeta A en diferentes zonas de la soldadura (ZAC, ZE y ZF).

En la figura 23 se muestran las fractografías a diferentes aumentos (500, 1000 y 2000) del cupon A1 con entalla en la ZAC, en condiciones iniciales.

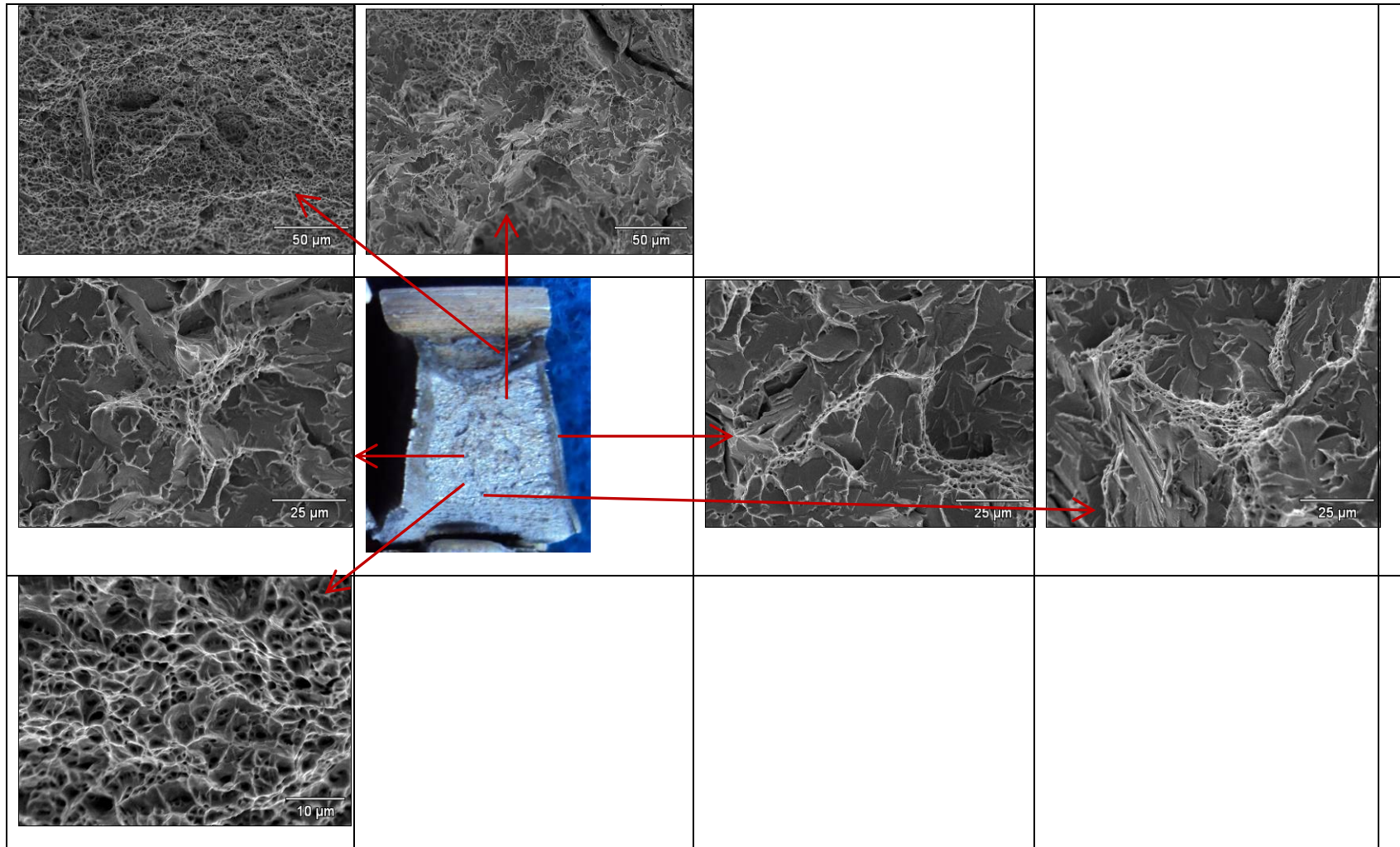


Figura 23 Fractografía de probeta A1 en condiciones iniciales barrido a sobre la superficie

La figura 24. Muestra la variación del efecto térmico a diferentes tiempos y temperaturas. Cuando se tiene una temperatura de 300°C y un tiempo de tres horas A una temperatura de 600°C en un tiempo de 2 Hr



Figura 24 Variación del efecto térmico a diferentes tiempos y temperaturas

#### 4.6 Curvas de transición

Las tablas 18, 19 y 20 muestran los resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición dúctil-frágil en las diferentes zonas microestructurales presentes en la soldadura de las probetas A y B

Tabla 18 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona afectada por el calor (ZAC) de las probetas A y B.

T °C PRUEBA	PLACA A ZAC	Energía (J)	PLACA B ZAC	Energía (J)
-150	ZZ1.1,1.2,1.3	1.095	YZ1.1,1.2,1.3	0.931
-110	ZZ2.1,2.2,2.3	3.072	YZ2.1,2.2, 2.3	3.693
-60	ZZ3.1,3.2,3.3	28.145	YZ3.1, 3.2, 3.3	22.423
-20	ZZ4.1, 4.2, 4.3	28.243	YZ4.1, 4.2, 4.3	25.071
22	ZZ5.1, 5.2, 5.3	33.931	YZ5.1, 5.2, 5.3	27.458

Tabla 19 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona de enlace de las probetas A y B

T °C PRUEBA	PLACA A ZE	Energía (J)	PLACA B ZE	Energía (J)
-150	ZE1.1,1.2,1.3	1.045	YE1.1,1.2,1.3	0.898
-110	ZE2.1,2.2,2.3	8.564	YE2.1,2.2, 2.3	18.174
-60	ZE3.1,3.2,3.3	27.948	YE3.1, 3.2, 3.3	31.381
-20	ZE4.1, 4.2, 4.3	30.890	YE4.1, 4.2, 4.3	32.651
22	ZE5.1, 5.2, 5.3	3.544	YE5.1, 5.2, 5.3	32.884

Tabla 20 Resultados del ensayo de impacto para la construcción de la curva de transición en la zona de fusión de las probetas A y B.

T °C PRUEBA	PLACA A ZF	Energía (J)	PLACA B ZF	Energía (J)
-150	ZF1.1,1.2,1.3	0.865	YF1.1,1.2,1.3	1.045
-110	ZF2.1,2.2,2.3	1.503	YF2.1,2.2, 2.3	5.131
-60	ZF3.1,3.2,3.3	15.134	YF3.1, 3.2, 3.3	20.920
-20	ZF4.1, 4.2, 4.3	21.803	YF4.1, 4.2, 4.3	21.901
22	ZF5.1, 5.2, 5.3	24.450	YF5.1, 5.2, 5.3	27.621

#### 4.6.1 Curvas de transición y evolución microestructural en diferentes zonas microestructurales de la probeta A

La figura 25 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona afectada por el calor de la probeta A.

