



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO.**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

***“CARACTERIZACION DE LA SOLDADURA POR  
FRICCION  
EN LA UNION DEL ACERO (1018) ASI COMO EN  
LA UNION ACERO (1018) Y ALUMINIO (6061  
T6)”***

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO.**

**PRESENTAN:**

**AUSTRIA JIMENEZ LAZARO.  
HERNANDEZ ARRIETA ISAAC.  
HERNANDEZ ARRIETA ISMAEL.  
RODRIGUEZ ROJANO RODRIGO ENRIQUE.**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA INDUSTRIAL)**

**PRESENTA:**

**HERNANDEZ ALCANTARA MIGUEL ANGEL**

**DIRECTOR DE TESIS**

**ING. JESUS ROVIROZA LOPEZ.**

**MEXICO, D.F.**

**FEBRERO DE 2006.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **GRACIAS A DIOS**

*Quien siempre me dio fe, amor y fortaleza para conseguir mis metas.*

### **GRACIAS A MI FAMILIA**

*Gracias a mi madre por todo el sacrificio que hizo por mí, por el amor y la comprensión que me ha dado. Por la fuerza de voluntad que me inculco muy a su manera. Y sobre todo gracias por ser madre y padre para mí y mis hermanas. Gracias a mis hermanas que supieron darme el apoyo que necesitaba en todo momento.*

### **GRACIAS A MI ESPOSA MAYRA**

*Por ser mi mejor amiga, por todo su apoyo incondicional, todo el amor y comprensión que me ha brindado, porque me supo alentar en los momentos mas difíciles y no permitió que desistiera aunque las cosas parecieran imposibles, gracias por escucharme y cambiar mi vida, porque eres lo mejor que me ha pasado, gracias por compartir tu vida conmigo. Te amo Mayra.*

### **GRACIAS A TODOS MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS**

*Que fueron parte importante de mi vida, que me apoyaron y alentaron para seguir preparándome, amigos y compañeros con los que compartí momentos especiales, desveladas y muchas otras cosas. Gracias a todos por hacer que mi estancia en la UNAM fuera inolvidable.*

### **GRACIAS A CADA UNO DE MIS PROFESORES Y MAESTROS**

*Porque supieron brindarme confianza y conocimientos, por ayudarme a ser una persona de bien, y que sin duda su participación en mi desarrollo profesional durante mi carrera fue imprescindible y sin ellos no estaría en donde me encuentro ahora. Muchas gracias a todos.*

**LÁZARO AUSTRIA JIMÉNEZ.**

## **AGRADECIMIENTOS:**

### ***A Dios:***

*Te agradezco mi Señor por todo lo que me has dado, por mi familia, por todas las personas que han dejado huella en mí, por los momentos gratos y por lo malos, por haberme permitido llegar lejos, por dejarme ser una persona útil para los demás, permíteme llegar más lejos para cumplir mis sueños.*

### ***A mis padres MANUEL y EMILIA:***

*Les agradezco por todos los sacrificios que han hecho para formarme, por educarme y darme valores, por creer en mí, por enseñarme a cumplir mis metas y sueños, por apoyarme en todos los momentos más importantes de mi vida, por haberme hecho responsable, por haberme permitido llegar lejos, por pensar en que yo tuviera una mejor expectativa de vida, por ser buenos padres y por pensar en el beneficio de sus hijos más que en el de ustedes, por haber aguantado a un hijo como yo, por haberme permitido ser un miembro más en su familia. Si volviera a nacer, a Dios le pediría que ustedes fueran otra vez mis padres.*

### ***A mis hermanos ANDREA, ISMAEL y MÓNICA:***

*Les agradezco hermanos por todo el apoyo que me han brindado, por el ejemplo que me han dado, por sus consejos, por su paciencia para aguantarme, porque no me olvidaré nunca de ustedes, por todo lo que hemos vivido todos estos años en familia.*

### ***A mi alma mater:***

### ***La UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:***

*Le agradezco por haberme formado en su seno, por haber confiado en mí, por permitirme ser una mejor persona para mi patria y mi gente, por que no tengo como pagarle todo lo que me ha dado y ha hecho de mí, nunca me olvidaré de ti y créelo que siempre dejaré tu nombre en alto.....*



*A mis mejores amigos ADRIÁN y MAURICIO:*

*Les agradezco por todos los momentos en que los necesité y allí estuvieron, por los momentos que vivimos y que nos hicieron crecer, por ser tal como son, por sus comentarios y consejos en los tiempos difíciles de mi vida. También les quiero agradecer por medio de ustedes a sus familias por todo lo que han hecho por mí, de verdad que los considero mis hermanos y espero que siempre estemos juntos.....*

*A la mujer que más amé en mi vida, PAOLA:*

*Te agradezco por todos esos momentos tan felices que viví junto a ti, por todo lo que descubrí a tu lado, por haber dejado huella en mi vida, por haber dejado las más preciosas páginas escritas en mi alma, por tu amor, tu paciencia, tu ternura, tu apoyo, tus consejos, por que nunca imagine tener un amor tan sincero y puro lejos de las cosas materiales de este mundo, por que fuiste en mi vida lo más bello que Dios me pudo haberme dado, y qué no hubiera dado por seguirte teniendo a mi lado, pero así tuvo que suceder y hubiera cambiado todo lo que soy y todo lo que tengo por nunca perderte y que estuvieras en este momento tan importante en mi vida. Si Dios me permitiera vivir otra vez esta vida, te elegiría sin pensarlo como la mujer de toda mi vida.....gracias.*

*A mis compañeros y amigos de la primaria Gran Bretaña, de la secundaria ESTIC 89, del CCH-Naucalpan y de la Facultad de Ingeniería:*

*Les agradezco por haber escrito muchas páginas en el libro de mi alma, por las cosas gratas y no tan gratas que compartimos, por todos los que están y por todos los que se fueron y espero que algún día podamos volver a estar todos juntos y recordar todos esos momentos que vivimos, quisiera escribir todos sus nombres porque los tengo presentes, pero esta hoja no alcanzaría, de todos modos gracias a todos...*

*A mis amigos y compañeros del MFC Juvenil:*

*Les agradezco por todo lo que han compartido conmigo, por su apoyo, por escucharme, por sus puntos de vista que me han hecho crecer, por haberme permitido expresar lo que tengo en mi corazón y pensamiento, que espero que algo de ello les haya servido.....*

*A todos mis profesores:*

*Les agradezco por haber compartido su conocimiento y por haberme educado en el aula, por su hermosa labor de crear mejores personas, por haber optado por el camino de la docencia para poder ayudar a su gente y a su patria. Espero algún día, y es mi deseo, poder también contribuir en el progreso de mi patria compartiendo mi conocimiento a los demás en un aula.....*

*A todos lo que contribuyeron en la realización de este trabajo de tesis, Trabajadores y Académicos de la UNAM, Ingenieros, Maestros en Ingeniería, Doctores en Ingeniería:*

*Les agradezco por haberme guiado y compartido sus conocimientos así como su amistad, para la realización de este trabajo de tesis*

**ISAAC HERNÁNDEZ ARRIETA.**

*Gracias.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México:*

*Por darme la mejor educación del mundo.*

*A mis Padres:*

*Emilia y Manuel que con su ejemplo y dedicación, soy un hombre de bien, y por supuesto por su confianza en mí, muchas gracias, este trabajo es suyo.*

*A mis Hermanos:*

*Andrea, Mónica e Isaac gracias y recuerden que siempre pienso en ustedes.*

*A todos mis profesores:*

*Que con su talento supieron poner en mí ese orgullo de ser ingeniero.*

*Al M.A. Jesús Roviroza López:*

*Por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y por su amistad.*

*Al Doctor Arturo Barba P.:*

*Por la gran ayuda que brindo para la realización de este trabajo.*

*Al Ingeniero Ubaldo Márquez:*

*Por sus consejos y sugerencias.*

*Al Doctor Armando Ortiz:*

*Por su ayuda y sugerencias.*

*A todos mis amigos gracias por confiar en mí:*

*Rogelio (Pachón), Marco Antonio (Pollo), Gregorio (Goyo), Jeannette, Elizabeth, Ing. Ubaldo Suárez, M.I. Eduardo Garduño, Ing. Armando Sánchez, Mario (Mariotetas), Horacio (Panzón), Omar ( El chino), Eduardo (Fucker), Juan (Pu), Eduardo (Batman), David (Vocecita), Roberto (La ma), Arturo (Pozoles), a los Pulpos, Martín (Martina), al Sensei, al Chapis, a la Bestia, al Padrino, al Barrabas, al Orejas, al Puck, Rodrigo, Lázaro, etc.; y si no nombro a los de más discúlpenme, recuerden siempre los recuerdo a todos con afecto.*

*A mis brothers:*

*Alfredo, Alejandro, Oscar; Omar y a todos los del movi.*

*Mrs. Berta Leon & Mr. Javier Leon:*

*Gracias, con mucho cariño.*

*thanks, with much love.*

*A DIOS:*

*Por darme vida y salud, sin eso no haría nada.*

*Si Cristo conmigo quien contra mí.*

*ISMAEL HERNÁNDEZ ARRIETA.*

### **GRACIAS A DIOS**

*Por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr una meta más.*

### **GRACIAS A MIS PADRES**

*Por su cariño, comprensión y apoyo sin condición ni medida. Gracias por animarme cuando me sentía la persona menos inteligente de la escuela. Creo ahora entender el porque me decían que estudiara y terminara mi tarea antes de salir a jugar, y muchas cosas que no terminaría de mencionar. (Los quiero mucho)*

### **GRACIAS A ROXANA (MI AMOR)**

*Por tu apoyo, comprensión y ese gran amor que me permite sentir que puedo lograr todo lo que me proponga. Gracias por escucharme y cambiar mi vida, porque eres lo mejor que me ha pasado, gracias por compartir tu vida conmigo. (Te amo).*

### **GRACIAS A LILIANA (MI HERMANITA)**

*Eres un gran ser humano, y una excelente hermana, gracias por aguantarme que no es fácil (yo lo sé), gracias por los consejos y por darme ánimos en tiempos difíciles. (Te quiero)*

### **GRACIAS A TODOS MIS AMIGOS**

*Que estuvieron conmigo, me apoyaron y compartieron tantas aventuras, experiencias y desveladas. Gracias a mis compañeros por hacer de mi estancia en la UNAM fuera inolvidable.*

### **GRACIAS A CADA UNO DE MIS MAESTROS**

*Que participaron en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora.*

**RODRIGO ENRIQUE RODRÍGUEZ ROJANO.**

*AGRADECIMIENTOS:*

*A MI FAMILIA:*

*Por su apoyo durante todos estos años.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México:*

*Por la formación que esta me brindó todos estos años.*

*MIGUEL A. HERNÁNDEZ ALCÁNTARA.*

---

# INDICE

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

<b>CAPITULO 1.</b>	
<b>DESARROLLO E IMPORTANCIA DE LA</b>	
<b>SOLDADURA.....</b>	<b>3</b>

1.1	BREVE HISTORIA DE LA SOLDADURA.....	3
1.2	ALGUNAS DEFINICIONES BASICAS.....	5
1.3	CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA.....	6
1.3.1	SOLDADURA BLANDA.....	8
1.3.2	SOLDADURA FUERTE.....	9
1.3.3	SOLDADURA POR FORJA.....	13
1.3.4	SOLDADURA CON GAS.....	14
1.3.5	SOLDADURA CON RESISTENCIA.....	16
1.3.6	SOLDADURA POR INDUCCION.....	19
1.3.7	SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO.....	20
1.3.8	SOLDADURA POR FRICCION.....	26
1.3.9	SOLDADURA POR EXPLOSION.....	27
1.3.11	SOLDADURA POR ARCO CON PLASMA.....	28
1.3.12	SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES.....	30
1.4	LA IMPORTANCIA DE LA SOLDADURA.....	31

---

## **CAPITULO 2.**

<b>LA SOLDADURA POR FRICCION.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1 EL PROCESO.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 PARAMETROS DE LA SOLDADURA POR FRICCION.....</b>	<b>35</b>
2.2.1 La velocidad.....	35
2.2.2 La presión axial.....	35
2.2.3 El ciclo de calentamiento.....	35
<b>2.3 PRINCIPALES METODOS DE SOLDADURA POR FRICCION.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.1 LA SOLDADURA POR FRICCION CONVENCIONAL (MANEJO CONTINUO).....</b>	<b>36</b>
2.3.1.1 El principio de operación.....	36
2.3.1.2 Las variables del proceso.....	37
<b>2.3.2 LA SOLDADURA POR FRICCION POR INERCIA.....</b>	<b>38</b>
2.3.2.1 El principio de operación.....	38
2.3.2.2 Las variables del proceso.....	40
<b>2.3.3 LA SOLDADURA POR FRICCION POR VOLANTE.....</b>	<b>43</b>
2.3.3.1 El principio de funcionamiento.....	43
2.3.3.2 Las variables del proceso.....	44
<b>2.4 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....</b>	<b>44</b>
2.4.1 LA FUERZA DE LA SOLDADURA.....	44
2.4.2 LAS SECCIONES SOLDADAS.....	45
2.4.3 EL DISEÑO DE LA UNION.....	45
2.4.4 LAS CONDICIONES DE LAS SUPERFICIES DE UNION.....	45
2.4.5 EL CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA.....	46
<b>2.5 LAS APLICACIONES EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....</b>	<b>6</b>
<b>2.6 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCION..</b>	<b>48</b>
2.6.1 VENTAJAS.....	48
2.6.2 LAS LIMITACIONES.....	49



---

2.7	LA ECONOMIA DE LA SOLDADURA POR FRICCION EN EL FUNCIONAMIENTO Y EN EL MATERIAL.....	50
-----	---	----

## **CAPITULO 3.**

### **LOS ACEROS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....51**

3.1	DIAGRAMA Fe-Fe <sub>3</sub> C ( HIERRO-CARBURO DE HIERRO).....	51
3.2	CLASIFICACION DE LOS ACEROS.....	53
3.2.1	ACERO EUTECTOIDE.....	53
3.2.2	ACERO HIPOEUTECTOIDE.....	54
3.2.3	ACERO HIPEREUTECTOIDE.....	56
3.3	ESTRUCTURAS DE LOS ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.....	57
3.4	TAMAÑO DE GRANO DE LOS ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.....	58
3.5	ALEACION DE LOS ACEROS.....	58
3.5.1	ELEMENTOS ALEANTES EN LOS ACEROS.....	59
3.5.1.1	Carbono.....	59
3.5.1.2	Silicio.....	59
3.5.1.3	Manganeso.....	60
3.5.1.4	Azufre.....	60
3.5.1.5	Fósforo.....	60
3.6	PROPIEDADES DE LOS ACEROS Y PRUEBAS MECANICAS.....	60
3.6.1	RESISTENCIA A LA TRACCION.....	61
3.6.2	RESISTENCIA A LA COMPRESION.....	62
3.6.3	RESISTENCIA A LA TORSION.....	62
3.6.4	DUCTILIDAD.....	63
3.6.5	TENACIDAD.....	63
3.6.6	DUREZA.....	64
3.7	DIFUSION EN LOS MATERIALES.....	65
3.7.1	MECANISMOS DE DIFUSION.....	67

---

3.7.1.1	Difusión por Vacantes.....	67
3.7.1.2	Difusión Intersticial.....	68
3.7.2	DIFUSION EN ESTADO ESTACIONARIO.....	69
3.7.3	DIFUSION EN ESTADO NO ESTACIONARIO.....	71
3.7.4	FACTORES DE LA DIFUSION.....	73
3.7.4.1	Substancias que difunden.....	73
3.7.4.2	Temperatura.....	73
3.7.5	OTROS TIPOS DE DIFUSION.....	74
3.8	MICROESTRUCTURA Y ESFUERZOS RESIDUALES EN LOS METALES.....	75
3.8.1	COMPORTAMIENTO ANISOTROPICO.....	75
3.8.2	ESFUERZOS RESIDUALES.....	76
3.9	PROPIEDADES DE LOS METALES DEFORMADOS PLASTICAMENTE.....	77
3.9.1	ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION.....	78
3.9.2	RECRISTALIZACION.....	79
3.9.2.1	Temperaturas de recristalizacion.....	80
3.10	COMPARACION ENTRE EL TRABAJO EN CALIENTE Y TRABAJO EN FRIO DE LOS METALES.....	81
3.10.1	IMPORTANCIA DEL TRABAJO EN FRIO Y RECOCIDO EN LA INGENIERIA.....	81
3.11	MATERIALES APLICADOS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....	82
3.11.1	EL ACERO AL CARBONO Y ACEROS ALEADOS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....	85
3.11.2	LOS METALES Y ALEACIONES NO FERROSOS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.....	86
3.11.3	LAS CARACTERISTICAS METALURGICAS DE LA SOLDADURA POR FRICCION.....	87
3.11.3.1	Ligaduras interfaciales en los metales soldados por fricción.....	91
3.12	MATERIALES A EMPLEAR EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION EN ESTE TRABAJO DE TESIS.....	94

---

<b>CAPITULO 4.</b>	
<b>CARACTERIZACION MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA.....</b>	<b>98</b>
4.1 BREVE DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA SOLDAR POR FRICCION.....	99
4.2 PREPARACION DE LAS PIEZAS A SOLDAR.....	102
4.3 PROCEDIMIENTO PARA UTILIZAR LA MAQUINA DE SOLDADURA Y PARA REALIZAR LAS PROBETAS DE SOLDADURA POR FRICCION.....	104
4.4 TABLA DE PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA.....	107
4.5 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA EL ANALISIS DE LAS PROBETAS SOLDADAS.....	109
4.5.1 PREPARACION DE LAS PROBETAS SOLDADAS PARA METALOGRAFIA.....	109
4.5.1.1 Corte de las probetas.....	109
4.5.2 METALOGRAFIA DE LAS PROBETAS.....	111
4.5.3 MICROSCOPIA ELECTRONICA.....	112
4.5.4 ENSAYO DE DUREZA SUPERFICIAL (ROCKWELL B).....	113
4.5.5 ENSAYO DE TRACCION.....	115
4.6 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE CADA PROBETA.....	118
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>132</b>
<b>APENDICES.....</b>	<b>134</b>
APENDICE A.....	135
APENDICE B.....	143

---

# INTRODUCCION.

En la primera mitad del siglo XX se desarrolló la gran mayoría de los procesos de soldadura, que llegaron a sustituir a las uniones hechas con tornillos y remaches. La soldadura es una técnica fundamental que impulsa el desarrollo de las industrias que se dedican a la manufactura de los metales. El tipo de soldadura más adecuado para unir dos metales, depende de sus propiedades físicas de éstos y de la función a la que estará destinada la pieza soldada. La soldadura, a grandes rasgos, se puede entender como la unión de dos materiales de características similares o no similares por una serie de procesos convencionales y no convencionales. Existen procesos especializados para unir materiales idénticos y diferentes.