La figura 26 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la ZAC de la probeta A.

La figura 27 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona de enlace.

La figura 28 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona de fusión.

La figura 29 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la zona de enlace de la probeta A.

La figura 30 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la zona de enlace de la probeta A.

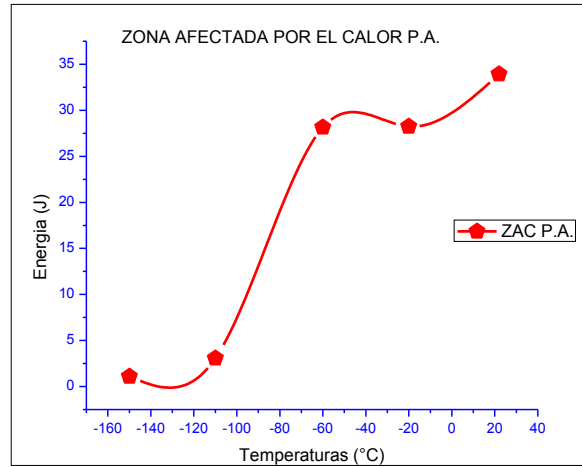


Figura 25 Curva de Transición Dúctil-frágil en la ZAC de probeta A

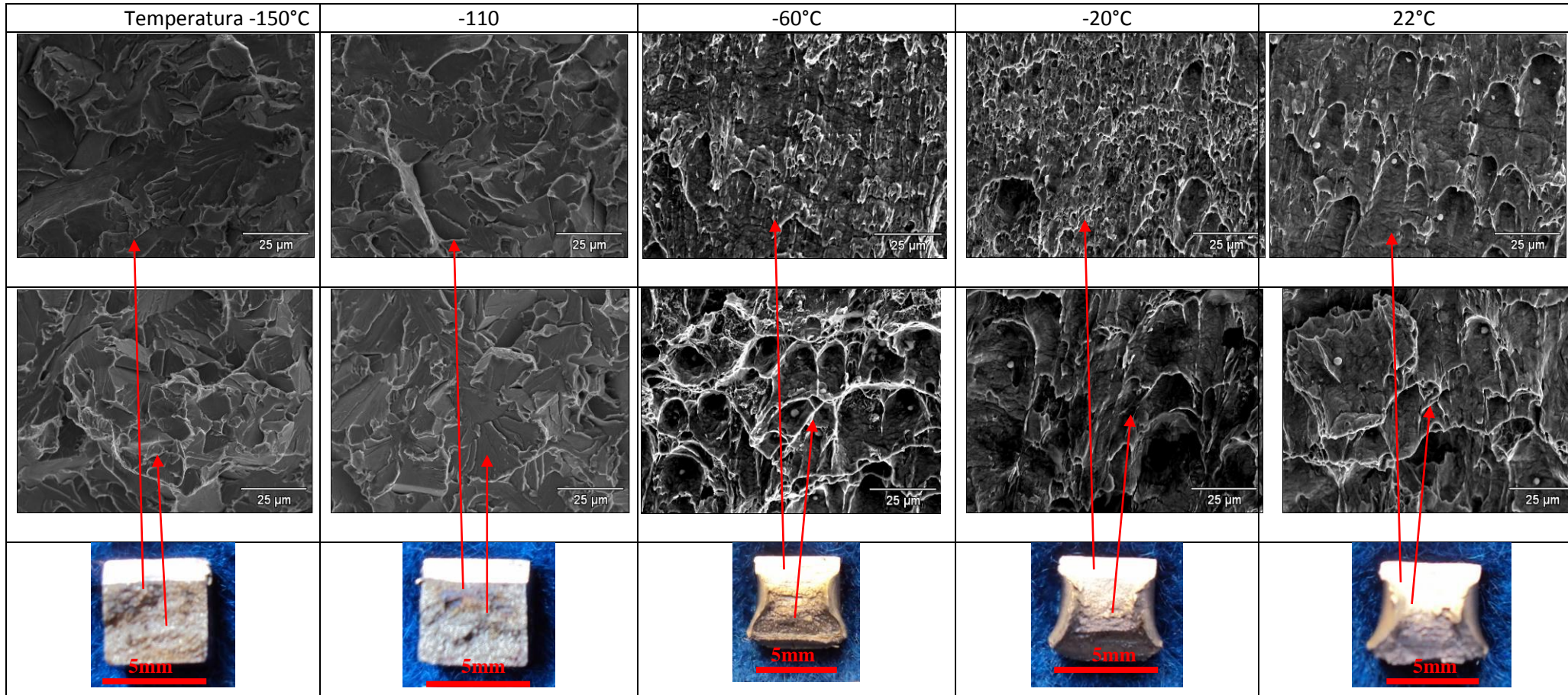


Figura 26 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZAC de la probeta A