En este trabajo nos enfocaremos en una técnica de soldadura, **la soldadura por fricción**, que surgió alrededor de los años 40's, pero tuvo un mayor desarrollo en la década de los 60's, gracias a las investigaciones realizadas. Este tipo de soldadura entra dentro de los procesos de soldadura de estado sólido, que es un grupo de procesos de soldadura que produce la unión por medio de la aplicación de presión a temperaturas por debajo del punto de fusión del metal base, sin la necesidad de un metal de aporte.

Entre los retos a los que se enfrenta el ingeniero de manufactura está el determinar cuál proceso de unión producirá las mejores propiedades con un menor costo. Sin embargo, no existe una respuesta universal y simple, y es que cualquier cambio, en la geometría de las partes, en el material, en el valor del producto final, en el tamaño de la producción o en la disponibilidad de equipo influye en la selección del método de unión. Durante la soldadura, un gran porcentaje de la falla de productos ocurre en las zonas de unión entre las partes porque, usualmente, es ahí donde se localizan los puntos de mayor esfuerzo y, por lo tanto, llega a ser la parte más débil del ensamble. Así la atención que se preste al proceso de unión puede traducirse en grandes beneficios en cuanto a la confiabilidad del producto y la economía del proceso de manufactura.

Por otro lado, otro de los retos que tienen la industria manufacturera es la de realizar soldadura con buenas propiedades entre metales de distintas propiedades tanto físicas como mecánicas. No todos los procesos existentes logran unir metales distintos de manera eficiente, es por eso que existe la necesidad de investigar nuevas tecnologías para eficientar tales procesos; además la unión de metales distintos tiene ventajas principalmente económicas, ya que se pueden realizar ensambles de piezas de metales diferentes donde se requiere que cumplan distintas funciones, en lugar de hacer dichas ensamble de un solo metal, el cual no tendría esa misma funcionalidad y no se vería un ahorro sustancial en su fabricación.

---

Este trabajo tiene como objetivo el de realizar la **caracterización de la soldadura por fricción de la unión de acero 1018 con acero 1018 y la evaluación del proceso de soldadura por fricción entre las uniones acero 1018 con acero 1018 y aluminio 6061 T6 con acero 1018**; y desprender de este una serie de conclusiones importantes sobre este estudio.

La decisión de utilizar acero 1018 fue por que es un acero de bajo contenido de carbono y que para este estudio fue el más conveniente ya que es un acero fácil de maquinar y se cuenta en barras cilíndricas roladas en frío dentro de el almacén del CDM (Centro de Diseño y Manufactura) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en donde se realizó esta tesis, así también la selección del aluminio 6061 T6 fue por que se necesita un aluminio que tuviera mejores propiedades físicas y mecánicas, que fuera uno de los más comerciales y que fuera útil para la realización de este trabajo.

En el capítulo 1 daremos un breve recorrido por la historia de la soldadura; también hablaremos de los procesos de soldadura más comunes y mencionaremos a grandes rasgos algunas de sus características y por último hablaremos de la importancia de la soldadura en el mundo.

En el capítulo 2 hablaremos del proceso de soldadura por fricción; haremos una breve descripción de los diferentes métodos de soldadura por fricción, y de los parámetros importantes en este proceso, y mencionaremos las principales ventajas y limitaciones de este proceso.

En el capítulo 3 daremos una breve descripción de las propiedades de los materiales que se utilizaron en este trabajo, en cuanto a su composición, propiedades mecánicas, a sus estructuras y elementos aleantes. También se hablará, a grandes rasgos, de las principales pruebas mecánicas aplicadas a los materiales, así como del papel que juega el fenómeno de difusión en el proceso de soldadura por fricción. Para el aluminio se recuerda que solo se utilizará para la evaluación del proceso de soldadura por fricción en las uniones de materiales idénticos y materiales distintos, por tanto las características del aluminio se citan de forma general al término de este capítulo.

En el capítulo 4 daremos una breve descripción del proceso que se siguió para la obtención de las probetas de soldadura, así como el procedimiento que se siguió para el análisis de dichas probetas y los datos arrojados por las pruebas de dureza y tracción realizadas; por último se dará una interpretación de los resultados obtenidos.

Posteriormente presentaremos las conclusiones, así como las sugerencias a las que se llegaron con el trabajo realizado; y por último se presenta la bibliografía en que se basó este trabajo.

---

# CAPITULO 1.

## DESARROLLO E IMPORTANCIA DE LA SOLDADURA.

La soldadura surgió desde que el hombre vio la necesidad de realizar uniones entre metales. Al principio estas uniones se realizaban calentando y golpeando los metales, por lo cual la soldadura era considerada en un principio como un proceso artesanal. La invención de la soldadura eléctrica en el siglo XIX revolucionó la forma de realizar uniones de metales, hasta conseguir la creación de procesos cada vez más sofisticados y más versátiles en lo que respecta a la unión de metales no ferrosos.

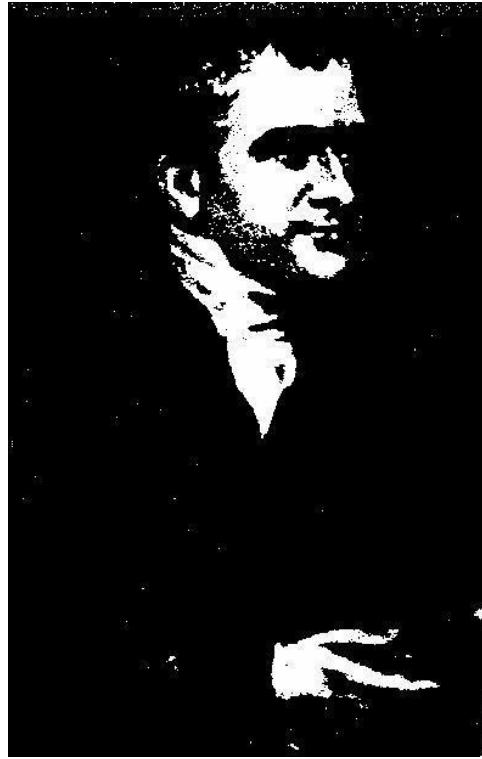
En este capítulo se mencionará, a grandes rasgos, la historia de la soldadura; también la descripción de algunos procesos de soldadura, así como la importancia de la soldadura en las actividades humanas.

### 1.1 BREVE HISTORIA DE LA SOLDADURA.

La gran mayoría de los procesos de soldadura de metales han sido inventados en los últimos años, pero la soldadura ha sido practicada desde que la humanidad aprendió a trabajar los metales. Tuvo sus inicios con la llamada **soldadura por forja** o de fragua que tiene una larga historia. Esta era la única forma conocida para soldar hierro que consistía en calentar las piezas de hierro en un horno o forja hasta que se ablandaba el metal, después, valiéndose del martilleo, se les fusionaba hasta formar una unidad. La soldadura evolucionó primeramente como técnica de principal importancia económica cuando se extendió el uso del hierro, siendo necesaria no solo para poder hacer el acabado de productos, sino también como parte del proceso mismo de fabricación de hierro.

---

La soldadura, tal como la conocemos actualmente, fue descubierta en el siglo XIX. Se le atribuye a sir Humphry Davy, (FIGURA 1.1), de Inglaterra, el haber proporcionado las bases para la soldadura moderna merced a dos descubrimientos. Uno, el del acetileno y otro, la producción de un arco entre dos electrodos de carbono sirviéndose de una batería. La soldadura eléctrica fue inventada a principios del siglo XIX, en plena revolución industrial cuando se inventó el generador eléctrico. Era considerado un proceso crudo, sucio y primitivo, en el que el único requisito era derretir un poco de metal entre dos piezas, de manera que éstas se unieran; tal proceso aprovecha el intenso calor que produce un arco voltaico, el cual se forma cuando fluye una corriente entre dos electrodos separados.



**FIGURA 1.1 .- SIR HUMPRY DAVY**

Durante el periodo de 1877-1903 se desarrollaron la soldadura y el corte con gas. Se desarrolló la soldadura de arco eléctrico utilizando el arco de carbono y el arco metálico, y la soldadura de resistencia, en gran parte como la conocemos actualmente, se convirtió en un proceso práctico de unión. La soldadura por arco de tungsteno con gas tuvo sus inicios a partir de una idea de C. L. Coffin para soldar en una atmósfera de gas no oxidante. El concepto fue refinado al final de los años veinte por H. M. Hobart, cuando usó helio como protección, y por P. K. Denvers, quien uso argón. La amenaza de la Segunda Guerra Mundial creó la necesidad de soldar el magnesio para construir aviones de combate. El proceso de Hobart y Denvers, era ideal para soldar magnesio, acero inoxidable y aluminio. Fue perfeccionado y patentado por Meredith, quien le llamó soldadura "Heliarc".

El otro concepto ideado por Hobart y Denvers fue el proceso de soldadura por arco de metal con protección con gas, exitosamente desarrollado en el Battelle Memorial Institute, en 1948, bajo el patrocinio de Air Reduction Company. Este desarrollo utilizaba un arco de protección con gas similar al del tungsteno con un alambre de electrodo alimentado continuamente.

---

En 1953, Lyubavskii y Novoshilov anunciaron el uso de la soldadura con electrodos consumibles en un ambiente de CO<sub>2</sub>. El proceso de soldadura con CO<sub>2</sub> fue aceptado de inmediato, puesto que utilizaba equipo desarrollado para soldadura por arco de metal con gas inerte y ahora podía utilizarse para soldar aceros de modo económico.

El proceso de soldadura por arco con plasma, el cual es muy similar a la soldadura por arco de tungsteno con gas, fue inventado por Gage en 1957. El proceso de soldadura por haz de electrones fue desarrollado en Francia a mediados de los años cincuenta.

La soldadura por fricción fue desarrollada en la Unión Soviética en los 40's, pero se hicieron investigaciones adicionales en Gran Bretaña y EE. UU en 1960.

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es una técnica fundamental en la industria del motor, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier producto hecho con metales.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles. Los procesos de soldadura se clasifican según las fuentes de presión y calor utilizadas.<sup>1</sup>

## 1.2 ALGUNAS DEFINICIONES BASICAS.

Para comprender que es la soldadura es necesario estar familiarizado con algunos de los términos básicos usados por la industria. Primeramente tendríamos que hacernos una pregunta: ¿Qué es soldar?; la definición que comúnmente se utiliza es: *Soldar es el proceso por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldar.*

La American Welding Society (AWS) define el proceso así: ***“la operación de soldar es un proceso de unión de materiales que produce su coalescencia calentándolos a temperatura de soldado, con o sin la aplicación de presión, o por medio de la aplicación de presión solamente y con o sin el uso de material de aporte, el cual se usa en trabajos de soldadura”***. Coalescencia significa adherirse uno a otro o adherir a un cuerpo los materiales que se sueldan.

---

<sup>1</sup> Henry Horwitz, P.E. .- Soldadura: aplicaciones y práctica Editorial Alfaomega, Massachussets E.U.A.



---

La palabra "coalescencia" ya no se *usa* en todas las definiciones del proceso de soldadura, puesto que estas definiciones usan la palabra "soldadura" como se definió antes. Las siguientes definiciones dadas por Howard B.Cary <sup>2</sup> son de gran importancia, ya que serán utilizadas durante el desarrollo del tema.

El **ensamble de soldadura** es un conjunto de partes unidas con soldadura, y puede hacerse a partir de muchas o pocas partes metálicas. Pueden ser metales de diferentes composiciones y las piezas pueden estar laminadas, en hoja, placa, tubo, forjadas o fundidas. Para producir una soldadura utilizable debe haber uniones soldadas entre las diversas piezas que constituyen el ensamble.

La **unión** se define como: "la unión de los miembros o de los fillos de los miembros que se van a unir o que han sido unidos".

El **metal de aporte** es "el metal o aleación que deberá añadirse al hacer una unión con soldadura ordinaria, soldadura fuerte o soldadura blanda".

El **metal base**, se define como "el material que está siendo sometido a una soldadura ordinaria, una soldadura blanda o un corte".

A continuación describiremos brevemente algunos procesos de soldadura.

### **1.3 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA.**

La mayor parte de los procesos de soldadura se pueden separar en dos categorías: soldadura por presión, que se realiza sin la aportación de otro material mediante la aplicación de la presión suficiente y normalmente ayudada con calor, y soldadura por fusión, realizada mediante la aplicación de calor en las superficies, que se funden en la zona de contacto, con o sin aportación de otro metal.

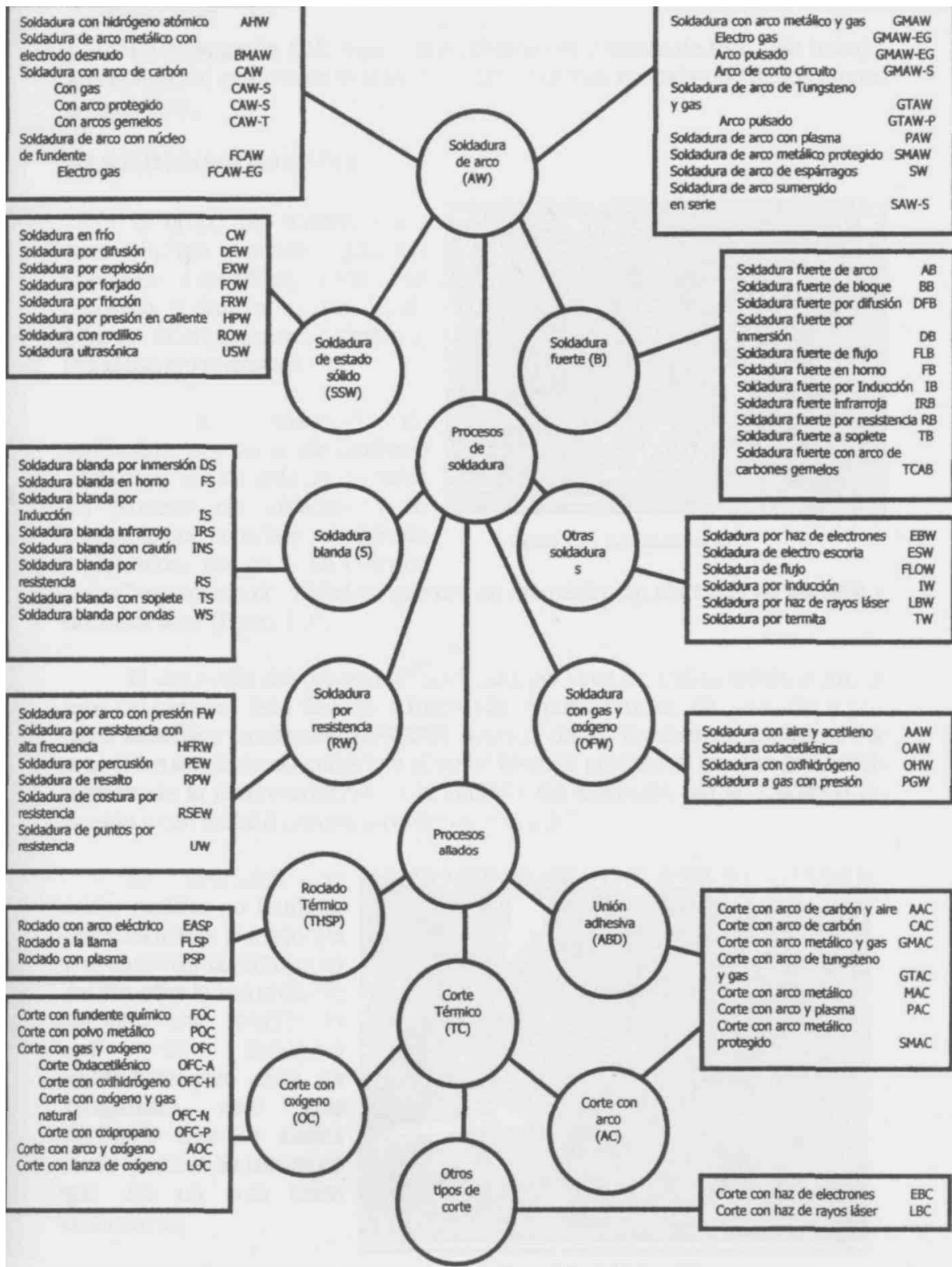
Se distingue también entre soldadura blanda y soldadura fuerte, según sea la temperatura de fusión del metal de aportación empleado; la soldadura blanda utiliza metales de aportación cuyo punto de fusión es inferior a los 450 °C, y la fuerte utiliza metales con temperaturas superiores.

Existen diversos procesos de soldadura los que difieren en el modo en que se aplica el calor o la energía para la unión. Para lograr la soldadura algunos procesos requieren sólo de fuerza para la unión, otros requieren de un metal de aporte y energía térmica que funde a dicho metal. Cada uno de los diferentes procesos de soldadura tienen sus características particulares de ingeniería y sus costos específicos. Una manera general de agruparlos es la clasificación que hace la American Welding Society (AWS) que se muestra a continuación:

---

<sup>2</sup> Howard B. Cary .- Manual de Soldadura Moderna – Tomo 1 2ª edición Editorial Prentice Hill Hispanoamericana.