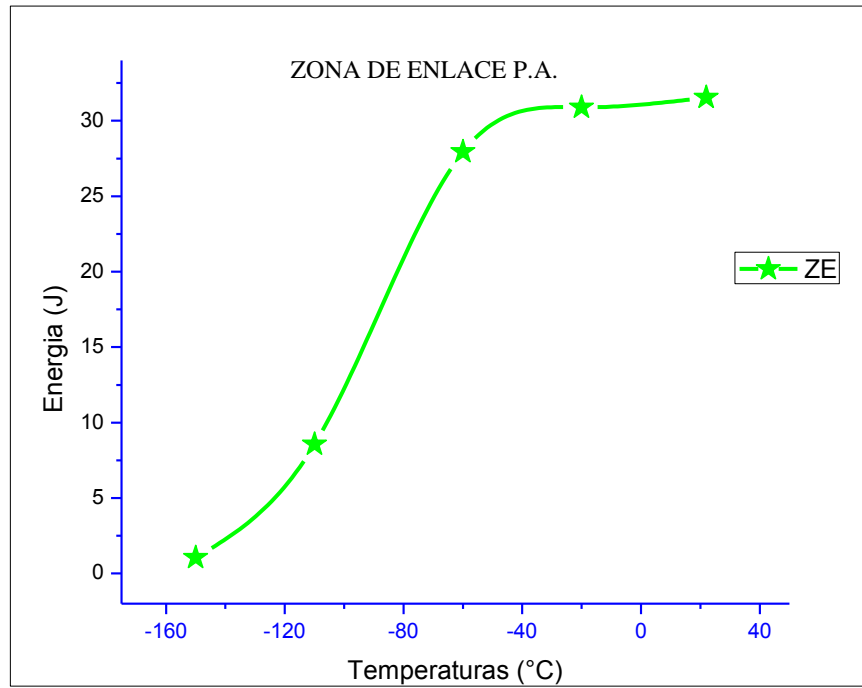


Figura 27 Curva de transición dúctil-frágil en la zona de enlace de probeta A

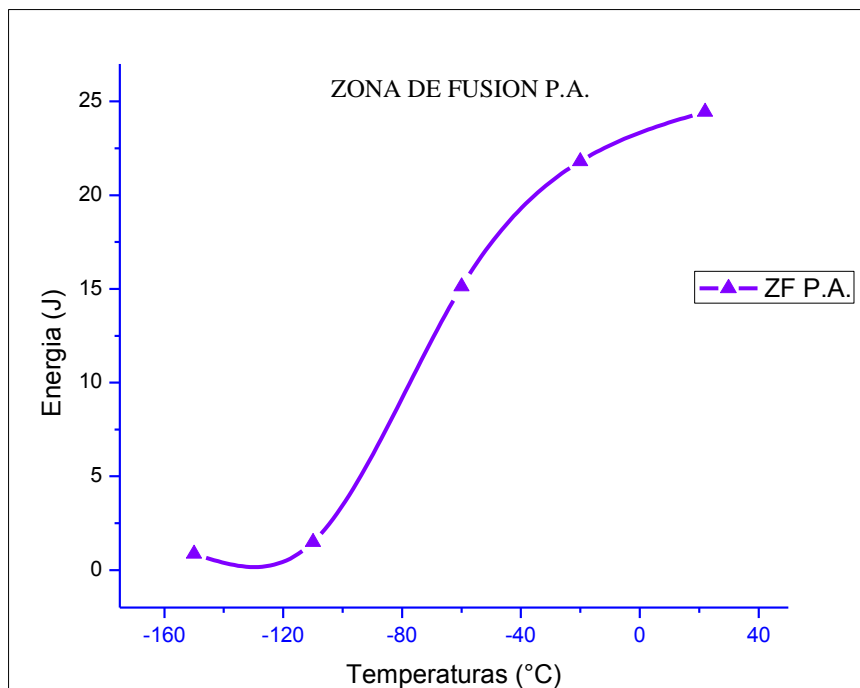
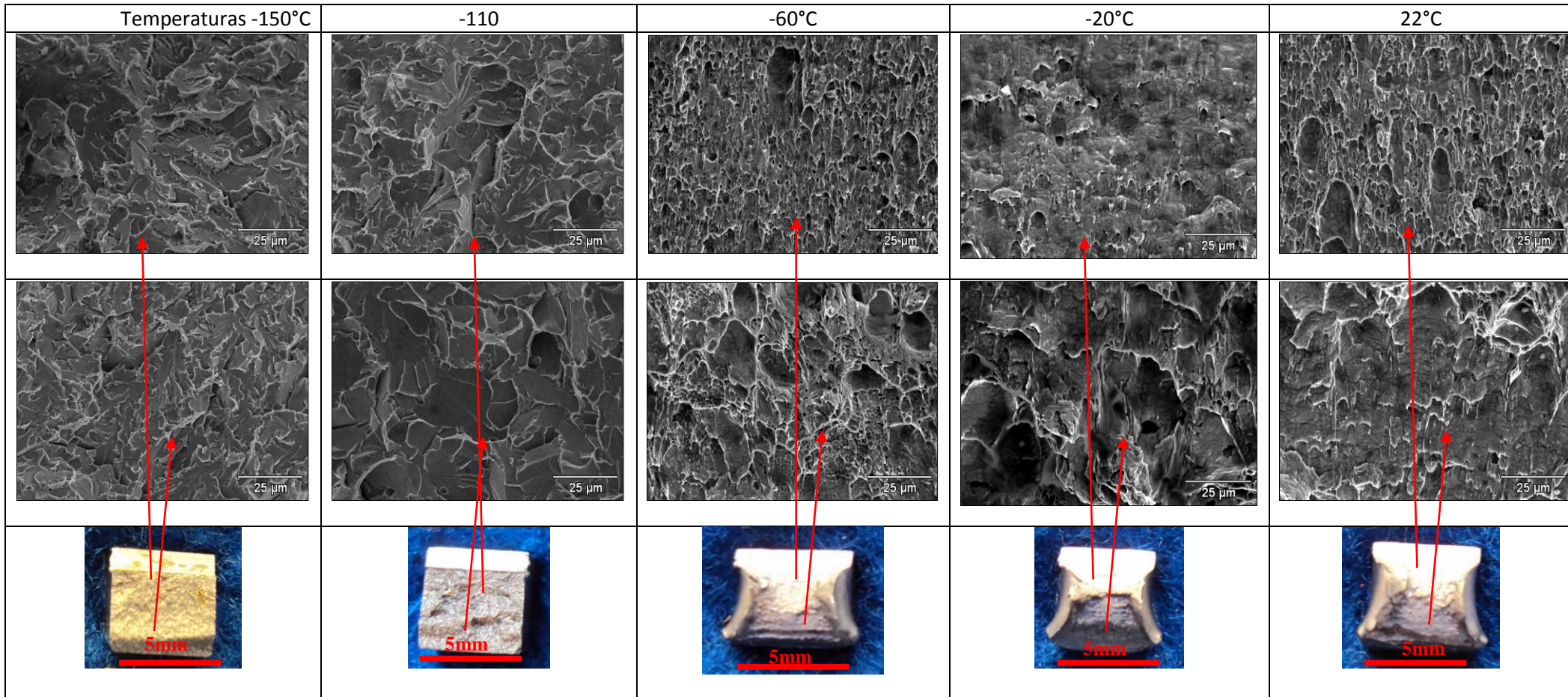
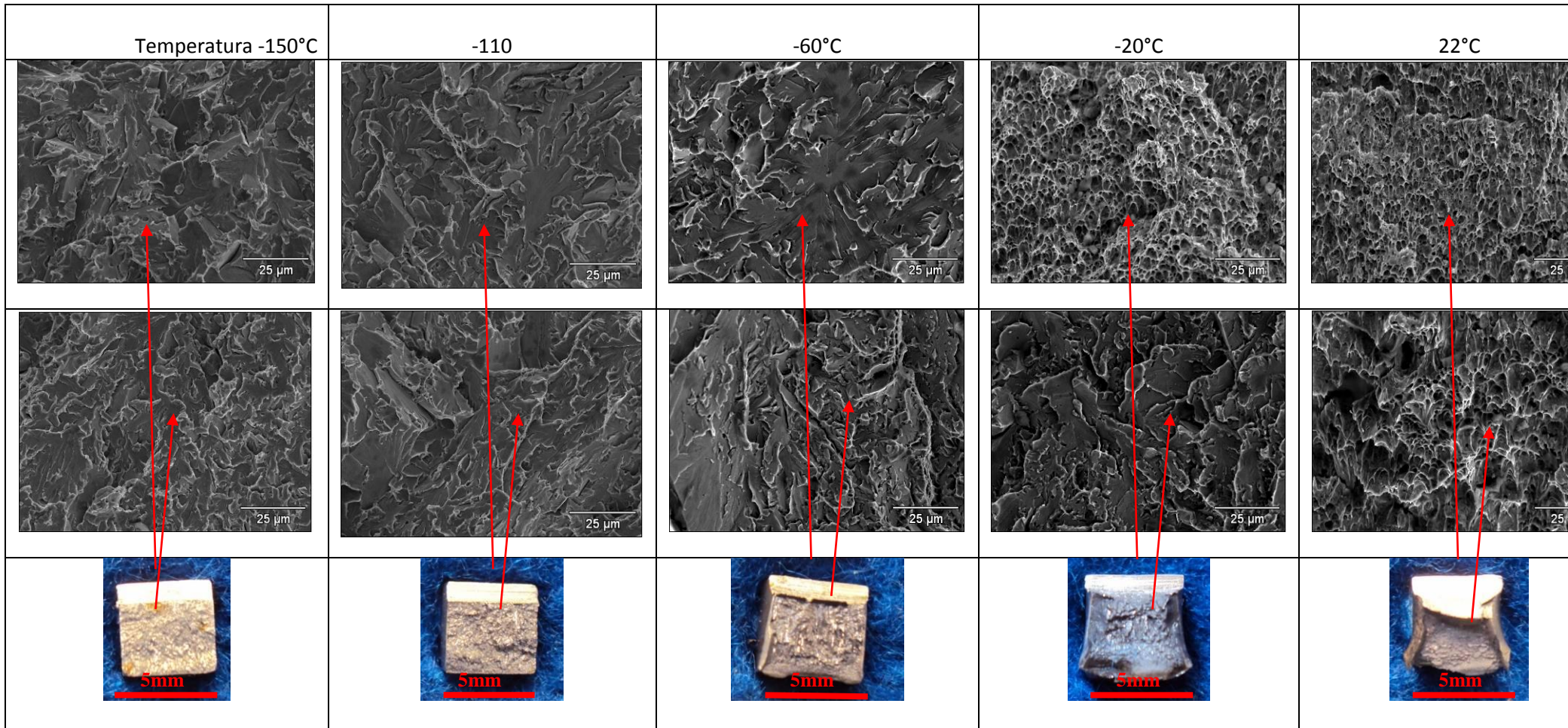


Figura 28 Curva de Transición dúctil-frágil para la zona de fusión de Probeta A



**Figura 29** Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZE de la probeta A



**Figura 30** Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZF de la probeta A

#### 4.6.2 Curvas de transición y evolución microestructural en diferentes zonas microestructurales de la probeta B

La figura 31 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona afectada por el calor de la probeta B.

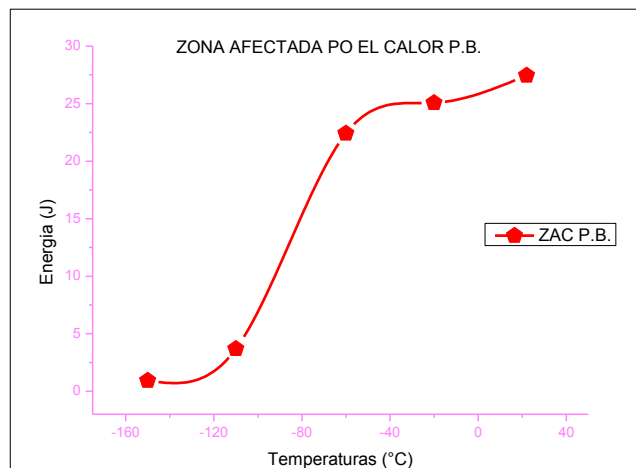
La figura 32 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la ZAC de la probeta B.

La figura 33 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona de enlace de la probeta B

La figura 34 Grafica de energía absorbida vs temperaturas muestra la curva de transición dúctil-frágil para la zona de fusión. B

La figura 35 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la zona de enlace de la probeta B.

La figura 36 Muestra la evolución microestructural a diferentes temperaturas desde -150 hasta 22°C para la curva de transición que corresponde a la zona de enlace de la probeta B.

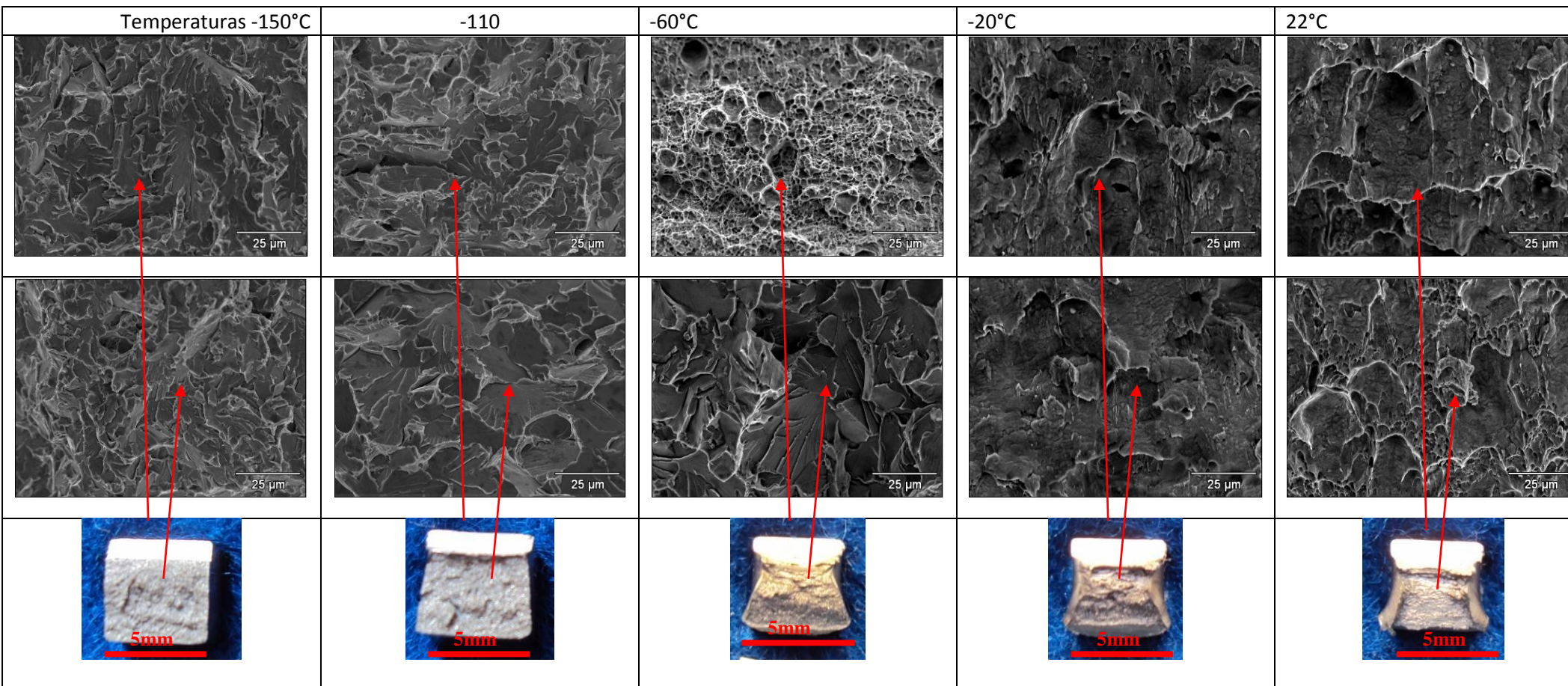


**Figura 31 Curva de Transición para ZAC de Probeta B**

---

*"Efecto del relevado de esfuerzos sobre la tenacidad, dureza y microestructura en la zona de soldadura depositada por el proceso GMAW en un acero estructural"*