\* [http:// www.aws.org](http://www.aws.org) y [http:// www.historywelding.org](http://www.historywelding.org)



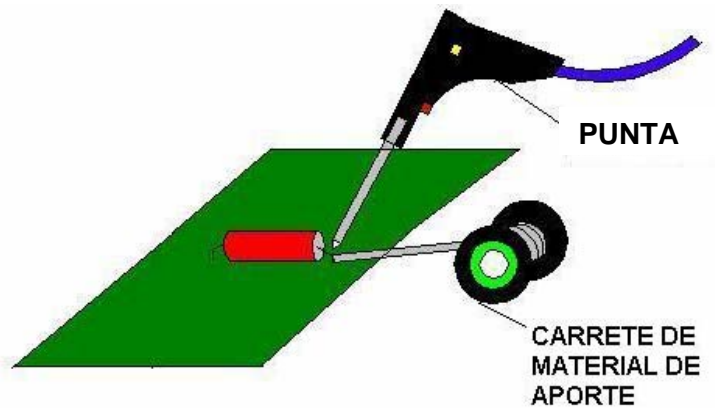
**FIGURA 1.2 .- CLASIFICACION DE LA AWS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA.**

---

A continuación se hace una descripción de los procesos de soldadura más utilizados en los procesos industriales.

### 1.3.1 SOLDADURA BLANDA.

Es la unión de dos piezas de metal por medio de otro metal llamado de aporte, éste se aplica entre ellas en estado líquido (FIGURA 1.3). La temperatura de fusión de estos metales no es superior a los 450°C. En este proceso se produce una aleación entre los metales y con ello se logra una adherencia que genera la unión. En los metales de aporte por lo regular se utilizan aleaciones de plomo y estaño los que funden entre los 180 y 370°C.



**FIGURA 1.3 .- SOLDADURA BLANDA.**

Este tipo de soldadura es utilizado para la unión de piezas que no estarán sometidas a grandes cargas o fuerzas. Una de sus principales aplicaciones es la unión de elementos en circuitos eléctricos. Por lo regular el metal de aporte se funde por medio de un cautín y fluye por capilaridad.

Elementos necesarios:

- Carrete de hilo de aleación de estaño o plomo como material de aporte.
- Punta (tipo lapicero o pistola).

Principales Ventajas:

- Facilidad en manejo del equipo.
- Bajo costo de equipo.
- Unión de piezas que no están sometidas a cargas.

Principales aplicaciones:

- Unión de elementos a circuitos eléctricos.

Principales desventajas:

- Preparación y limpieza de las piezas.
- Aplicable a dispositivos electrónicos.

---

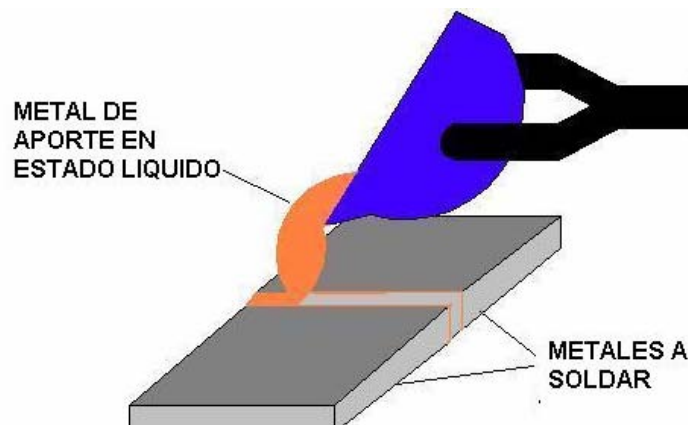
### 1.3.2 SOLDADURA FUERTE.

En esta soldadura se aplica también metal de aporte en estado líquido, pero este metal, por lo regular no ferroso, tiene su punto de fusión superior a los 450 °C y menor que la temperatura de fusión del metal base. Por lo regular se requiere de fundentes especiales para remover los óxidos de las superficies a unir y aumentar la fluidez al metal de aporte. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata. A continuación se presentan algunos de los más utilizados para las soldaduras denominadas como fuertes:

1. Cobre. Su punto de fusión es de 1083°C.
2. Bronces y latones con punto de fusión entre los 870 y 1100°C.
3. Aleaciones de plata con temperaturas de fusión entre 630 y 845°C.
4. Aleaciones de aluminio con temperatura de fusión entre 570 y 640°C.

La soldadura fuerte se puede clasificar por la forma en la que se aplica el metal de aporte. A continuación se describen algunos de estos métodos:

*Inmersión.* Aquí el metal de aporte previamente fundido se introduce entre las dos piezas que se van a unir, (FIGURA 1.4), cuando este se solidifica las piezas quedan unidas.



**FIGURA 1.4 .- SOLDADURA POR INMERSIÓN.**

---

Elementos necesarios:

- Fuente de calor.
- Material de aporte (baño en aleaciones de latón).
- Fundente.

Principales Ventajas:

- Permite hacer la soldadura fuerte de muchas juntas a la vez.
- No se necesita fundente para algunas aplicaciones.

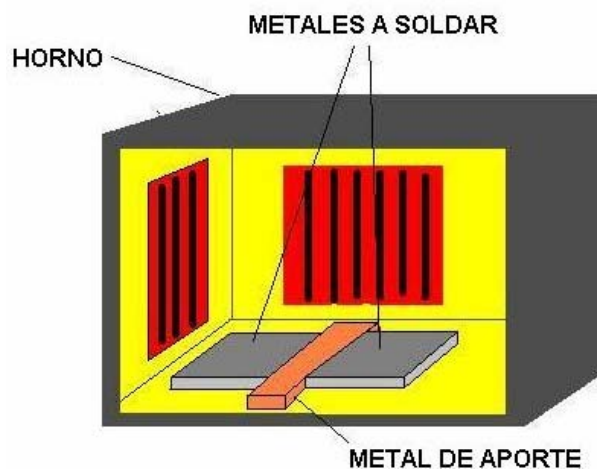
Principales aplicaciones:

- Elaboración de canastos de alambre.
- Ensamblajes hechos de tiras metálicas angostas.

Principales desventajas:

- Las partes deben estar limpias y bien untadas de fundente.
- El baño debe ser grande para que sea bajo el descenso de temperatura al hacer la inmersión.
- Ocurre cierta oxidación durante el periodo de enfriamiento.

*Horno.* Consiste en que el metal de aporte en estado sólido se pone entre las piezas a unir, estas son calentadas en un horno de gas o eléctrico, para que con la temperatura se derrita al metal de aporte, (FIGURA 1.5), y se genere la unión al enfriarse.



**FIGURA 1.5 .- SOLDADURA POR HORNO**

---

Elementos necesarios:

- Horno eléctrico o de gas.
- Atmósfera reductora.
- Material de aporte (pasta, trozos, polvo o rociado de metal fundido de cobre, latón y plata).

Principales Ventajas:

- No se producen esfuerzos residuales.
- Control de la carburización y descarburización.
- No se necesita fundente para algunas aplicaciones.

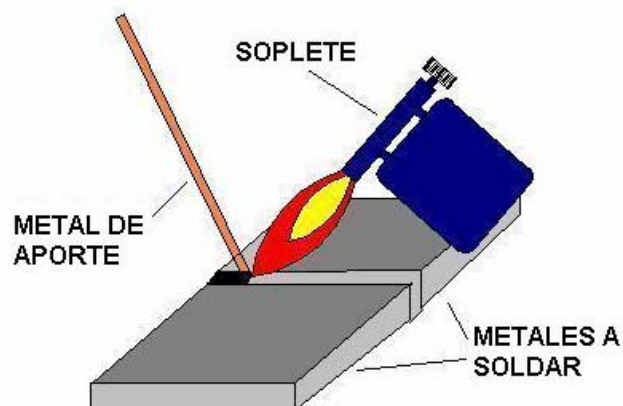
Principales aplicaciones:

- Para partes que requieran de calentamiento rápido.
- Con ensambles que se presenten a suspensión en dispositivos.

Principales desventajas:

- Peligro de explosión con partes húmedas.
- Arrastre de sal.
- Ocurre cierta oxidación durante el periodo de enfriamiento.

*Soplete.* El calor se aplica con un soplete de manera local en las partes del metal a unir, el metal de aporte en forma de alambre se derrite en la junta (FIGURA 1.6). El soplete puede funcionar por medio de oxiacetileno o hidrógeno y oxígeno.



**FIGURA 1.6 .- SOLDADURA POR SOPLETE.**

---

Elementos necesarios:

- Soplete.
- Combustible (acetileno, hidrógeno, metano.
- Comburente (oxígeno o aire).
- Material de aporte (latón, bronce fosforado y al manganeso, plata y cobre).

Principales Ventajas:

- Método flexible aplicable a muchísimos ensambles.
- El equipo es de bajo costo.
- El calor se puede aplicar de forma localizada.

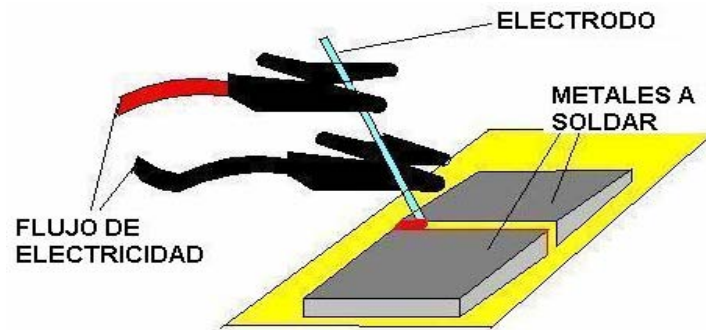
Principales aplicaciones:

- En ensambles en los que es impráctico la autoalineación.
- En bajas producciones.

Principales desventajas:

- La pieza de trabajo se oxida.
- Los metales de base son limitados.
- El calentamiento localizado ocasiona deformación.

*Electricidad.* La temperatura de las partes a unir y del metal de aporte se puede lograr por medio de resistencia a la corriente, por inducción o por arco, en los tres métodos el calentamiento se da por el paso de la corriente entre las piezas metálicas a unir (FIGURA 1.7).



**FIGURA 1.7 .- SOLDADURA POR ELECTRICIDAD.**

Elementos necesarios:

- Fuente de energía.
- Electrodo.
- Porta electrodos.
- Cables de corriente.

Principales Ventajas:

- Calentamiento localizado rápido.
- Efectivo para soldaduras largas de costura.
- Periodo corto de adiestramiento del operador.

Principales aplicaciones:

En donde se necesitan combinaciones de calor y presión.

Principales desventajas:

- Es posible que ocurra deformación.
- El tamaño del ensamble es limitado.
- Es necesario el manejo individual.<sup>4</sup>

### 1.3.3 SOLDADURA POR FORJA.

Es el proceso de soldadura más antiguo, consiste en el calentamiento de las piezas a unir en una fragua hasta su estado plástico y posteriormente por medio de presión o golpeteo se logra la unión de las piezas (FIGURA 1.8). En este procedimiento no se utiliza metal de aporte y la limitación del proceso es que sólo se puede aplicar en piezas pequeñas y en forma de lámina. La unión se hace del centro de las piezas hacia afuera y debe evitarse a como de lugar la oxidación, para esto se utilizan aceites gruesos con un fúndente, por lo regular se utiliza bórax combinado con sal de amonio.

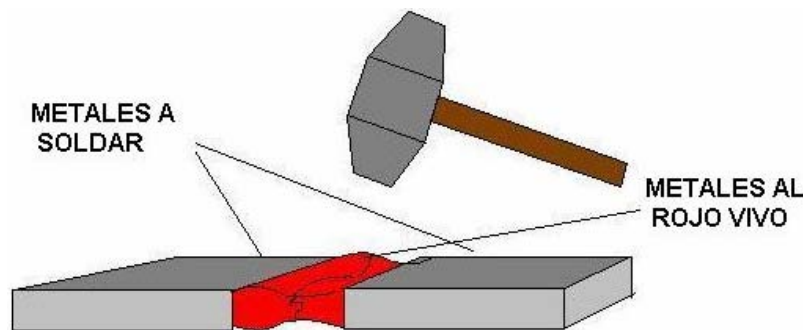


FIGURA 1.8 .- SOLDADURA POR FORJA.

Elementos necesarios:

- Horno o fragua.
- Martillo o mazo.
- Yunque de apoyo.
- Pinzas (para el manejo del material caliente).
- Fundentes (bórax con sal de amonio).

<sup>4</sup> Henry Horwitz, P.E. .- Soldadura: Aplicaciones y Práctica Editorial AlfaOmega Massachussets E.U.A.



---

Principales Ventajas:

- Unión de metales de distinto tipo.
- A falta de fuente de calor, por medio de martilleo, se pueden soldar piezas.

Principales aplicaciones:

- Para la unión de metales disímiles.
- Elaboración de utensilios simples.

Principales desventajas:

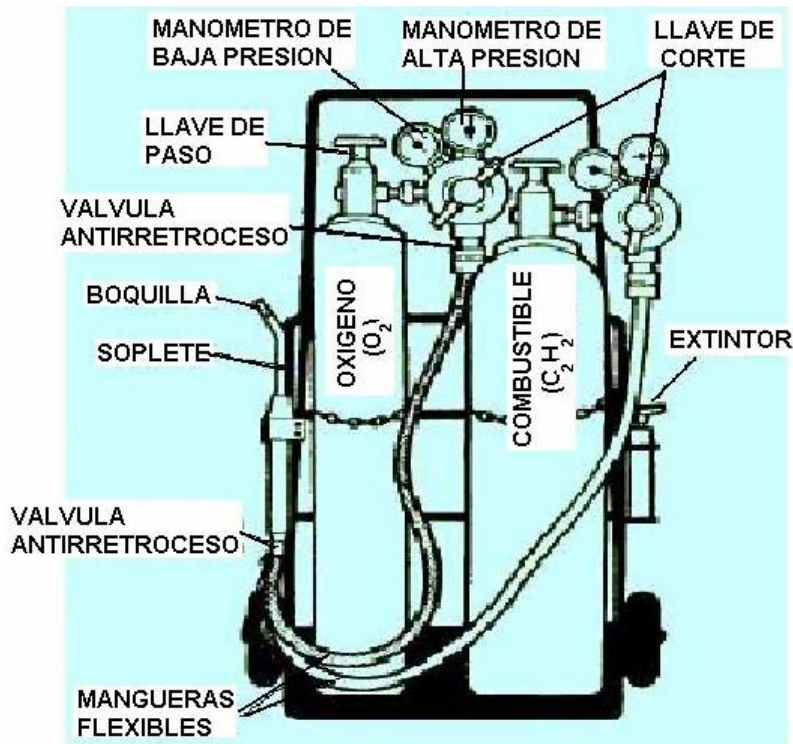
- La unión no es muy buena tiene fallas y aberturas en el ensamble.
- Los metales no se pueden unir completamente.
- Proceso lento y existe la posibilidad de que se forme una costra de óxido en la superficie.

### **1.3.4 SOLDADURA CON GAS.**

Este proceso incluye a todas las soldaduras que emplean gas para generar la energía necesaria para fundir el material de aporte. Los combustibles más utilizados son el acetileno y el hidrógeno los que al combinarse con el oxígeno, como comburente generan las soldaduras autógena y oxhídrica.

La soldadura oxhídrica es producto de la combinación del oxígeno y el hidrógeno en un soplete. El hidrógeno se obtiene de la electrólisis del agua y la temperatura que se genera en este proceso es entre 1500 y 2000°C.

La soldadura autógena se logra al combinar al acetileno y al oxígeno en un soplete. Se conoce como autógena porque con la combinación del combustible y el comburente se tiene autonomía para ser manejada en diferentes medios. Uno de los mayores problemas del acetileno es que no se puede almacenar a presión por lo que este gas se puede obtener por medio de generadores de acetileno o bien en cilindros los que para soportar un poco la presión 1.7 MPa, se les agrega acetona (FIGURA 1.9).



**FIGURA 1.9 .- SOLDADURA CON GAS.**

En los sopletes de la soldadura autógena se pueden obtener tres tipos de flama las que son reductora, neutral y oxidante. De las tres la neutral es la de mayor aplicación. Esta flama, está balanceada en la cantidad de acetileno y oxígeno que utiliza. La temperatura en su cono luminoso es de 3500°C, en el cono envolvente alcanza 2100°C y en la punta extrema llega a 1275°C.

En la flama reductora o carburante, hay exceso de acetileno lo que genera que entre el cono luminoso y el envolvente exista un cono color blanco cuya longitud esta definida por el exceso de acetileno. Esta flama se utiliza para la soldadura de monel, níquel, ciertas aleaciones de acero y muchos de los materiales no ferrosos.

La flama oxidante tiene la misma apariencia que la neutral excepto que el cono luminoso es más corto y el cono envolvente tiene más color, Esta flama se utiliza para la soldadura por fusión del latón y bronce. Una de las derivaciones de este tipo de flama es la que se utiliza en los sopletes de corte en los que la oxidación súbita genera el corte de los metales.

En los sopletes de corte se tiene una serie de flamas pequeñas alrededor de un orificio central, por el que sale un flujo considerable de oxígeno puro que es el que corta el metal. En algunas ocasiones en la soldadura autógena se utiliza aire como comburente, lo que genera que la temperatura de esta flama sea menor en un 20% que la que usa oxígeno, por lo que su uso es limitado a la unión sólo de algunos metales como el plomo.

---

En los procesos de soldadura con gas se pueden incluir aquellos en los que se calientan las piezas a unir y posteriormente, sin metal de aporte, se presionan con la suficiente fuerza para que se genere la unión.

Elementos necesarios:

- Soplete.
- Soplete de corte.
- Tanque de oxígeno.
- Tanque de acetileno, gas natural o hidrógeno.
- Metal de aporte (hierro cobrizado) (opcional).

Principales aplicaciones:

- Aplicable a prácticamente todos los metales.
- Puede ser utilizado el proceso tanto para soldar como para cortar.

Principales Ventajas:

- Se pueden soldar piezas sin necesidad de metal de aporte.
- Unión de piezas de bajo y medio espesor.
- Se pueden cortar piezas de medio espesor.

Principales desventajas:

- Personal capacitado para el manejo del equipo.
- Mantenimiento frecuente del equipo.