---



**Figura 32** Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZAC de Probeta B

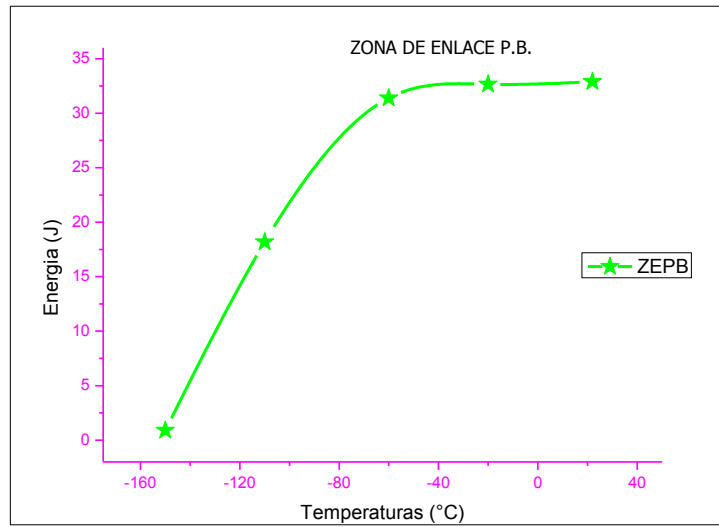


Figura 33 Curva de transición dúctil-frágil para ZE de Probeta B

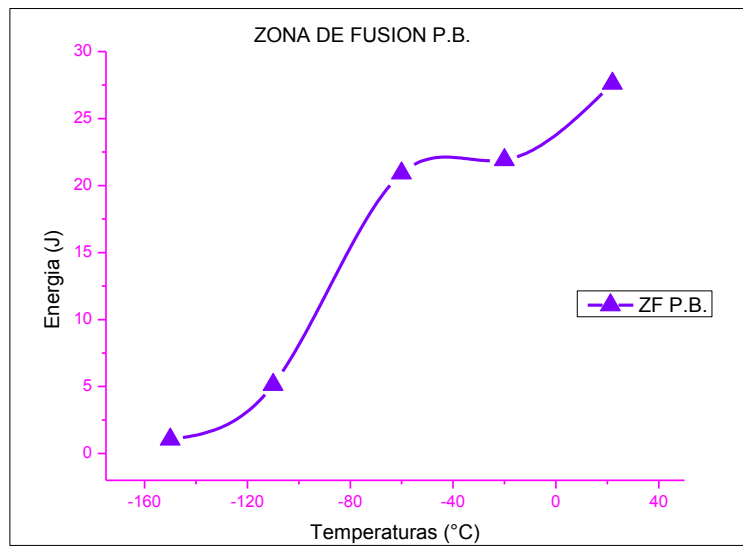
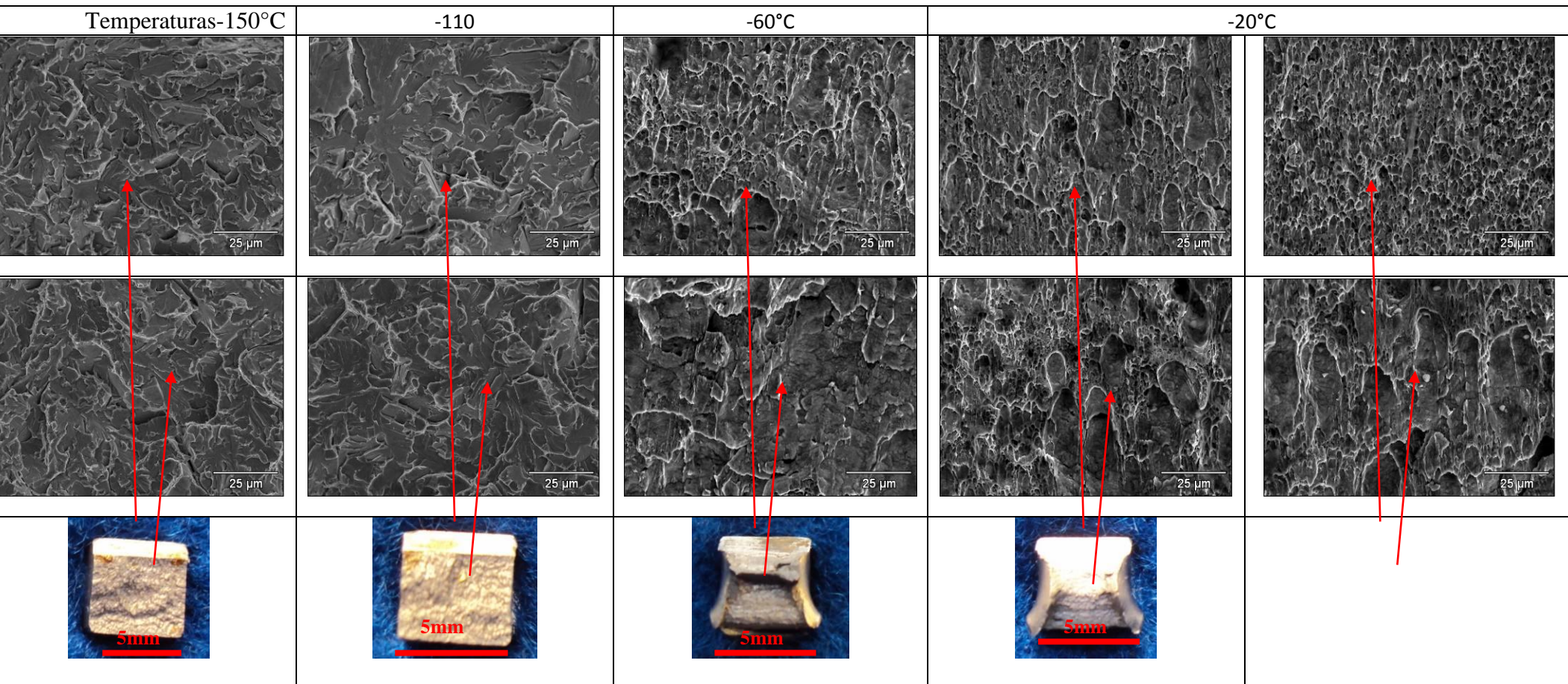
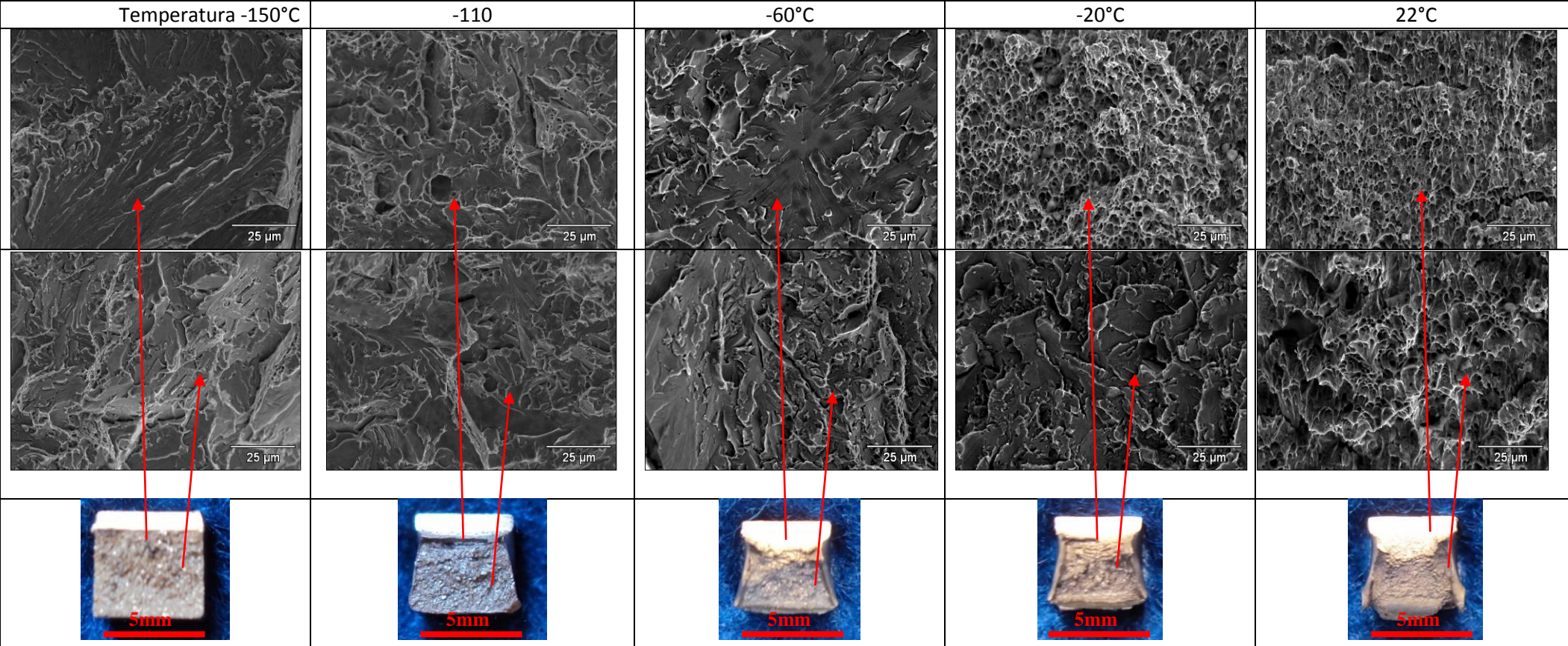