### **1.3.5 SOLDADURA POR RESISTENCIA.**

El principio del funcionamiento de este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir, como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en sus cuerpos se generará el aumento de temperatura, aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La corriente eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce el voltaje de 120 o 240 a 4 o 12 V, y se eleva el amperaje considerablemente para aumentar la temperatura. La soldadura por resistencia es aplicable a casi todos los metales, excepto el estaño, zinc y plomo.

Elementos necesarios:

- Transformador.
- Electrodo de cobre (no consumible).
- Porta electrodos.

Principales aplicaciones:

- Unión de metales de bajo calibre.
- Se pueden soldar prácticamente todos los metales.

Principales Ventajas:

- No requiere material de aporte.
- Electrodo no consumible.
- Unión de metales de diferente composición química.

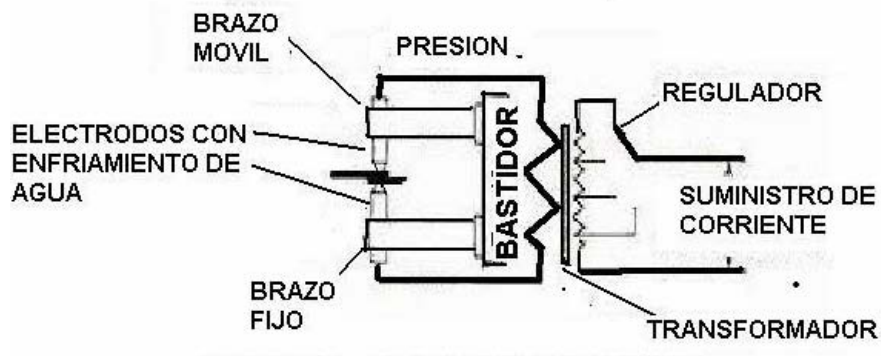
Principales desventajas:

- Unión de metales de bajo espesor.
- Alto costo de equipo.
- Metales como el zinc, estaño y plomo se dificulta soldarlos.

En los procesos de soldadura por resistencia se incluyen los de:

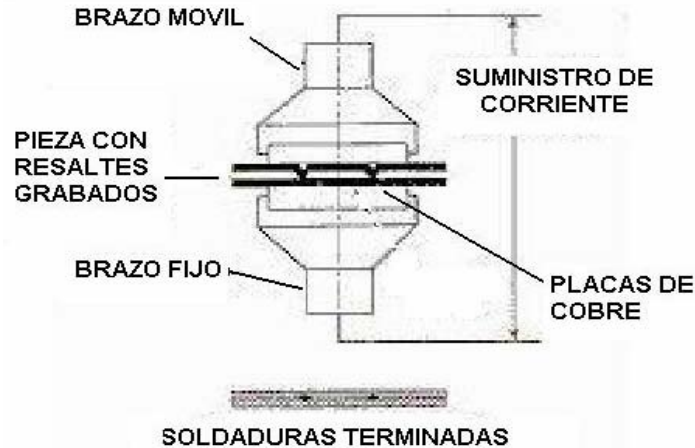
- soldadura por puntos.*
- soldadura por resaltes.*
- soldadura por costura.*
- soldadura a tope.*

*La soldadura por puntos.* (FIGURA 1.10) Consiste en pasar corriente eléctrica por dos electrodos con punta, debido a la resistencia del material a unir se logra el calentamiento y con la aplicación de presión sobre las piezas se genera un punto de soldadura. Las máquinas soldadoras de puntos pueden ser fijas o móviles o bien estar acopladas a un robot o brazo mecánico.



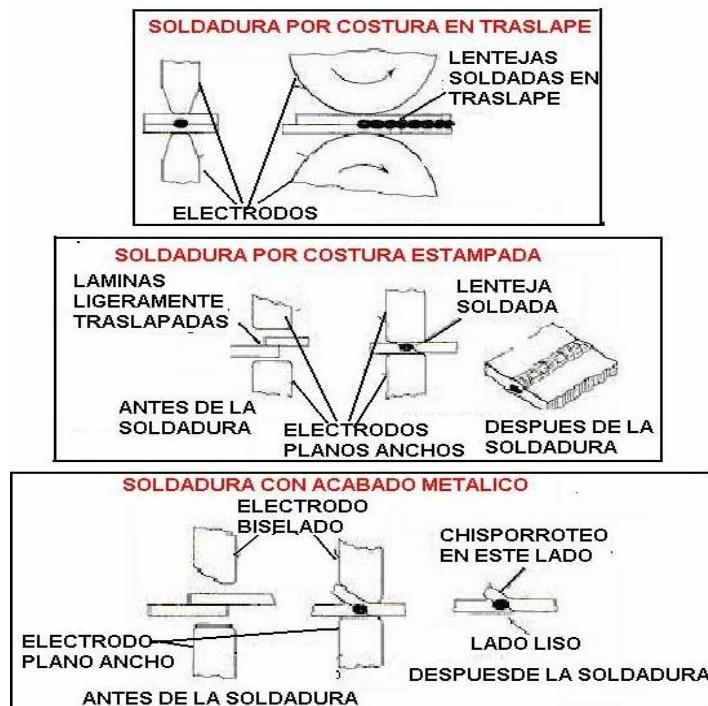
**FIGURA 1.10 .- SOLDADURA POR PUNTOS.**

La soldadura con resaltes es un proceso similar al de puntos, sólo que en esta se producen varios puntos a la vez en cada ocasión que se genera el proceso. Los puntos están determinados por la posición de un conjunto de puntas que hacen contacto al mismo tiempo (FIGURA 1.11).



**FIGURA 1.11 .- SOLDADURA CON RESALTES**

La soldadura por costura. (FIGURA 1.12) Consiste en el enlace continuo de dos piezas de lámina traslapadas. La unión se produce por el calor obtenido por la resistencia al paso de la corriente y la presión constante que se ejerce por dos electrodos circulares. Este proceso de soldadura es continuo.



**FIGURA 1.12 .- SOLDADURA POR COSTURA.**

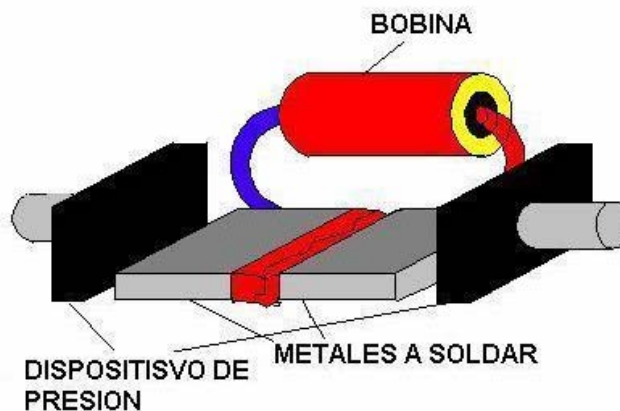
La soldadura a tope consiste en la unión de dos piezas con la misma sección, éstas se presionan cuando está pasando por ellas la corriente eléctrica (FIGURA 1.13), con lo que se genera calor en la superficie de contacto. Con la temperatura generada y la presión entre las dos piezas se logra la unión.



**FIGURA 1.13 .- SOLDADURA A TOPE.**

### 1.3.6 SOLDADURA POR INDUCCION.

Esta soldadura se produce al aprovechar el calor generado por la resistencia que se tiene al flujo de la corriente eléctrica inducida en las piezas a unir, (FIGURA 1.14). Por lo regular esta soldadura se logra también con presión. Consiste en la conexión de una bobina a los metales a unir, y debido a que en la unión de los metales se da más resistencia al paso de la corriente inducida en esa parte es en la que se genera el calor, lo que con presión genera la unión de las dos piezas. La soldadura por inducción de alta frecuencia utiliza corrientes con el rango de 200,000 a 500,000 Hz. de frecuencia, los sistemas de soldadura por inducción normales sólo utilizan frecuencias entre los 400 y 450 Hz.



**FIGURA 1.14 .- SOLDADURA POR INDUCCION.**

---

Elementos necesarios:

- Bobina inductora de corriente de alta frecuencia.
- Cables de corriente.
- Dispositivo de presión.
- Material de aporte (plata de níquel y cobre) (opcional).

Principales aplicaciones:

- Aplicaciones en las que las juntas no sea demasiado profundas y los componentes no sean demasiados pesados.
- En la fabricación de recipientes sellados y estructuras de material plano.

Principales Ventajas:

- Calentamiento rápido y localizado.
- Adaptado a la producción en masa.
- Es aplicable en la mayoría de los metales.

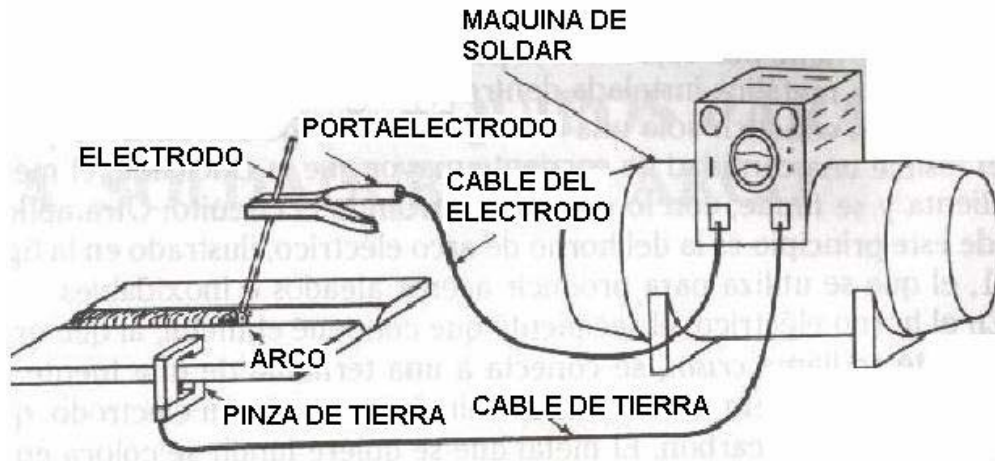
Principales desventajas:

- Deformación posible debido al calentamiento local.
- Dificultad de controlar la temperatura.

### **1.3.7 SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO.**

Es el proceso en el que su energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma entre la pieza y un electrodo (FIGURA 1.15). Por lo regular el electrodo también sirve de metal de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, para que así pueda ser depositado entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5,500°C.

La corriente que se utiliza en el proceso puede ser directa o alterna, utilizándose en la mayoría de las veces la directa, debido a la energía es más constante con lo que se puede generar un arco estable. Las máquinas para corriente directa se construyen con capacidades hasta de 1,000 A, con corrientes de 40 a 95 V. Mientras se efectúa la soldadura el voltaje del arco es de 18 a 40 A.



**FIGURA 1.15 .- SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO.**

Para la generación del arco existen los siguientes electrodos:

- a. Electrodo de carbón. En la actualidad son poco utilizados, el electrodo se utiliza sólo como conductor para generar calor, el metal de aporte se agrega por separado.
- b. Electrodo metálico. El propio electrodo sirve de metal de aporte al derretirse sobre los materiales a unir. Se pueden utilizar para estos electrodos máquinas para soldar de corriente directa o alterna, las segundas constan de transformadores estáticos, lo que genera bajos costos de mantenimiento e inversión inicial. Existen máquinas de 150, 200, 300, 500, 750 y 1000 A.
- c. Electrodos recubiertos. Los electrodos metálicos con un recubrimiento que mejora las características de la soldadura son los más utilizados en la actualidad, las funciones de los recubrimientos son las siguientes:
  - Proporcionan una atmósfera protectora.
  - Proporcionan escoria de características adecuadas para proteger al metal fundido.
  - Facilita la aplicación de sobre cabeza.
  - Estabiliza el arco.
  - Añade elementos de aleación al metal de la soldadura.
  - Desarrolla operaciones de enfriamiento metalúrgico.
  - Reduce las salpicaduras del metal.
  - Aumenta la eficiencia de deposición.
  - Elimina impurezas y óxidos.
  - Influye en la profundidad del arco.
  - Influye en la formación del cordón.
  - Disminuye la velocidad de enfriamiento de la soldadura.



---

Las composiciones de los recubrimientos de los electrodos pueden ser orgánicas o inorgánicas y estas sustancias se pueden subdividir en las que forman escoria y las que son fundentes. Algunos de los principales compuestos son:

- Para la formación de escoria se utilizan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$  y  $\text{FeO}$ .
- Para mejorar el arco se utilizan  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{TiO}_2$ .
- Desoxidantes: grafito y aluminio.
- Para mejorar el enlace: silicato de sodio y silicato de potasio.
- Para mejorar la aleación y la resistencia de la soldadura: vanadio, cesio, cobalto, molibdeno, aluminio, circonio, cromo, níquel, manganeso y tungsteno.

Elementos necesarios:

- Fuente de energía.
- Electrodo revestido (consumible).
- Porta electrodos.
- Cables de corriente.

Principales Aplicaciones:

- Unión de aceros al carbono, inoxidable y fundiciones.
- Unión de aluminio y sus aleaciones
- Unión de cobre y sus aleaciones.

Principales Ventajas:

- Procedimiento común.
- No requiere equipo especial.
- Unión de metales de diferente naturaleza.

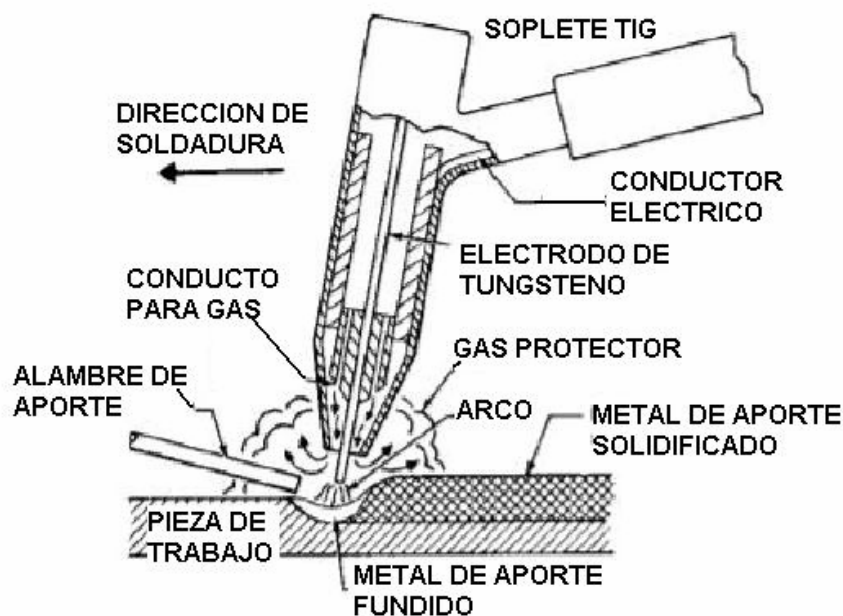
Principales desventajas:

- No se pueden soldar materiales de bajo espesor.
- Sino se aplica adecuadamente se obtiene una soldadura pobre y con escoria.
- Se puede quemar el revestimiento del electrodo sino se le aplica la corriente adecuada.

### *Soldadura por arco con gas protector.*

En este proceso la unión se logra por el calor generado por un arco eléctrico que se genera entre un electrodo y las piezas, pero el electrodo se encuentra protegido por una copa por la que se inyecta un gas inerte como argón, helio o CO<sub>2</sub>. Con lo anterior se genera un arco protegido contra la oxidación y además perfectamente controlado. Existen dos tipos de soldadura por arco protegido la TIG y la MIG.

La *soldadura TIG* (tungsten inert gas) (FIGURA 1.16) es aquella en la que el electrodo de la máquina es de tungsteno y no es consumible, por lo que el metal de aporte se debe añadir por separado.



**FIGURA 1.16 .- SOLDADURA TIG.**

Elementos necesarios:

- Fuente de energía.
- Electrodo de tungsteno (no consumible).
- Porta electrodos.
- Gas de proceso (Argón, Helio o CO<sub>2</sub>).

Principales Aplicaciones:

- Unión de metales ferrosos y aleaciones no ferrosas.
- Unión de aceros inoxidables.

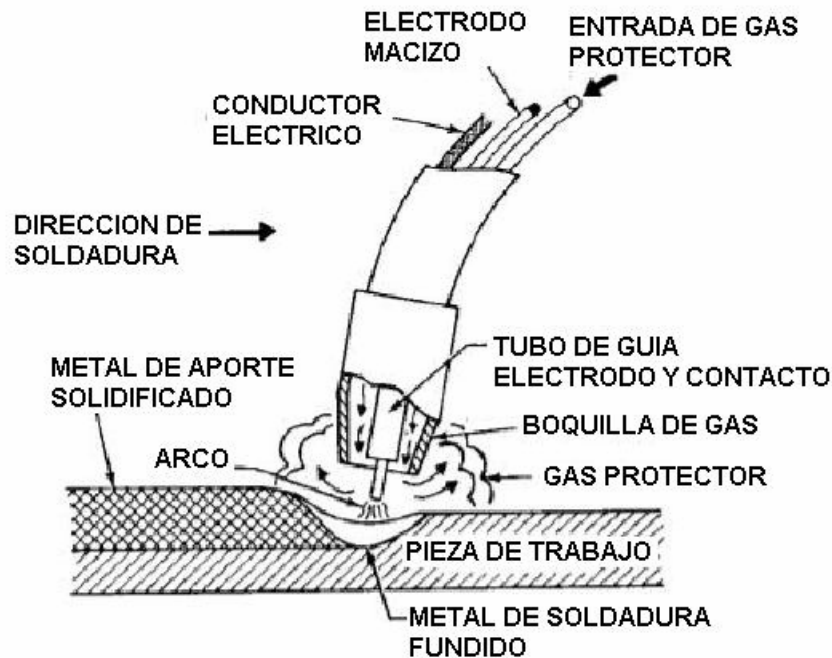
### Principales Ventajas:

- Unión de metales y aleaciones no ferrosas.
- Electrodo no consumible.

### Principales desventajas:

- Personal capacitado para el manejo del equipo y realización del proceso.
- Sino se aplica adecuada mente se genera la contaminación de la unión.
- Se usa solo para metales de bajo calibre.