Figura 34 Curva de transición dúctil-frágil para ZF de Probeta B



**Figura 35** Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZE de Probeta B





**Figura 36 Evolución de superficies de fractura de la curva de transición Dúctil-frágil en ZF de Probeta B**

#### 4.7 Microanálisis

La figura 37 muestra los resultados de microanálisis realizado al cupon W3 que corresponde al tratamiento de relevado a 350°C de la probeta B a 10000X

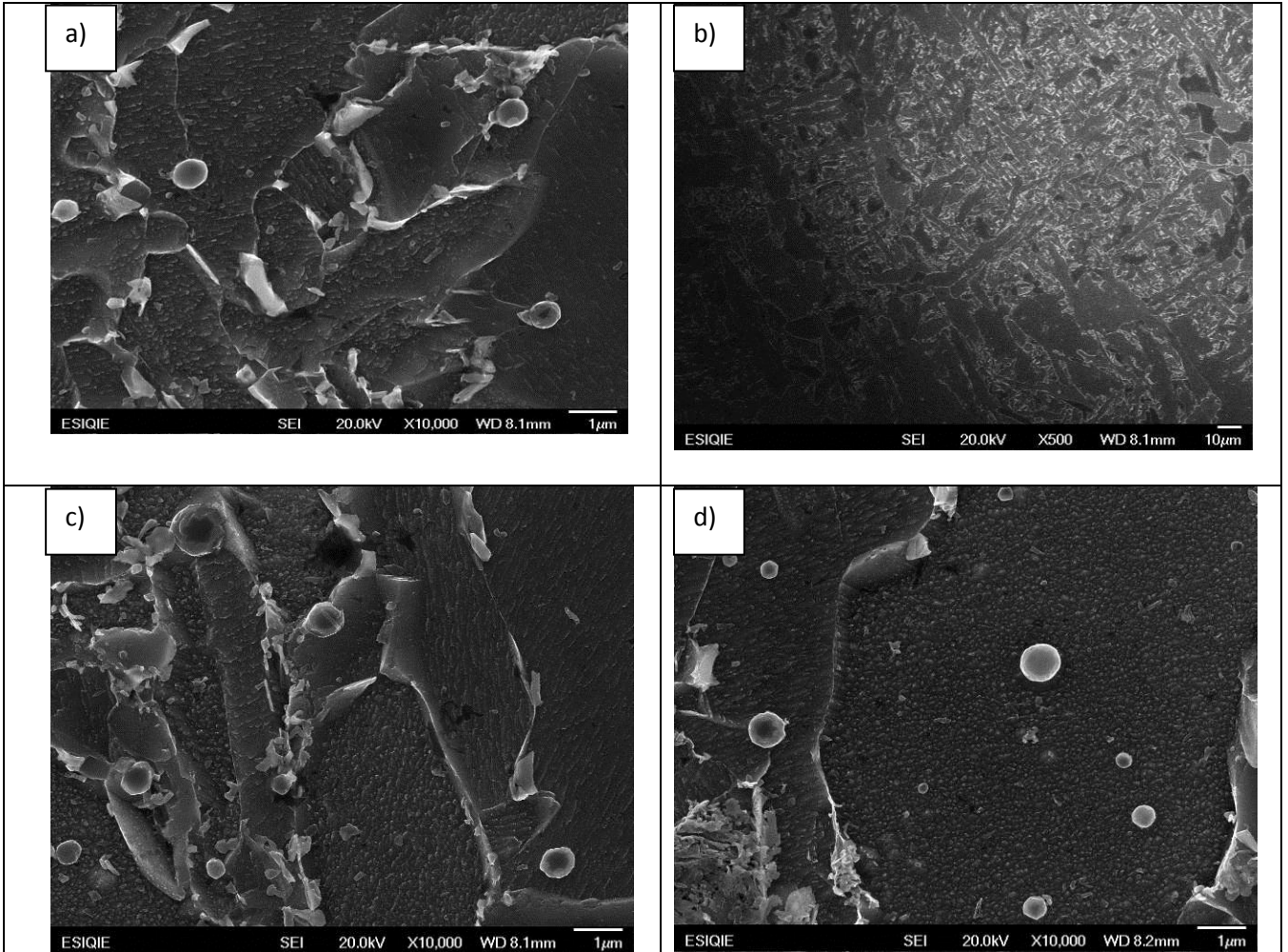


Figura 37. Microanálisis en partículas esféricas de cupon W3 a) precipitados con tamaño menor a 1 μm b) imagen general de zona de fusión, c) mayor cantidad de precipitados mas grandes de 1 μm y d) precipitados muy pequeños de probeta B

La tabla 21 muestra el resultado del microanálisis en la zona de fusión de los precipitados encontrados a diferentes tamaños del cupon W3 con tratamiento de relevado de 350°C de la probeta B.