La *soldadura MIG* (metal inert gas) (FIGURA 1.17) es en la que el electrodo es de un metal consumible que va siendo utilizado como metal de aporte, por lo que este sistema es considerado como de soldadura continua.



**FIGURA 1.17 .- SOLDADURA MIG.**

### Elementos necesarios:

- Fuente de energía.
- Electrodo en forma de rollo (consumible).
- Antorcha porta electrodos.
- Gas de proceso (Argón, helio o CO<sub>2</sub>).

---

Principales Aplicaciones:

- Unión de metales ferrosos y no ferrosos.
- Aplicación de soldaduras continuas y no continuas.
- Piezas de bajo espesor.

Principales Ventajas:

- Soldaduras de gran longitud y continuas.
- No hay pérdida de electrodos (colillas).

Principales desventajas:

- Personal capacitado para el manejo del equipo.
- Mantenimiento frecuente del equipo.

*Soldadura por arco con hidrógeno atómico.*

En un sistema generador de un arco eléctrico en el que se agrega hidrógeno se liberará calor con mayor intensidad que en un arco común, la temperatura que se alcanza en este tipo de arco es superior a los 6,000 °C. Se mantiene un arco de corriente alterna entre dos electrodos de tungsteno. El gas de hidrogeno es disociado en el arco, cuando este se pone en contacto con la base de metal se combina, abandonando importantes cantidades de calor. El gas hidrogeno alrededor de la soldadura provee la protección contra el oxígeno y Nitrógeno de la atmósfera. Esta soldadura es de alta calidad y es usada para aceros de alta aleación, usándose también para materiales muy delgados.

Elementos necesarios:

- Fuente de energía.
- Soplete.
- Electrodos de tungsteno.
- Gas de proceso (H<sub>2</sub>).
- Material de aporte (metal base) (opcional).

Principales Aplicaciones:

- Unión de metales y aleaciones de alta aleación.

Principales Ventajas:

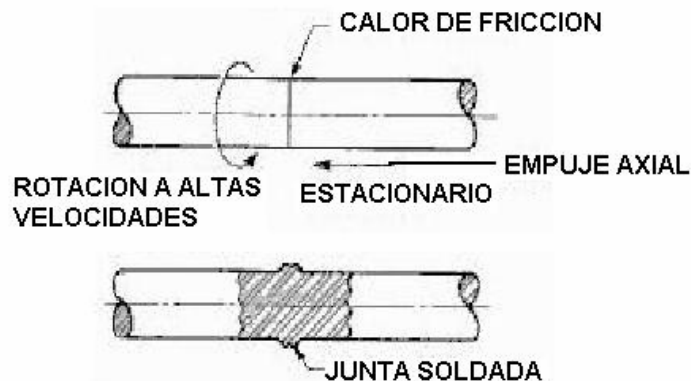
- Unión de metales y aleaciones no ferrosas.
- Electrodo no consumible.
- El proceso provee concentraciones de calor muy altas.

Principales desventajas:

- Personal capacitado para el manejo del equipo y realización del proceso.
- Si no se aplica adecuadamente se genera la contaminación de la unión.

### 1.3.8 SOLDADURA POR FRICCION.

En este proceso la unión se logra por el calor proporcionado por el efecto de fricción y las altas velocidades de rotación de una de las piezas a unir en contra de la otra que se encuentra fija, (FIGURA 1.18), una vez alcanzada la temperatura adecuada se ejerce presión en las dos piezas y con ello quedan unidas.<sup>5</sup>



**FIGURA 1.18 .- SOLDADURA POR FRICCION.**

Elementos necesarios:

- Máquina para soldar con dispositivos de presión, sujeción, alineación y freno (manejo continuo, por inercia o por volante).

Principales Aplicaciones:

- Unión de metales ferrosos y aleaciones no ferrosas.
- Unión de metales no ferrosos.
- Unión de metales ferrosos con no ferrosos.

Principales Ventajas:

- Unión de metales y aleaciones no ferrosas.
- No se Necesita material de aporte.
- Hace posible la unión de materiales disimilares a alta producción y bajo costo.

<sup>5</sup> Amsted B. H. .- Procesos de Manufactura. Editorial Continental.

Principales desventajas:

- Por lo menos uno de los objetos a ser unido debe ser redondo (o casi redondo) en la interfase y debe tener un tamaño y forma que puedan sujetarse y puedan girar a la velocidad que se requiere.
- La pieza de trabajo debe poder resistir el torque y la presión axial impuestas durante el calentamiento y el forjado.
- Se requiere que las piezas después de ser soldadas sean maquinadas para eliminar la rebaba generada por el proceso.

En el siguiente capítulo se estudiará más a fondo este proceso.

### 1.3.9 SOLDADURA POR EXPLOSION.

Esta soldadura también se llama de recubrimiento consiste en la unión de dos piezas metálicas, por la fuerza que genera el impacto y presión de una explosión sobre las proximidades a las piezas a unir. En algunas ocasiones, con el fin de proteger a las piezas a unir, se coloca goma entre una de las superficies a unir y el yunque que genera la presión (FIGURA 1.19).

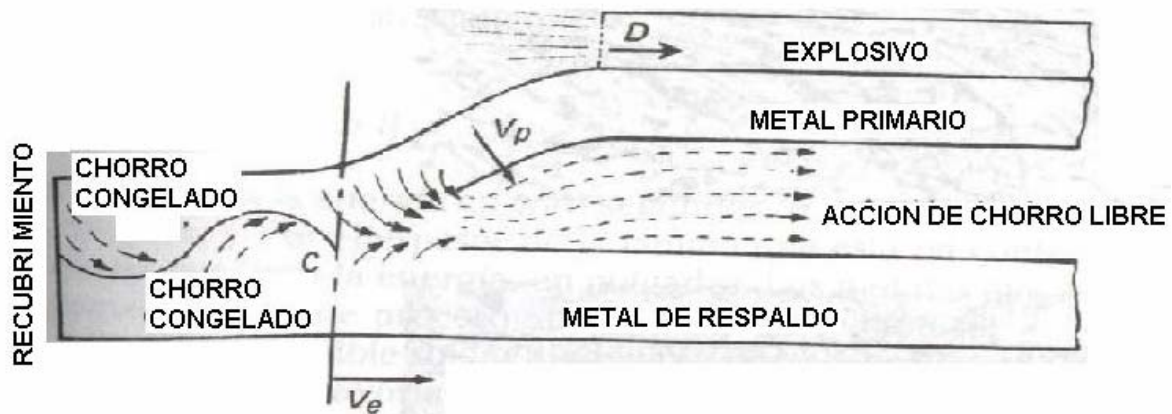


FIGURA 1.19 .- SOLDADURA POR EXPLOSIÓN.

Elementos necesarios:

- Carga explosiva (plástica, líquida o granulada).
- Masa de agua.
- Placa de apoyo o yunque.
- Revestimiento de goma.

---

### Principales Aplicaciones:

- Obtención de bimetales como: acero níquel /acero; cobre / acero; aluminio /cobre; latón / acero y otros muchos, pueden ser obtenidos aplicando esta técnica. De la misma forma pueden fabricarse trimetales y metales multicapas.
- Fabricación de cuchillas autoafilables.
- Fabricación de reactores químicos industriales que trabajan a altas presiones y temperaturas y atmósferas corrosivas.

### Principales Ventajas:

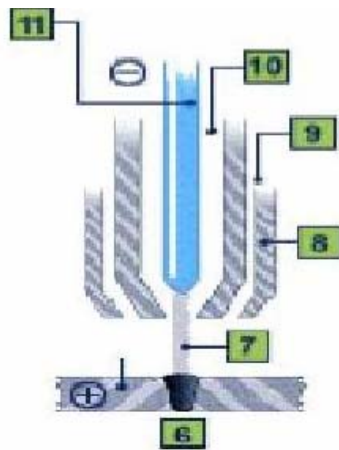
- Las presiones y las temperaturas instantáneas que se desarrollan durante la soldadura por explosión, permiten una soldadura que garantiza una adecuada resistencia al despegue y total unión metálica en toda la superficie.
- No se necesita la utilización de prensas, ni edificaciones, ni otra energía que no sea la de la explosión.
- No se necesita material de aporte.

### Principales desventajas:

- Endurecimiento de los metales a soldar.
- Para lograr un bimetale se requiere de un metal no ferroso y un metal ferroso.
- Metales de bajo punto de fusión y baja resistencia al impacto no se puede unir eficazmente.
- Los explosivos se deben manejar únicamente por el personal equipado y bien adiestrado.

### **1.3.10 SOLDADURA POR ARCO CON PLASMA.**

El proceso de soldadura por arco con plasma usa un arco restringido o uno que a través de un orificio crea un arco con plasma a una temperatura más alta que el arco de tungsteno. Como proceso de corte se volvió popular con los metales no ferrosos y se usa también para rociar tanto alambres como polvos. (FIGURA 1.20)



- 6. SOLDADURA PLASMA
- 7. ARCO PLASMA
- 8. BOQUILLA GAS SOLDADURA
- 9. GAS SOLDADURA
- 10. ORIFICIO GAS
- 11. ELECTRODO

**FIGURA 1.20 .- SOLDADURA POR ARCO CON PLASMA.**

El nivel de energía conseguido a través del arco de plasma permite, en determinados casos, aumentar las velocidades de soldadura; en otros, aumenta el nivel de penetración de los cordones y, en general, permite una gran estabilidad del arco, desde valores inferiores a un Amperio (micro-plasma) hasta valores superiores a 300 Amperios (macro-plasma), así como un mejor control de la distorsión.

Elementos necesarios:

- Equipo compacto de corriente alterna/continua.
- Control de onda cuadrada.
- Regulación de 5-325 Amperios.
- Control para regulación de los parámetros del arco de plasma (gases y energía).
- Pistola de aplicación automática para soldadura por plasma hasta 300 Amperios al 100% refrigerada por agua.
- Completan la instalación una serie de complementos como alimentador de hilo, mando a distancia, carro de desplazamiento lineal, mesa viradora, gases, etc. que son requeridos en función de la aplicación del trabajo.

Principales Aplicaciones:

- Soldadura orbital de tuberías por refusión de bordes en tubos de hasta 6 mm de espesor con una sola pasada.
- Fabricación de recipientes de acero inoxidable para almacenamiento de diferentes productos.
- Soldadura de convertidores catalíticos de tubos de escape.



### Principales Ventajas:

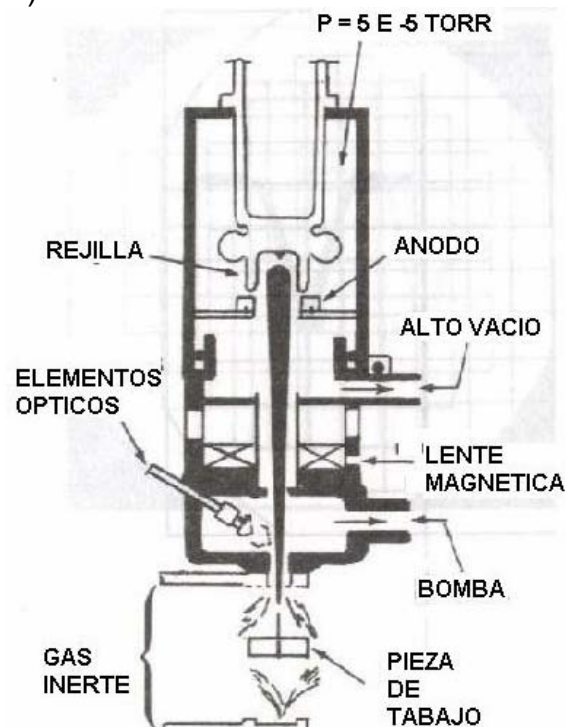
- Unión de aleaciones no ferrosas.
- Soldadura de fuertes espesores a una sola pasada de materiales tales como titanio, cobre, níquel y aleaciones cromo-níquel.
- Soldadura longitudinal de tubos de diferentes aleaciones aplicada en instalaciones automatizadas con altas velocidades de producción cercanas a 1 m/min. en función del espesor.

### Principales desventajas:

- Personal capacitado para el manejo del equipo y realización del proceso.
- Unión de metales de gran espesor.

### 1.3.11 SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES.

La característica principal de la soldadura por haz de electrones que la distingue de otros procesos de soldadura, es la posibilidad de concentrar una mayor cantidad de energía en zonas más reducidas. Esta elevada densidad de energía se consigue mediante la concentración de un haz de electrones de alta velocidad, producido por un cañón de electrones. El impacto de los electrones de alta velocidad sobre la pieza incrementa la temperatura en la zona de impacto. Esta elevada temperatura puede ser utilizada como fuente de calor en distintas aplicaciones (soldadura, fusión, tratamientos térmicos, etc.). El proceso se realiza en una cámara de vacío para evitar la dispersión de los electrones en la atmósfera normal. (FIGURA 1.21)



**FIGURA 1.21 .- SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES.**

---

Elementos necesarios:

- Cañón generador del haz de electrones.
- Cámara de vacío.

Principales Aplicaciones:

- Soldadura de fuertes espesores (hasta 65 mm) de una sola pasada y sin aporte, lo cual supone un ahorro de tiempo y material.
- Soldaduras libres de contaminación, dada la atmósfera de alto vacío en la que se realiza el proceso.
- El haz de alta energía permite realizar tratamientos térmicos superficiales, tanto de temple, con el consiguiente endurecimiento de la superficie, como de refusión, obteniéndose mejoras en diversas propiedades del material.

Principales Ventajas:

- Soldaduras con deformaciones y tensiones mínimas debida a las reducidas dimensiones del cordón de soldadura (por ejemplo, 4 mm de anchura para una penetración de 20 mm. en acero).
- Soldaduras de gran precisión en piezas reducidas; el pequeño diámetro del haz (0.5 mm) permite soldar zonas inaccesibles para cualquier herramienta.
- Se pueden soldar innumerables metales diferentes y metales refractarios (tungsteno, molibdeno) y diversas superaleaciones.

Principales desventajas:

- Limitación en el tamaño de las piezas a soldar debido al tamaño de la cámara de vacío.
- La necesidad de un tiempo adicional para realizar el vacío.
- Personal capacitado para el manejo del equipo y realización del proceso.

#### **1.4 LA IMPORTANCIA DE LA SOLDADURA.**

Hoy en día, la soldadura es considerada una ciencia. Es uno de los más complejos procesos industriales, pues involucra física de plasmas, flujo de fluidos, teoría de electromagnetismo, robótica, metalurgia, ingeniería eléctrica, electrónica y mecánica. Muchos de estos aspectos actúan simultáneamente cada vez que un soldador comienza su cordón de soldadura.

Esta es la razón por la que la educación de ingenieros en soldadura capaces de combinar todas estas ciencias, es una prioridad en los países de economía avanzada.

La soldadura es la forma más eficaz y la única posible de unir dos o más piezas de metal para hacerlas actuar como una sola. Miremos alrededor: casi todo lo hecho de metal está soldado: el edificio más alto del Mundo, los motores de los cohetes lunares, los reactores nucleares, los barcos, los trenes, los aparatos electrodomésticos, los juguetes, las bicicletas, los automóviles, etc. (FIGURA 1.22).



**FIGURA 1.22 .- CAMPOS DE APLICACION DE LA SOLDADURA**

La soldadura es un concepto de diseño que permite flexibilidad y la libertad, que no son posibles en la construcción de piezas de fundición; y es la mejor forma de proteger y conservar los materiales, ya que por medio de la soldadura la corrosión y el desgaste en los metales se pueden reducir considerablemente.

En conclusión, la soldadura se ha convertido en un elemento esencial para la construcción de las más sofisticadas máquinas que el hombre haya hecho en su historia. Este progreso ha sido posible sólo a través del entendimiento y aplicación creativa de los procesos físicos que existen durante la soldadura. Es por eso que hoy en día un mínimo de educación es necesaria para poder aplicar la soldadura eficientemente.

---

# CAPITULO 2.

## LA SOLDADURA POR FRICCION.

La soldadura por fricción es un proceso de soldadura de estado sólido que produce una unión soldada bajo la fuerza compresiva entre dos piezas en contacto que giran una respecto a otra produciendo calor, el cual se genera por la conversión de energía mecánica en energía térmica.

En este capítulo describiremos el proceso de la soldadura por fricción, así como sus principales métodos y sus principios de operación, la intervención de los 3 principales parámetros a controlar que influyen en las propiedades metalúrgicas y mecánicas de las uniones de soldadura por fricción, las aplicaciones, ventajas y desventajas del proceso.

### **DEFINICION.**

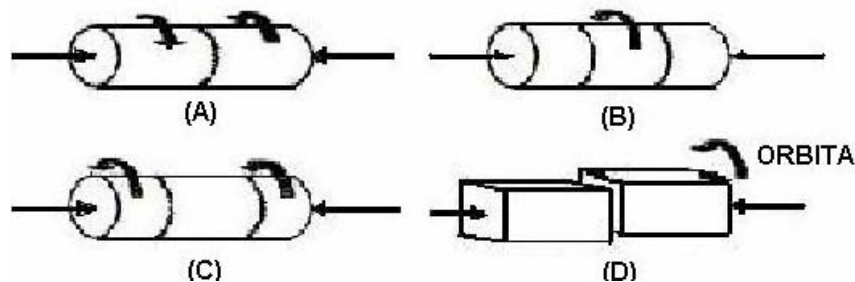
La soldadura por fricción es un proceso en que el calor para soldar es producido por la conversión directa de energía mecánica a energía térmica en la interfase de las piezas de trabajo, sin la aplicación de la energía eléctrica, o el calor de otras fuentes en dichas piezas de trabajo. La soldadura por fricción se realiza manteniendo una pieza fija en contacto con una pieza girando bajo un constante o crecimiento gradual de la presión hasta que la interfase alcance la temperatura de la soldadura, y deteniendo la rotación para completar la soldadura. El calor por fricción desarrollado en la interfase levanta rápidamente la temperatura de las piezas, por encima de una muy pequeña distancia axial, para valores aproximados, pero abajo, del rango de fusión; la soldadura ocurre bajo la influencia de una presión que es aplicada mientras la zona calentada está en el rango de temperatura plástica.

## 2.1 EL PROCESO.

En la FIGURA 2.1(A) se muestra el arreglo mecánico más simple para manejar la soldadura por fricción involucra a dos barras cilíndricas sujetas a un alineamiento axial: una de las barras es girada mientras que la otra entra en contacto bajo una presión axial. El giro continua por una duración especifica suficiente para que el calor de la fricción logre una temperatura en la interfase en que el metal en la zona de unión este en estado plástico. Habiendo logrado esta condición la barra que gira es detenida mientras la presión es, mantenida o incrementada, para consolidar la unión. Otros arreglos que pueden ser empleados son los siguientes:

En la FIGURA 2.1 (B) se incluye una pieza central girando entre el extremo de dos piezas estacionarias, una técnica conveniente para juntar rollos de alambre y longitudes de partes largas, y girando los dos extremos contra una pieza central estacionaria, como usado para la fabricación de apoyos de flechas y las cubiertas traseras de ejes.

En la FIGURA 2.1(C) las piezas de los extremos giran mientras la de en medio es fija. La soldadura por fricción es suficientemente versátil para ser usada para juntar un extenso rango de partes diseñadas, por ejemplo las que se muestran en la FIGURA 2.1 (D).<sup>6</sup>



**FIGURA 2.1 .- ARREGLOS DE LA SOLDADURA POR FRICCION.**

Existen cinco factores de manera cuantitativa que son aplicables a la soldadura de fricción. Éstas son:

1. La velocidad relativa del movimiento de las superficies de fricción.
2. La temperatura de las superficies de fricción.
3. La naturaleza del material y la presencia de películas de la superficie.
4. La magnitud de la fuerza de presión normal.
5. La rigidez y elasticidad de las superficies de fricción.

<sup>6</sup> Melvin M. Schwartz .- Source Book on innovative welding processes. A.S.M., E.U.A.

---

## **2.2 PARAMETROS DE LA SOLDADURA POR FRICCION.**

Para todos los sistemas de soldadura por fricción, la velocidad relativa, la presión axial aplicada a las partes y la duración del calentamiento, son las tres principales variables a controlar que influyen en las propiedades metalúrgicas y mecánicas de las uniones de soldadura por fricción.

**2.2.1 LA VELOCIDAD.** A bajas velocidades son desarrollados grandes torques que pueden elevar los problemas de unión y deformación no uniforme llamada perturbación. Se deben tener cuidado en la selección de la presión axial y la duración del calentamiento cuando se solda a altas velocidades además de evitar un sobre calentamiento en la región de la soldadura.

**2.2.2 LA PRESION AXIAL.** La presión axial aplicada a las partes es importante para manipular la potencia de arranque (torque) demandada y las características de desplazamiento del metal. Este valor depende de los materiales unidos y sus configuraciones, por ejemplo, barra - barra, tubo – tubo, o barra – lámina o tubo - lámina.

El nivel de presión debe ser seleccionado para mantener las dos superficies en contacto íntimo para prevenir contaminación del exterior. Con muchos materiales y combinaciones es a menudo una ventaja para aplicar una presión alta en la terminación del calentamiento para forjar la unión.

**2.2.3 EL CICLO DE CALENTAMIENTO.** El ciclo de calentamiento de la soldadura durante la rotación es usualmente determinado experimentalmente para dar condiciones térmicas óptimas. Cualquier extensión innecesaria de este periodo resulta en baja productividad y un gran consumo de material.

Sin embargo, el fracaso para alcanzar las condiciones optimas de temperatura, puede dar lugar a un calentamiento irregular con la ocurrencia de inclusiones de óxido y regiones no unidas en la interfase de la soldadura completada.

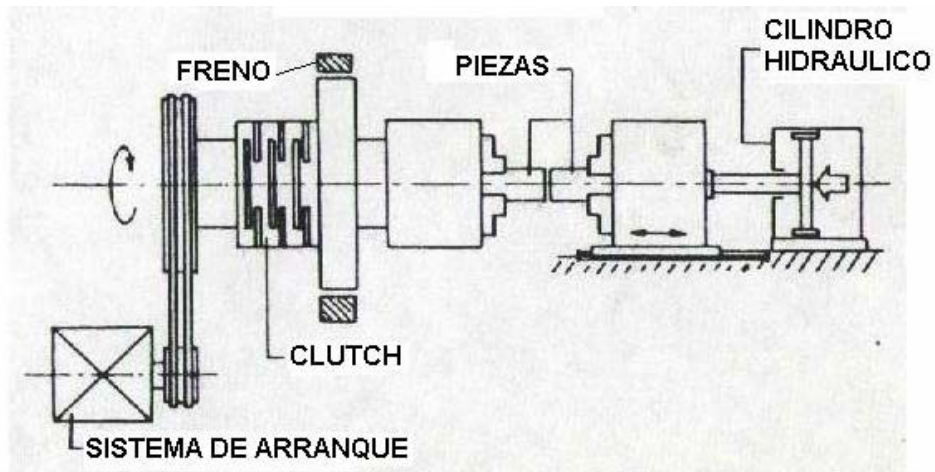
## **2.3 PRINCIPALES METODOS DE SOLDADURA POR FRICCION.**

Hay tres métodos de unión de probetas por la soldadura de fricción:

- (a) la soldadura por fricción convencional.
- (b) la soldadura por inercia
- (c) la soldadura por fricción por volante.

### 2.3.1 LA SOLDADURA POR FRICCIÓN CONVENCIONAL (MANEJO CONTINUO).

La soldadura por fricción convencional requiere una máquina que se parece un torno equipado con un sistema eficiente de frenado del eje, un medio para aplicar y controlar la presión axial y un cronómetro para el control del ciclo de soldadura (FIGURA 2.2).

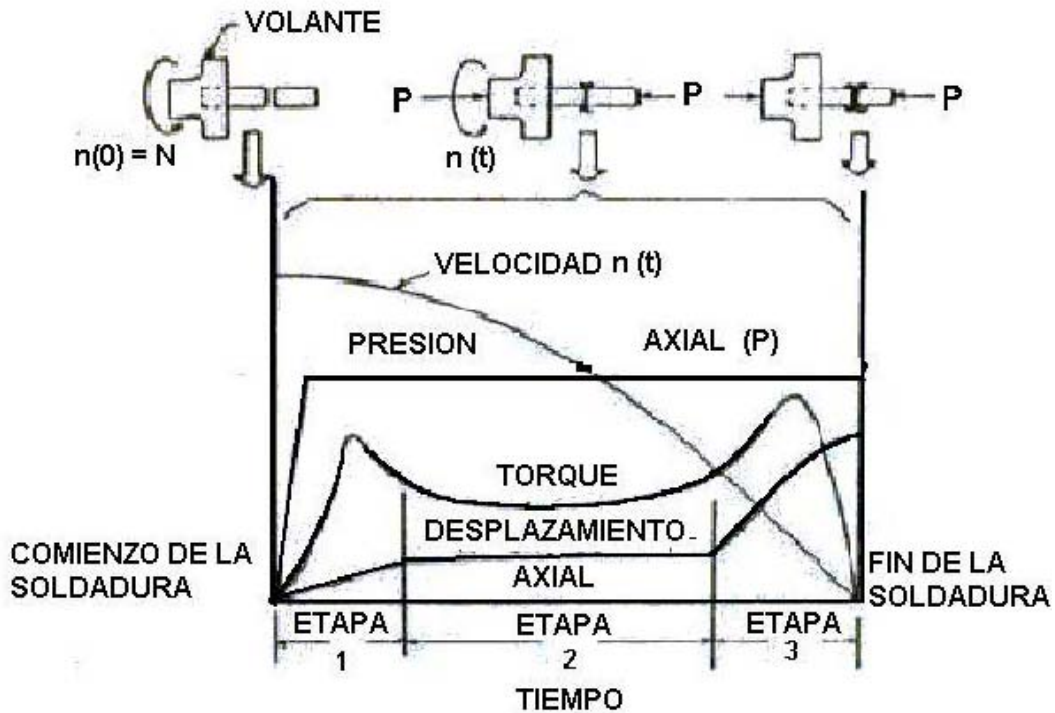


**FIGURA 2.2 .- MAQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN CONVENCIONAL.**

**2.3.1.1 El principio de operación.** La pieza a ser girada se sujeta en el chuck del eje, y el eje es llevado a una velocidad predeterminada. El componente fijo es sujetado en un chuck o a un contrapunto montado en un extremo deslizable actuado hidráulicamente. Para calentar las piezas de trabajo a la temperatura de soldadura, el extremo deslizable es empujado para llevar las piezas de trabajo al contacto bajo una presión axial constante o gradualmente aumentada.

Cuando las piezas de trabajo están ligeramente por encima de la temperatura de soldadura, el freno del eje es aplicado, el cual detiene de repente la rotación del eje. Simultáneamente, la presión del extremo deslizable es aumentada para completar la soldadura. (FIGURA 2.3)





**FIGURA 2.3 .- PROCESO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN CONVENCIONAL ( MANEJO CONTINUO).**

La velocidad del eje, la presión axial y el intervalo de tiempo que es aplicada la presión para una soldadura depende de: (a) el área de la sección transversal de las piezas de trabajo a ser soldadas; (b) el punto fusión y la conductividad térmica del metal de trabajo; y (c) los cambios metalúrgicos que ocurren durante el ciclo de calentamiento, particularmente cuando se están soldando metales distintos.

**2.3.1.2 Las variables del proceso.** Las variables del proceso a ser controladas son la velocidad de rotación, la presión inicial de calentamiento, el intervalo de tiempo en que la presión de calentamiento es aplicada, y presión de soldadura. El tiempo necesario para detener el eje puede afectar la temperatura a la que las piezas de trabajo son calentadas, el cronometrado de aplicación de la presión de la soldadura, y las propiedades de la soldadura.

*La velocidad de rotación, o la velocidad periférica, es la variable menos sensible del proceso y puede ser variada por encima de una gama amplia si el tiempo de calentamiento y la presión son ajustadas propiamente. Sin embargo, el tiempo de calentamiento debe ser limitado para prevenir un profundo calentamiento excesivo. La velocidad periférica recomendada para soldar la mayoría de los aceros de bajo carbono, de medio carbono, y de alto carbono son de 2.032 m/s a 7.112 m/s.*

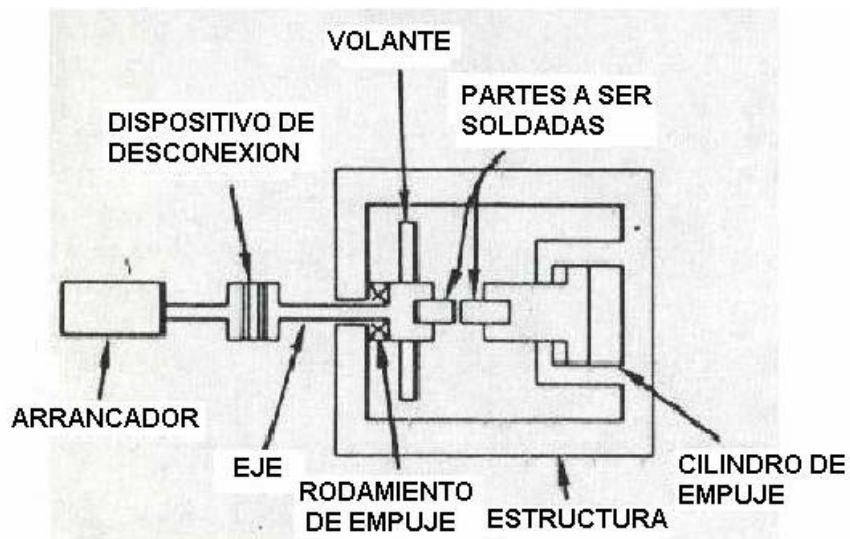


*El tiempo de calentamiento* varía con la presión de calentamiento, el carbono y el contenido de aleantes del acero, y el diámetro de las piezas de trabajo. Normalmente, el tiempo de calentamiento es determinado por ensayo.<sup>7</sup>

### 2.3.2 LA SOLDADURA POR FRICCIÓN POR INERCIA.

La soldadura por inercia hace uso de la energía cinética de un volante girando libremente para cubrir los requisitos de calentamiento para producir una soldadura.

**2.3.2.1 El principio de operación.** En la soldadura por inercia, como en la soldadura por fricción convencional, una pieza de trabajo es sujeta en un tornillo de banco no giratorio o contrapunto y la otra pieza de trabajo es sujeta en un chuck montado a un eje girando. (FIGURA 2.4)

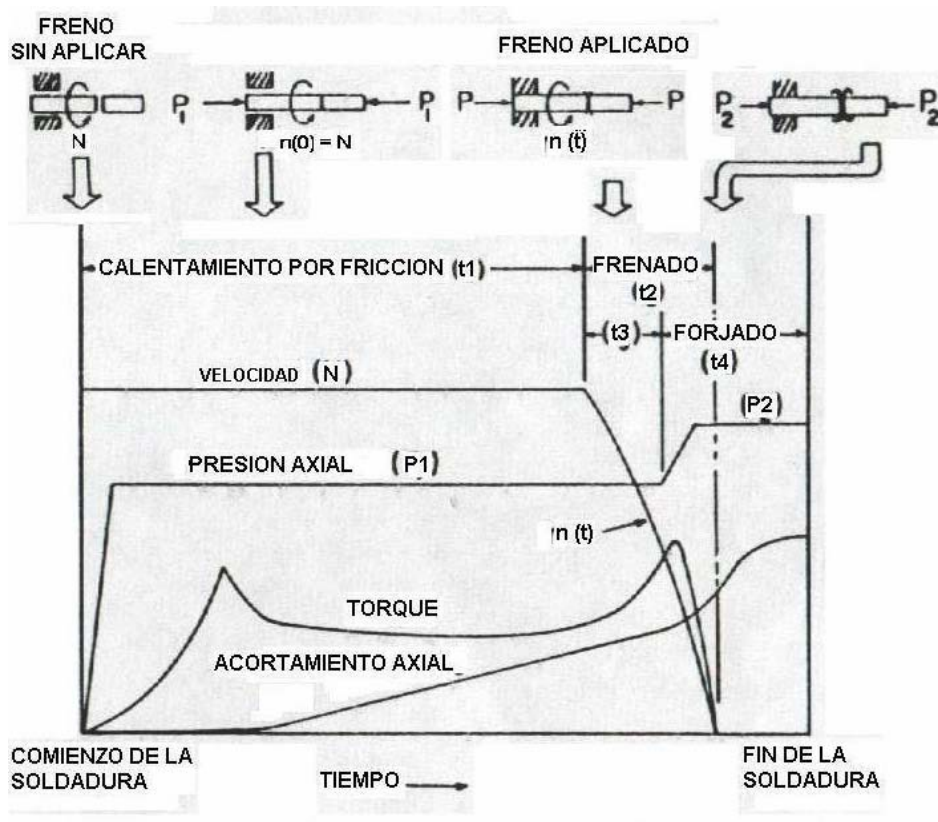


**FIGURA 2.4 .- MAQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN POR INERCIA.**

El motor o arrancador acelera la rotación del ensamble volante-eje a una velocidad predeterminada, y entonces el arrancador que proporciona potencia de rotación es apagado. Las superficies a ser soldadas son unidas y la energía cinética del volante libremente girando es rápidamente convertida en calor en la interfase de la soldadura conforme la presión axial es aplicada. Una vez que la presión axial, el momento del volante de inercia, y la velocidad del eje han sido establecidos para una pieza de trabajo dada, se producen las soldaduras uniformes repetidamente.

<sup>7</sup> ASM .- source: Metal Hand Book, 8<sup>th</sup> Ed., Vol. 6

Dos características de la soldadura por inercia: continuamente la velocidad de la superficie de la pieza de trabajo decrece y continuamente el torque cambian en la interfase de la soldadura. La velocidad de la superficie empieza a un valor inicial y disminuye a lo largo de una curva esencialmente parabólica hacia cero en que el tiempo la soldadura es completado. El tiempo de calentamiento y soldadura son normalmente de 0.2 a 4 segundos. El torque tiene un valor máximo de duración corta tempranamente en el ciclo, gradualmente disminuye, y entonces aumenta hasta que la velocidad haya disminuido al valor en que la soldadura comienza, momento en que el torque se eleva repentinamente. Este torque alto es acompañado por el forjado en la zona de la soldadura, y es responsable de la perturbación. La fase de alto-torque, sólo se presenta en la soldadura por inercia, refina la estructura de grano y expelle cualquier óxido en la interfaz de la soldadura. La parte gradualmente decreciente y creciente de la curva del torque es esencial para la formación de buenas soldaduras. La segunda fase (bajo-torque) generalmente no se desarrollará si la velocidad inicial es demasiado baja. (FIGURA 2.5).



**FIGURA 2.5 .- PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION POR INERCIA.**

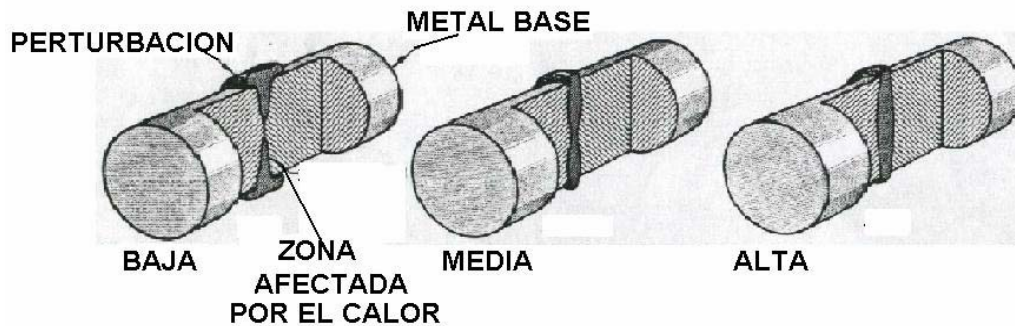
---

La potencia alta usada en la soldadura por inercia es un resultado de una presión axial relativamente alta, rápidamente aplicada. La potencia demandada en la soldadura por fricción convencional es controlada y limitada a la capacidad del motor aplicando la presión axial lentamente; normalmente de 2 a 4 segundos pasan antes de que la presión sea aplicada completamente. Las proporciones de calentamiento más bajas de la soldadura por fricción convencional requieren más energía porque mucho del calor se dirige fuera de la interfase de la soldadura. Por la aplicación rápida de cantidades pequeñas de energía, la soldadura por inercia produce estrechas zonas afectadas por el calor, que aquellas que son producidas en la soldadura por fricción convencional.