<b>ELEMENTO</b>	<b>% ATOMICO</b>
<b>C</b>	26.28
<b>SI</b>	0.92
<b>Mn</b>	1.11
<b>Fe</b>	70.99
<b>TOTAL</b>	100.00

Tabla 21 Microanálisis de cupon W3

La figura 38 muestra los precipitados de diferentes tamaños localizados en la zona de fusión del cupon W3 con tratamiento de relevado a 350°C de la probeta B.

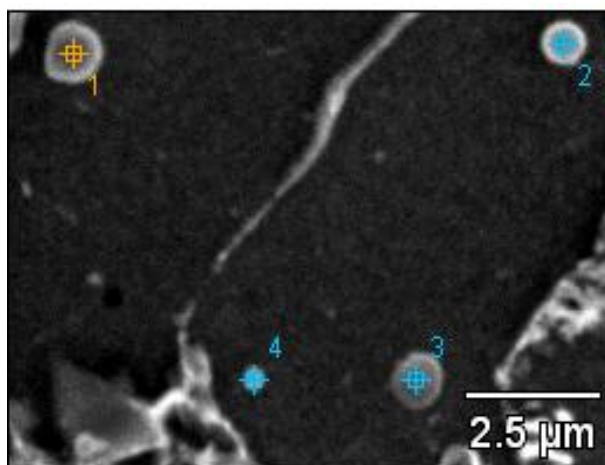


Figura 38 precipitados de diferentes tamaños de cupon W3

En la tabla 22 se muestran los resultados del microanálisis de los precipitados presentes en el cupon W3 de la probeta B

ELEMENTO	% ATOMICO			
	Part.1	2	3	4
C	22.41	32.50	24.02	23.92
O	40.51	24.83	34.90	
Al	1.17	0.80	1.01	
Si	6.96	4.36	5.65	0.98
Ti	0.22	0.19		

<b>Mn</b>	5.45	3.68	4.83	1.30
<b>Fe</b>	22.96	33.26	29.10	73.80
<b>Mo</b>	0.32	0.38	0.48	

#### 4.7 Análisis con difracción de rayos x

Se realizó análisis de rayos X a los cupones de las probetas A y B, se midió el ancho de los picos principales. La tabla 21 muestra los resultados de la medición del ancho de pico en los picos principales de los difractogramas que corresponden a los cupones a las diferentes temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos.

Cupones Probeta A	Localización del pico (2θ)	FWHM (FULL Width at Half Maximium)		θ
C3	44.53°	0.188°	PICO 1	22.265
	65.175°	0.255°	PICO 2	32.5875
	82.32°	0.296°	PICO 3	41.16
	97.51°	0.296°	PICO 4	48.755
	115.96°	0.502°	PICO 5	57.98
I3	44.85°	0.203°	PICO 1	22.425
	65.17°	0.310°	PICO 2	32.585
	82.56°	0.391°	PICO 3	82.56
	98.90°	0.293°	PICO 4	98.9
	116.21°	0.439°	PICO 5	58.105
L3	44.61°	0.199°	PICO 1	22.305
	64.93°	0.284°	PICO 2	32.465
	82.40°	0.298°	PICO 3	41.2
	98.81°	0.370°	PICO 4	49.405
	116.45°	0.637°	PICO 5	58.225

F3	44.94°	0.195°	PICO 1		22.47
	65.09°	0.338°	PICO 2		32.545
	82.32°	0.271°	PICO 3		41.16
	99.30°	0.364°	PICO 4		49.65
	116.32°	0.519°	PICO 5		58.16

probeta B

Probeta	Localización del pico (2θ)	FWHM (FULL Width at Half Maximium)		θ
X3	44.84°	0.143°	PICO 1	22.42
	65.47°	0.286°	PICO 2	32.735
	82.29°	0.300°	PICO 3	41.145
	98.86°	0.353°	PICO 4	49.43
	116°	0.553°	PICO 5	58
W3	44.452°	0.262°	PICO 1	44
	64.93°	0.379°	PICO 2	226
	82.159°	0.442°	PICO 3	41.0795
	99.71°	0.453°	PICO 4	49.855
	116.24°	0.372°	PICO 5	58.12
T3	44.94°	0.261°	PICO 1	22.47
	65.175°	0.401°	PICO 2	32.5875
	81.99°	0.428°	PICO 3	40.995
	98.65°	0.413°	PICO 4	49.325
	116.372°	0.473°	PICO 5	58.186
Q3	44.85°	0.278°	PICO 1	22.425
	65.01°	0.380°	PICO 2	32.505
	82.40°	0.353°	PICO 3	41.2
	98.81°	0.520°	PICO 4	49.405
	116.16°	0.543°	PICO 5	58.08

## *5. Análisis de Resultados*

### **5.1 Microdureza probeta A**

La variación de la microdureza en función de la temperatura de relevado de esfuerzos para las cuatro zonas microestructurales de la probeta A obtenida a una velocidad de alimentación de microalambre a 180mm/s y 29 V, se ilustra en la figura 19. El efecto del relevado de esfuerzos consistió en un incremento moderado en los valores de la dureza Vickers para la zona afectada por el calor, zona de enlace y zona de fusión (ZAC, ZE y ZF) a las temperaturas de 350, 450 y 550°C. La zona de enlace alcanzó la mayor dureza, seguida de la zona de fusión, ZAC y metal base para todas las temperaturas de relevado, debido a que presentó una microestructura heterogénea producto de la unión entre el metal de aporte y metal base, es decir, es el límite de fusión.

La zona de fusión y ZAC presentaron valores próximos de dureza para las temperaturas del tratamiento de relevado de esfuerzos, por lo que presentan una dureza similar. Además, el metal base presentó la menor dureza en comparación con las zonas microestructurales para las tres temperaturas de relevado de esfuerzos, de la misma manera presentó una dureza constante a 350, 450 y 550°C.

Sin embargo, a la temperatura de relevado de esfuerzos de 550°C se observó una disminución de la dureza para el metal base (5% aprox.), ZAC (4%) y zona de fusión (3%) comparada con la condición como se recibió, tal como se observa en la gráfica, relacionado con el efecto térmico del relevado resultando fases microestructurales con menores tensiones internas y mayor ductilidad.

El comportamiento de la dureza en las cuatro zonas microestructurales presentes en la soldadura se relaciona con los cambios microestructurales generados durante el relevado de esfuerzos a diferentes temperaturas, los cuales se presentan en secciones posteriores.

### **5.2 Microdureza probeta B**

En la figura 20 se muestran los resultados obtenidos respecto al cambio de la microdureza con la temperatura de relevado de esfuerzos para la probeta B obtenida a 190mm/s y 29 V. En la condición como se recibió, se encontró que el efecto de una

mayor velocidad de alimentación sobre la dureza fue una disminución para las cuatro zonas microestructurales, comparada con la condición de 180mm/s-

Como puede observarse, la zona de enlace alcanzó la mayor dureza así como su mayor incremento, seguida por la ZAC, zona de enlace, zona de fusión y metal base relacionado con las diferentes características microestructurales generadas por el ciclo de soldadura GMAW. Por otro lado, el metal base mostró la menor dureza a lo largo de las temperaturas de relevado debido a su microestructura dúctil. Se observa que la zona de fusión y ZAC presentan valores de dureza similares entre si para las tres temperaturas de relevado, por lo que mediante la dureza no podrían diferenciarse. A 350°C, se encontró un aumento moderado en dureza para la ZAC, zona de enlace, zona de fusión y metal base. Posteriormente, la dureza disminuyó moderadamente con el aumento en la temperatura de relevado a 550°C, la zona de fusión alcanzó una reducción en la dureza del 4% comparada con la condición como se recibió, debido a cambios microestructurales generados por el tratamiento de relevado, los cuales se detallan mas adelante.

### ***5.3 Energía de impacto probeta A***

El comportamiento de la energía absorbida en función de la temperatura de relevado de esfuerzos para la ZAC; zona de enlace y zona de fusión en la probeta A se presenta en la figura 21. Para la condición como se recibió, la zona de fusión alcanzó la mayor energía, seguida de la ZAC y zona de enlace.

El efecto del relevado de esfuerzos sobre la energía absorbida fue un incremento conforme aumento la temperatura de relevado para la ZAC relacionado con las características microestructurales producidas por el tratamiento de relevado. La energía en la zona de fusión disminuyó para las temperaturas de 350 y 450 °C. Sin embargo, esta energía de impacto aumento a la temperatura de 550°C relacionado con la reducción de la dureza y liberación de tensiones internas con el tratamiento de relevado.

Adicionalmente, se encontró que la zona de enlace mostró la menor energía absorbida para las temperaturas de relevado de prueba en comparación con la ZAC y zona de fusión, atribuido a la mayor dureza Vickers a través del rango de temperaturas. Además, no presento efecto del relevado por lo que sus valores de energía fueron constantes con



las diferentes temperaturas, lo cual podría relacionarse con las fases microestructurales heterogéneas generadas por el ciclo térmico del proceso de soldadura. GMAW

Con el tratamiento de relevado a 550°C, la ZAC alcanzo un incremento de la energía absorbida del 22% comparado con la condición inicial, mientras que la zona de fusión mostro 14% de incremento. Por lo tanto, el incremento en la energía de impacto en la ZAC se favoreció con el tratamiento de relevado de esfuerzos a 550°C, lo cual se relacionó con la evolución microestructural.

#### **5.4 Energía de impacto probeta B**

En lo que respecta a la probeta B la figura 22 muestra la variación de la energía absorbida con la temperatura de relevado de esfuerzos se observa que el efecto fue un incremento notable en la energía conforme aumenta la temperatura de relevado. La ZAC alcanzo los valores de energía mayores, seguida por la zona de fusión y zona de enlace, lo cual se relaciono con la pérdida de dureza y cambios microestructurales con temperaturas de relevado mayores a 450°C.

La zona de enlace mostro un ligero incremento en la energía debido a la complejidad de las fases microestructurales generadas durante el ciclo térmico del proceso de soldadura GMAW resultando una mayor dureza comparada con las demás zonas microestructurales estudiadas en el rango de temperaturas de relevado. A 550°C de relevado, la ZAC y zona de fusión alcanzaron un incremento mayor al 100% en la energía absorbida. Por lo tanto, el relevado de esfuerzos a temperaturas estudiadas junto con el incremento en la velocidad de alimentación del microalambre a 190mm/sfavorecieron la mejora en la energía absorbida a la fractura por impacto relacionada con la resistencia al agrietamiento del material.

## **6. CONCLUSIONES**

El comportamiento del incremento de dureza en la zona de enlace y ZAC se relaciono con la precipitación de partículas fina durante el relevado a 350 y 450°C.

A 550°C se observó el engrosamiento de partículas por lo que la dureza Vickers disminuyo y la energía absorbida aumento para la zona de fusión y ZAC.

## 7. Referencias

1. Norma ASTM E3, 2001
2. Norma ASTM E23, 2001
3. Norma ASTM A633
4. Norma ASTM E380
5. B. Vargas Arista, J.M. Hallen, A. Albiter, “Effect of articial on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe”. Materials Characterization. 58 (2007) 721-729.
6. D. Villalobos, C. MaldonadO, A. Albiter, E. Robles-Piedras, “Efecto de los ciclos térmicos sobre la ZAT de una soldadura multipasos de un acero inoxidable superdúplex SAF 2507”. Soldag. insp. (Impr.) vol.15, No.3, São Paulo, Brasil July/Sept. 2010
7. Francis, J.A., Catin, G.M.D., Mazur, W., Bhadeshia, H.K.D.H. “Effects of weld preheat temperature and heat input on type IV failure. Science & Tecnology of Welding & Joining. Jul 2009, Vol. 14 Issue 5, p 735-741.
8. K. H. Tseng and C.P. Chou, “the effect of pulsed GTA welding on the residual stress of a stainless steel weldment”. JMTP, Vol. 123 (3), 346-353.
9. W. Provost “ Effects of a stress relief heat treatment on the toughness of pressure vessel quality steels welded with high heat input processes”
10. Dong Min, Jun Shen, Shiqiang Lai and Jie Chen, “ Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-weld AZ61 magnesium alloy plates” Mater Charact Elsevier, 25 de septiembre 2009
11. HOWITZ Henry. Soldadura: Aplicaciones y Práctica, Tr. GARCIA DIAZ Rafael Alfaomega, Mexico, 1997
12. AWS A5. 18/A5.18Mhttp://pioviacastillo.blogspot.com/
13. http://calculoestructuraldelbuque.blogspot.mx/2012/03/procesos-de-soldadura-y-cortes.html
14. [http://www.soldanet.com.ar/documentos/catalogos/Explicativos\\_Soldadura.pdf](http://www.soldanet.com.ar/documentos/catalogos/Explicativos_Soldadura.pdf)
15. http://www.balvinder.es/paginas/Enciclopedia.html .
16. Avner Sydney H. Introducción a la Metalurgia Fisica, McGraw-Hill, México 1994

17. Terex México  
[http://www.terex.com/main.php?obj=content&action=VIEW&nav=content  
&id=about\\_history&cancel\\_login](http://www.terex.com/main.php?obj=content&action=VIEW&nav=content&id=about_history&cancel_login)
18. <http://www.carbolite.com/content.asp?id=1&doc=72>
19. <http://www.lindberg.com.ar/conjunto.html>
20.  
[http://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/practicas\\_tecnolog%C3%ADa\\_1.pdf](http://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/practicas_tecnolog%C3%ADa_1.pdf)
21. [http://www.solomantenimiento.com/m\\_termicos-acero.htm](http://www.solomantenimiento.com/m_termicos-acero.htm)
22. <http://www.transmetal.com.mx/relevado.htm>