En la soldadura por inercia, el intenso trabajo en caliente de la zona de la soldadura en conjunto con un enfriamiento rápido, inmediatamente después los resultados del trabajo en caliente son un tamaño de grano muy pequeño en la condición como-soldada. El tratamiento de calentamiento subsecuente restaurará los granos a su tamaño normal.

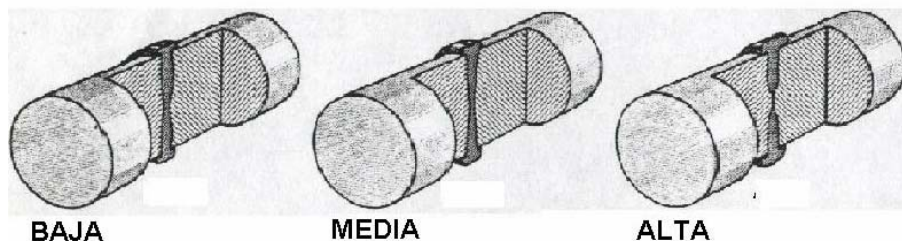
**2.3.2.2 Las variables del proceso.** Tres variables controlan las características de una soldadura por inercia: la velocidad periférica inicial de la pieza de trabajo girando, la presión axial, y tamaño del volante (el momento de inercia). Para cada soldadura, la energía mínima de entrada requerida se proporciona usando la combinación apropiada de tamaño del volante y velocidad del eje. La energía adicional puede ser necesitada si las superficies a ser soldadas son ásperas o fuera de cuadro con el eje de rotación. Energía muy alta de entrada causa pérdida excesiva de metal, pero generalmente no afecta a la fuerza o la calidad de la soldadura.

*La Velocidad periférica de la pieza de trabajo.* Para cada combinación de metales de trabajo, hay un rango de velocidad periférica que produce las mejores propiedades de la soldadura. Para soldar acero con acero, la velocidad periférica inicial recomendada de la pieza de trabajo va desde 2 m/s a 8 m/s; sin embargo, pueden hacerse las soldaduras a velocidades tan bajas como 1.524 m/s. Las velocidades bajas (menos de 1.5 m/s) pueden reducir el calentamiento del centro y produce asperezas e irregularidades en la perturbación de la soldadura. A las velocidades medias (1.524 a 4.572 m/s), el modelo de calentamiento en el acero tiene una forma del reloj de arena al más bajo valor y gradualmente se aplasta conforme se aproxima a la velocidad superior. El modelo de calentamiento de la pieza es esencialmente de espesor plano y uniforme a velocidades de 4.572 a 6.096 m/s. A velocidades iniciales altas (por encima de 6.069 m/s), la soldadura comienza a redondearse y es más espesa en el centro que en la periferia. (FIGURA. 2.6).



**FIGURA 2.6 .- EFECTOS EN LA VARIACION DE LA VELOCIDAD PERIFERICA.**

*La Presión axial.* El efecto de variar la presión axial es similar pero opuesto al efecto de variar la velocidad, las soldaduras hechas a baja presión axial se asemejan a soldaduras hechas a la velocidad media, con respecto a la formación de las zonas de soldadura perturbada y las zonas afectadas por el calor. El uso excesivo de presión produce una soldadura que es pobre en el centro y tiene una gran cantidad de soldadura perturbada, similar a una soldadura hecha a una velocidad baja. (FIGURA. 2.7)



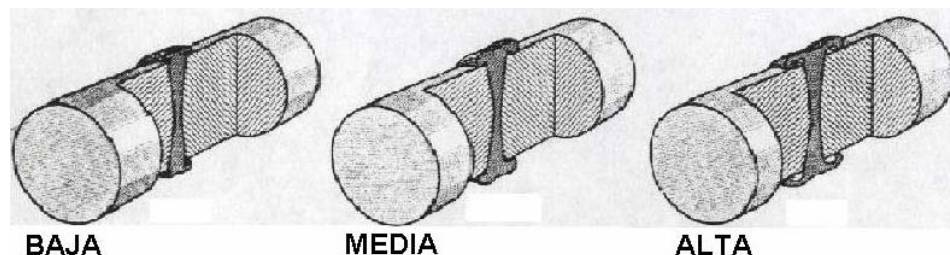
**FIGURA 2.7 .- EFECTOS EN LA VARIACION DE LA PRESION AXIAL.**

*El tamaño del volante* (el momento de inercia del volante o eje) es ajustado agregando o quitando los discos del volante. La velocidad del eje y la presión axial son ajustadas por los diales en el panel de control.

*El efecto de la energía del Volante.* El momento del volante de inercia es seleccionado para producir la cantidad deseada de energía cinética y la cantidad deseada de forjado. El forjado resulta del aumento característico en el torque, eso ocurre en la interfase de la soldadura conforme el volante se va deteniendo y va al reposo. Este aumento del torque, en combinación con la presión axial, produce el forjado representada por la curva perturbada. Porque el forjado empieza en alguna velocidad crítica (aproximadamente 6.096 m/s para acero de bajo carbono), la cantidad de forjado depende de la cantidad de energía contenida en el volante, que es una función lineal del momento del volante de Inercia.

Grandes volantes de baja velocidad producen mayor forjado que pequeños, los volantes de gran velocidad uniformes sin embargo contienen la misma cantidad de

energía cinética. Aunque bajas, medias y altas cantidades de energía del volante produce modelos de calentamiento similares, la cantidad de energía afecta grandemente el tamaño y forma de la soldadura perturbada. (FIGURA. 2.8).



**FIGURA 2.8 .- EFECTO EN LA VARIACION DE LA ENERGIA DEL VOLANTE DE INERCIA**

La fuerza axial (N) para soldar las barras de 0.0254 de diámetro es dada en la tabla 1.

**TABLA 1 .- CONDICIONES PARA LA SOLDADURA POR INERCIA EN BARRAS DE .0254 (m) DE METALES IGUALES Y METALES DISTINTOS**

METALES SOLDADOS ASI MISMOS	VELOCIDAD DE EJE (RPM)	FUEZA AXIAL (N)	PERDIDA DE METAL (m)	TIEMPO TOTAL (s)
ACERO 1018	4600	2697.72	2.54E-03	2
ACERO 1045	4600	3147.34	2.54E-03	2
ACERO 4140	4600	3372.15	2.54E-03	2
INCONEL 718	1500	11240.5	3.81E-03	3
ACERO MILITAR	3000	4496.2	2.54E-03	2.5
ACERO INOX. 410	3000	4046.58	2.54E-03	2.5
ACERO INOX. 302	3500	4046.58	2.54E-03	2.5
COBRE	8000	1124.05	3.81E-03	0.5
COBRE 260	7000	1124.05	3.81E-03	0.7
TITANIO Ti-6Al-4V	6000	1798.48	2.54E-03	2
ALUMINIO 1100	5700	1348.86	3.81E-03	1
ALUMINIO 6061	5700	1573.67	3.81E-03	1
<b>METALES DISTINTOS SOLDADOS</b>				
COBRE-ACERO 1018	8000	1124.05	3.81E-03	1
ACERO HERRAMENTAL M2-ACERO1045	3000	8992.4	2.54E-03	3
NIQUEL 718-ACERO 1045	1500	8992.4	3.81E-03	2.5
ACERO INOX.302-ACERO 1020	3000	4046.58	2.54E-03	2.5
ALUMINIO 6061-ACERO INOX. 302	5500	3372.15	5.08E-03	3
COBRE-ALUMINIO 1100	2000	1686.075	5.08E-03	1

La presión Axial varía como una función de la raíz cuadrada del diámetro de la pieza de trabajo. Por ejemplo, una barra de 0.0508 m de diámetro usa 1.414 veces la presión axial necesaria para una barra de 0.0254 m de diámetro.

### 2.3.3 LA SOLDADURA POR FRICCIÓN POR VOLANTE.

La soldadura por fricción por volante es realizada con una máquina en que la energía mecánica es guardada en un volante y soltada por este en cantidades predeterminadas y medidas por la velocidad del volante. La cantidad de energía soltada por el volante es determinada por su velocidad cuando la presión axial es primeramente aplicada, y por la velocidad a que el embrague desacopla el eje del motor. (FIGURA 2.9)

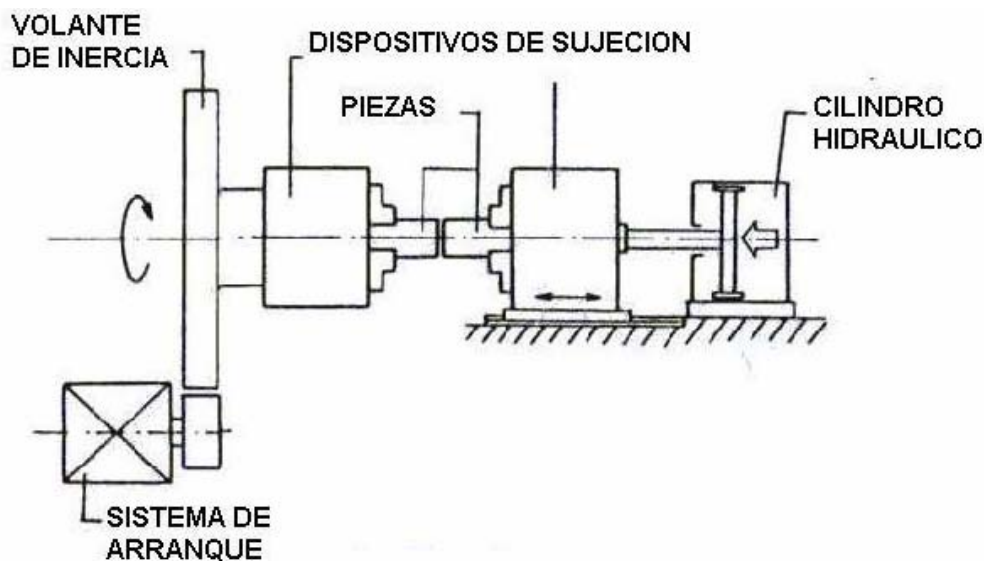


FIGURA 2.9 .- MAQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN POR VOLANTE.

**2.3.3.1 El principio de funcionamiento.** Una pieza de trabajo es sujeta en un chuck montado al eje y el embrague es acoplado lo que causa que una de las piezas de trabajo gire a una velocidad predeterminada. La pieza de trabajo a unir es sujeta en el extremo y entonces llevada a contacto con la pieza de trabajo girando, y la presión es aplicada para calentar las piezas de trabajo. En un tiempo o velocidad de eje determinado, el embrague es desacoplado y una presión de soldadura es aplicada hasta detener la rotación y completar la soldadura. Después de que el volante es desacoplado, la presión de calentamiento puede ser continuada o la presión de soldadura puede aplicarse inmediatamente. Así ambas, energía cinética y mecánica directa pueden ser usadas para calentar las piezas de trabajo a la temperatura de soldadura, aunque la máquina es diseñada con el intento de que todo el calentamiento se derive de la energía cinética del volante libremente girado, y no de la energía mecánica directa.



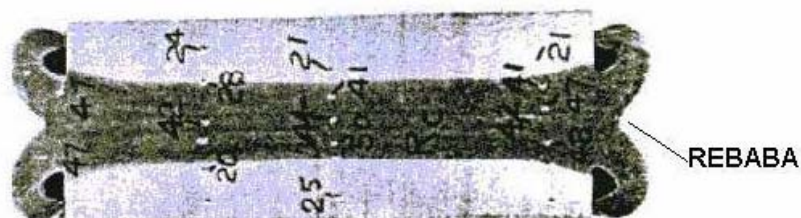
**2.3.3.2 Las variables del proceso.** Las variables en la soldadura por fricción por volante son la velocidad rotatoria, tamaño del volante (momento de inercia), la velocidad de los cortantes y la presión axial. Los efectos de cada variable (excepto la velocidad de los cortantes) en la soldadura es igual que en la soldadura por inercia. La rotación continua del ensamble arrancador-motor-volante hace que la energía de la soldadura casi inmediatamente este disponible en cuanto las piezas de trabajo estén cargadas en los collares o accesorios fijos.<sup>8</sup>

## 2.4 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

Existen otros factores que intervienen de manera cualitativa en la soldadura por fricción, y son las siguientes:

### 2.4.1 LA FUERZA DE LA SOLDADURA.

Para la mayoría de los metales, la fuerza de una unión soldada por fricción es igual que la del metal base. El metal en la interfaz de la soldadura es trabajado en caliente, lo que refina la estructura de grano. Durante la porción final del ciclo de la soldadura, la perturbación y expulsión de rebaba asegura levantamiento de metal oxidado que se puede haber producido durante el calentamiento. Esta rebaba normalmente aparece en el valle de la intersección de las dos soldaduras perturbadas (FIGURA 2.10).



**FIGURA 2.10 .- REBABA O PERTURBACION GENERADA DURANTE LA SOLDADURA.**

Las áreas relativamente grandes sin calentamiento adyacentes a la unión extraen el calor rápidamente de la pequeña masa de la zona afectada por el calor, así guardando la zona pequeña en la parte soldada.

Las propiedades mecánicas de las juntas hechas por la soldadura por fricción son superiores a aquellas de juntas hechas por la soldadura de arco.

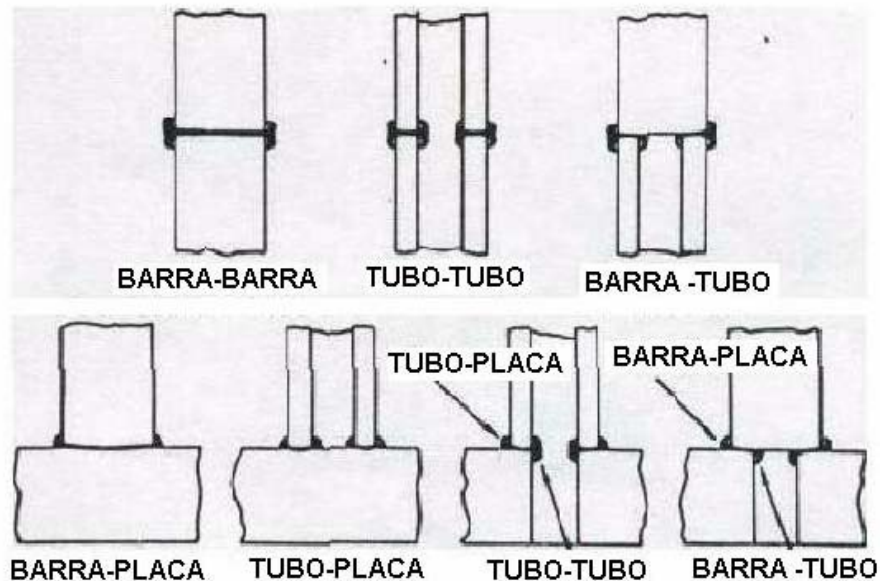
<sup>8</sup> Melvin M. Schwartz .- Metals Joining Manual Editorial McGraw-Hill, E.U.A.

## 2.4.2 LAS SECCIONES SOLDADAS.

En la soldadura por fricción, la cara de la juntura de por lo menos uno de las piezas de trabajo debe ser esencialmente redonda. La rotación de la pieza de trabajo debe ser algo concéntrica en la forma porque se giraran a una velocidad relativamente alta. Las piezas de trabajo que no son redondos, como las piezas de trabajo de forma hexagonal, han sido soldadas por fricción exitosamente, pero la soldadura resultante perturbada es áspera, asimétrica, y difícil quitar sin dañar el ensamble soldado. Para unas aplicaciones especiales, las máquinas para soldar han sido modificadas para que el eje se detenga en el mismo lugar cada tiempo, así mientras haciendo lo posible para que las piezas de trabajo sean orientado una a otra.

## 2.4.3 EL DISEÑO DE LA UNION.

Los mecanismos de la soldadura por fricción restringen su uso para soldaduras de extremo plano y angular que son perpendiculares y concéntricas con el eje de rotación. Las uniones planas son los más comunes y pueden ser clasificadas como: barra a barra, barra a tubo, tubo a tubo, barra a placa, y tubo a placa. Estas clasificaciones se refieren a la propia unión, y no a la forma de las partes. (FIGURA 2.11).



**FIGURA 2.11 .- UNIONES PLANAS MAS COMUNES EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.**

## 2.4.4 LAS CONDICIONES DE LAS SUPERFICIES DE UNION.

El acabado de la superficie y la limpieza, no son críticas para la soldadura por fricción porque las superficies terminadas originales son frotadas y empujadas afuera del proceso.



---

Como en el forjado, el cizallado, el corte por gas, el corte por abrasivo o aserrado las superficies son aceptables, pero el calentamiento extra es necesario para quitar las irregularidades y permitir que ocurra un calentamiento uniforme. También, si la cara de una de las piezas de trabajo no es perpendicular al eje de rotación, se producen fuerzas que puede afectar la concentricidad de los componentes después de la soldadura.

#### **2.4.5 EL CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA.**

La inspección de las soldaduras por fricción normalmente consiste en examinación visual de la soldadura perturbada y la medida de la longitud total del ensamble para determinar la variación en la reducción axial de los miembros durante la soldadura.

La variación en la reducción axial, o metal perdido, es una indicación buena de calidad de la soldadura. Por consiguiente, cuando las longitudes de las piezas de trabajo son sometidas para tolerancias estrechas, la variación esperada en la longitud total del ensamble soldado puede ser calculada usando las tolerancias de las piezas de trabajo y la soldadura perturbada. La cantidad nominal de metal perdido puede determinarse mientras se hacen las pruebas para establecer las condiciones de la soldadura.

Frecuentemente los ensayos de tracción, de doblado, de impacto o de fatiga son usados para verificar la calidad de la soldadura. El Seccionado por examinación microscópica y por pruebas de dureza también es realizado en las muestras de la prueba o en partes de la producción seleccionadas al azar.

La preparación final de las piezas, otra necesidad para asegurar ese requisito de buena alineación y para producir las tolerancias de longitud requeridas para un juego específico de condiciones de soldadura, no es crítica. El uso de la fricción quita las irregularidades de las superficies de la unión y las deja limpias, superficies lisas calentadas por la temperatura de soldadura. En algunas aplicaciones dónde la integridad de la soldadura es importante, una proyección pequeña al centro de uno de los miembros de la soldadura, es usada para asegurar el calentamiento, la acción de forjado apropiado y para eliminar los defectos del centro. Esta proyección es especialmente útil soldando barras de gran diámetro.

#### **2.5 LAS APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.**

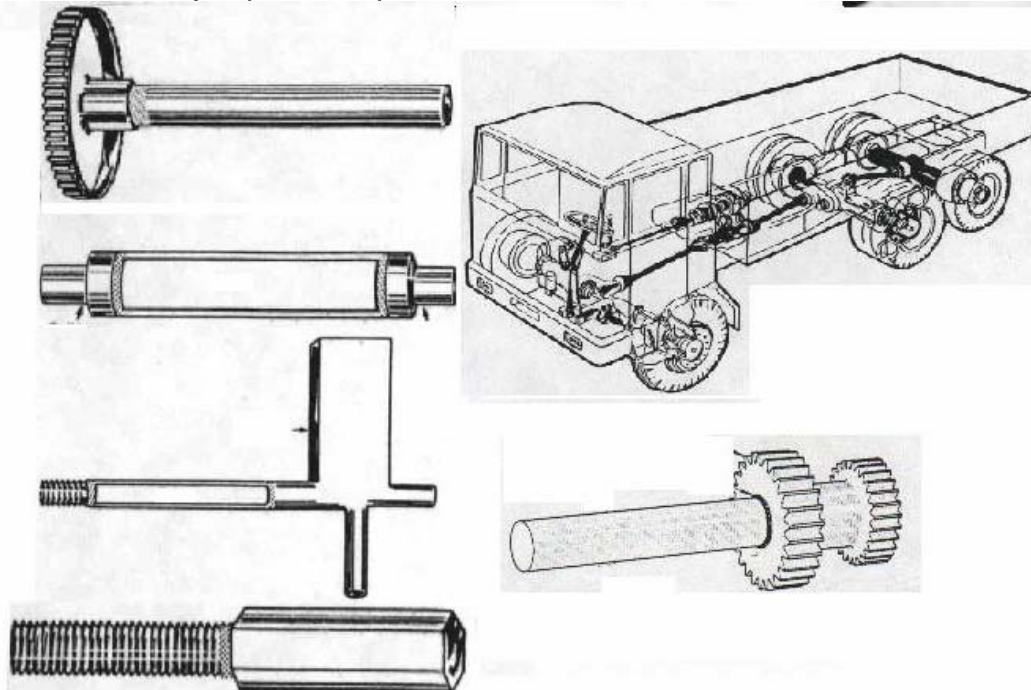
Las aplicaciones de la soldadura por fricción son ilimitadas. Los componentes soldados por fricción en aplicaciones de producción se encuentran en las industrias aeroespacial, agrícola, automotriz, de defensa, marina y petrolera. Entre los componentes de vehículos que se fabrican por soldadura por fricción están:

- Engranés
- Válvulas de motor
- Tubos de ejes
- Componentes de la línea de transmisión
- Varillas de suspensión
- Amortiguadores

Los fabricantes de equipo agrícola con frecuencia sueldan por fricción;

- Vástagos de pistones hidráulicos
- Rodillos guía
- Engranés
- Bujes
- Ejes y componentes similares.

En la Industria eléctrica se emplean mucho las uniones aluminio-cobre soldadas por fricción. Los aceros inoxidable se sueldan por fricción a acero al carbono en diversos tamaños para usarse en sistemas de impulso marinos y bombas de agua de uso doméstico e industrial. Es común sustituir colados y forjados costosos por ensambles soldados por fricción. Para el consumidor podemos encontrar una gran variedad de herramientas manuales así como piezas de equipo deportivo soldadas por fricción. Es importante mencionar que se pueden realizar soldaduras de barras sólidas, tubos, placas y discos, incluyendo sus combinaciones. En la FIGURA 2.12 se presentan varios ejemplos de aplicaciones.



**FIGURA 2.12 .- APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN EN EJES, ENGRANES , TUBERÍAS Y TORNILLOS.**

---

La soldadura por fricción se ha usado en la alta producción las cámaras huecas de precombustión para las máquinas diesel, en la soldadura de volteos para montar bloques por aire y cilindros hidráulicos, en la soldadura de los conectores a los vástagos del pistón, y en la fabricación de ejes y uniones de flecha.

En la industria automotriz, la soldadura por fricción es usada en la fabricación de flechas, ejes, seguidores y válvulas, y para la unión de ejes. Los espacios en blanco para las herramientas de corte son hechos soldando zancas de aceros de bajo carbono o de baja aleación a cuerpos de acero herramental.

Las partes del motor de inyección son hechas soldando componentes fabricados de una aleación resistente al calor a componentes hechos de una aleación endurecida o aleaciones de resistencia durable.

## **2.6 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.**

La soldadura por fricción se ha desarrollado a tal grado que producirá soldaduras confiables con mucha técnica así como ventajas económicas por encima de otros métodos de soldadura comparables. Idealmente, cada nueva aplicación debe tener investigación completa y conciente. Sin embargo, muchas aplicaciones de la soldadura por fricción han tenido resultados de producción exitosos sin la investigación metalúrgica total.

### **2.6.1 VENTAJAS.**

La soldadura por fricción resuelve muchos de los problemas encontrados en la soldadura de extremo eléctrico y elimina la desventaja particular de la rebaba en la soldadura por arco.

Las siguientes son algunas de las ventajas obvias que la soldadura por fricción ofrece por encima de otros procesos:

- En la soldadura por fricción el flujo, metal de aporte o atmósferas de protección no son necesarias.
- El funcionamiento es relativamente limpio, hay salpicadura pequeña, y no se desarrollan arcos o humos.
- La soldadura por fricción (FRW) hace posible la unión de materiales distintos a producción alta y bajo costo. Esto proporciona al diseño ingenieril mayor flexibilidad en el diseño por costo y actuación.
- La soldadura en estado sólido lograda por la FRW generalmente produce propiedades mecánicas y una estrecha zona afectada por el calor que las soldaduras por procesos de soldadura por fusión y tienen un tamaño de grano que frecuentemente es más pequeño que el del metal base.
- La ventaja económica de la FWR puede darse en la fabricación de partes con existencias estándar de barras y tubos en lugar de fundiciones y forjas caras.

- 
- Se pueden automatizar las máquinas de FRW rápidamente para la producción en masa de partes de calidad; por lo tanto, no se requiere experiencia laboral.
  - Bajísimos requisitos de potencia eléctrica. Con la más baja demanda y consumo de potencia, el proceso puede ser considerado frecuentemente en instalaciones donde la soldadura por arco sería imposible. Los costos de potencia en algunas aplicaciones son de 70 a 80% más bajos que en otros procesos.
  - Mejor uso de suelo. porque la FRW no produce destellos desconcertantes o lluvia de chispas, las máquinas pueden instalarse más cerca de otras operaciones en áreas industriales.
  - Economización de material. La pérdida de longitud es más pequeña en la FRW y la posibilidad de combinar materiales no convenientes para soldar por métodos eléctricos ha proporcionado el ahorro sustancial de material.
  - Preparación de probetas es más fácil. La sujeción anterior para soldar es en la mayoría de los casos mucho más simple, y las condiciones de soldadura de la superficie son menos críticas que aquellos que se requirieron para la soldadura de extremo eléctrico.
  - Menos ajuste para mantener la tolerancia dimensional. El proceso de extremo eléctrico requiere dispositivos de sujeción muy conductivos y relativamente suaves que deben tener maquinado frecuente y ajuste para mantener las tolerancias. El Chuck forrado de las máquinas de FWR son endurecidos y revestidos para proporcionar buena exactitud y vida de servicio más larga.
  - Adaptable a los procesos automáticos. En muchas aplicaciones, la carga y descarga automática de la máquina, así como un indicador de las partes y la transferencia a otras operaciones, es posible.
  - Mejor control de las variables de soldadura. La fiabilidad de la soldadura no está influenciada por la corriente de soldadura o la resistencia eléctrica en la junta soldada. Estas variables críticas en la soldadura eléctrica son dependientes en parte, de la máquina de soldadura, de la potencia eléctrica disponible en el tiempo de soldadura. Con la FRW las variables dependientes pueden controlarse fácilmente y ajustarse por el personal de la producción.
  - La eliminación de inclusiones en la soldadura. La FRW elimina ampliamente la inclusión de material extraño en el área de la soldadura. Esto lleva a una calidad de junta de soldadura más alta y proporciona algunas ventajas metalúrgicas.

## **2.6.2 LAS LIMITACIONES.**

A pesar de todas las ventajas, la FRW tiene varias limitaciones:

- Por lo menos uno de los objetos a ser unido debe ser redondo (o casi redondo) en la interfase y debe tener un tamaño y forma que puedan sujetarse y puedan girar a la velocidad que se requiere.

- 
- En las juntas de caras planas, una considerable perturbación se produce debido a la deformación plástica en las fases finales del ciclo de la soldadura, y el levantamiento de la perturbación puede ser necesario.
  - Las superficies a ser soldadas deben ser perpendiculares al eje de rotación, uniones de extremos angulares soldados no son fáciles de hacer, y la buena alineación de las partes es crítica.
  - La pieza de trabajo debe poder resistir el torque y la presión axial impuestas durante el calentamiento y el forjado.
  - Los dispositivos de fijación o sujeción deben ser bastante fuertes para resistir choques pesados y cargas de torque.
  - El proceso es restringido para aplastar y soldar extremos angulares que son concéntricos con el eje de rotación.
  - Las máquinas convencionales de soldadura por fricción requieren costosas modificaciones para ser capaces de soldar piezas de trabajo que deben tener un alineamiento angular final.

## **2.7 LA ECONOMIA DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN EN EL FUNCIONAMIENTO Y EN EL MATERIAL.**

La soldadura por fricción puede ser hecha a velocidades de producción altas, y por consiguiente es barato en el funcionamiento. En aplicaciones donde la soldadura por fricción ha reemplazado otros procesos de unión, la proporción de la producción se ha aumentado sustancialmente.

Los ahorros sustanciales en el material y en el tiempo de maquinado pueden ser realizados por el uso de la soldadura por fricción para unir fragmentos de flechas a cuerpos de rotor de gran diámetro u otros miembros girando.

---

# CAPITULO 3.

## LOS ACEROS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.

Una de las grandes virtudes del proceso de soldadura por fricción es que puede ser aplicada a la unión de metales tanto idénticos como a distintos, uniones que por la diferencia de las propiedades físicas entre metales, no se podrían realizar o llevar a cabo en muchos de los procesos de soldadura convencionales.

En este capítulo se hará una breve descripción de los materiales que se utilizaron en este trabajo, en cuanto a su composición, propiedades mecánicas, a sus estructuras cristalinas, tamaño de grano y elementos aleantes (principalmente de los aceros de bajo contenido de carbono),. También se hablará a grandes rasgos de las principales pruebas mecánicas aplicadas a los materiales, así como el papel que juega el fenómeno de difusión en la unión de los metales en estudio y la aplicación del proceso de soldadura por fricción en estos.

### 3.1 DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C (HIERRO-CARBURO DE HIERRO).

Para la realización de este trabajo de tesis, se necesitan saber ciertos antecedentes para el acero 1018 antes de ser soldado por proceso de soldadura por fricción. Estos antecedentes consistirán en conocer el tipo de acero que es en cuanto a su contenido de carbono, así como las distintas fases presentes en este tipo de acero en función de su temperatura.

Una de las herramientas que nos permiten conocer de manera sencilla y rápida algunas de las características de las aleaciones son los diagramas de fases de las aleaciones. Uno de los diagramas de aleaciones más conocido y utilizado es el del Hierro y el carbono (FIGURA 3.1). También conocido como diagrama hierro-carburo de hierro (Fe-Fe<sub>3</sub>C). Con este diagrama se pueden obtener las temperaturas de cambio de sus estructuras cristalinas; también se pueden conocer las temperaturas a las que se da el cambio de fase de un acero. En función a la cantidad de carbono que contiene el metal se puede estimar la temperatura a la que se fundirá y a la que se volverá pastoso.

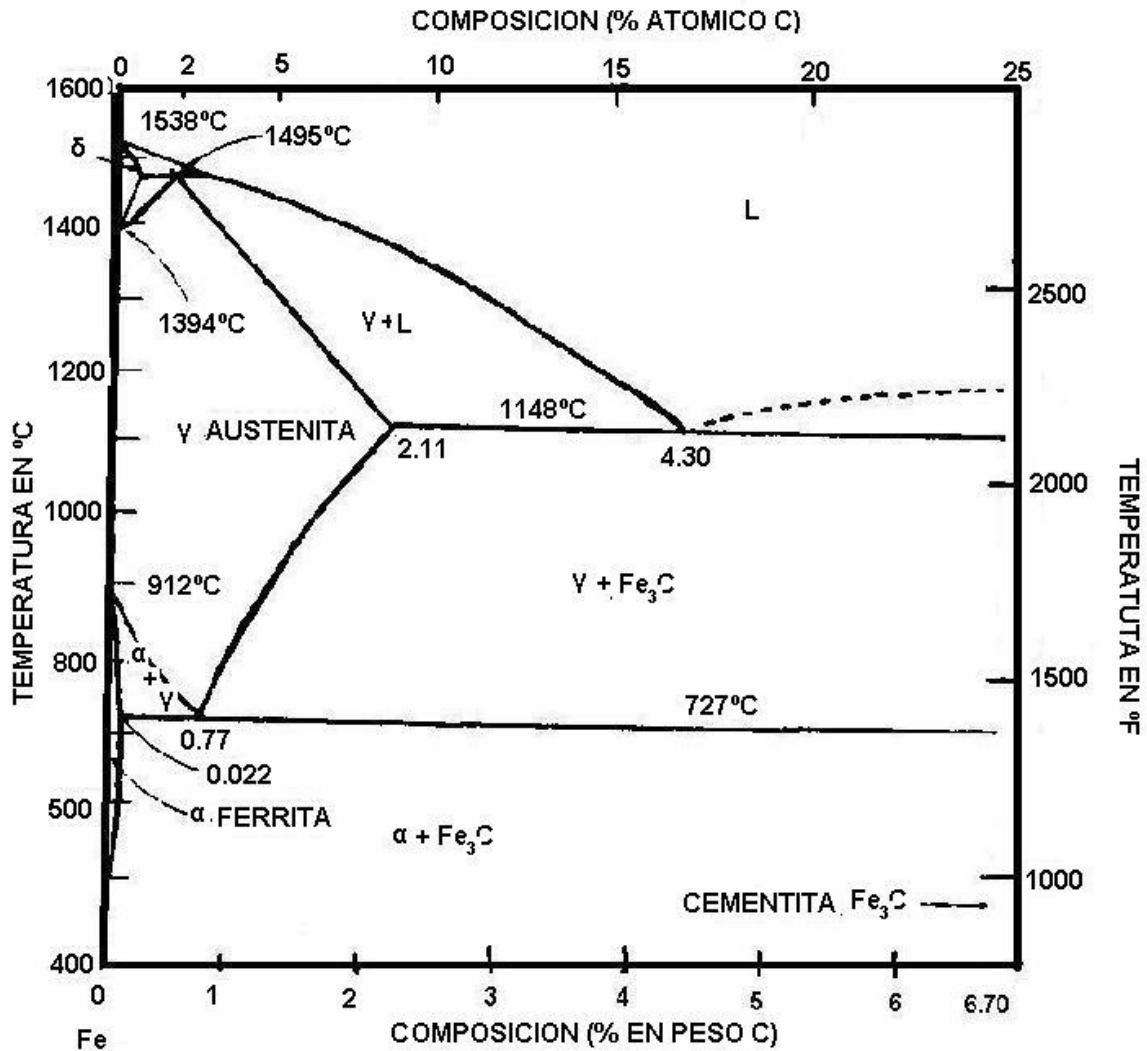


FIGURA 3.1 .- FRAGMENTO DEL DIAGRAMA HIERRO CARBURO DE HIERRO.

---

En el eje horizontal del diagrama de hierro-carburo de hierro, se ubica el porcentaje de carbono que puede estar diluido en el hierro y en el eje vertical se señalan las temperaturas a las que van sucediendo los cambios señalados en el cuerpo de la gráfica.

Al conocer la cantidad de carbono que tiene un acero se pueden estimar la temperatura a la que se debe elevar para que se den los diferentes cambios de estructura o de estado. Por ejemplo si se tiene un acero con 0.4% de carbono, se deberá elevar su temperatura hasta los 727°C para que el hierro alfa y la cementita empiecen a convertirse en austenita y ferrita. Aproximadamente a los 800°C ese mismo hierro cambiará su estructura a hierro gamma o austenita, a los 1495°C empieza a fundirse y arriba de los 1538°C se ha fundido todo.

### **3.2 CLASIFICACION DE LOS ACEROS.**

A los aceros que están debajo de 0.77% de carbono se les llama hipoeutectoides y a aquellos que tienen más de 0.77% de carbono se llaman hipereutectoides. El punto eutéctico es aquel en el que se logra la máxima difusión de carbono posible en un acero a la menor temperatura. En caso de los hierros con carbono el punto eutéctico se da con 0.77% de carbono y a 727°C.

Cada vez que se rebasa una zona en la gráfica de Fe-Fe<sub>3</sub>C, se está cambiando de estructura en el hierro que se está tratando.

De acuerdo al diagrama de hierro-carburo de hierro, el hierro puede aceptar determinadas cantidades de carbono diluidas, estas cantidades nunca son superiores al 4%. En los casos en los que se rebasa el 4% de carbono el hierro es de muy baja calidad.

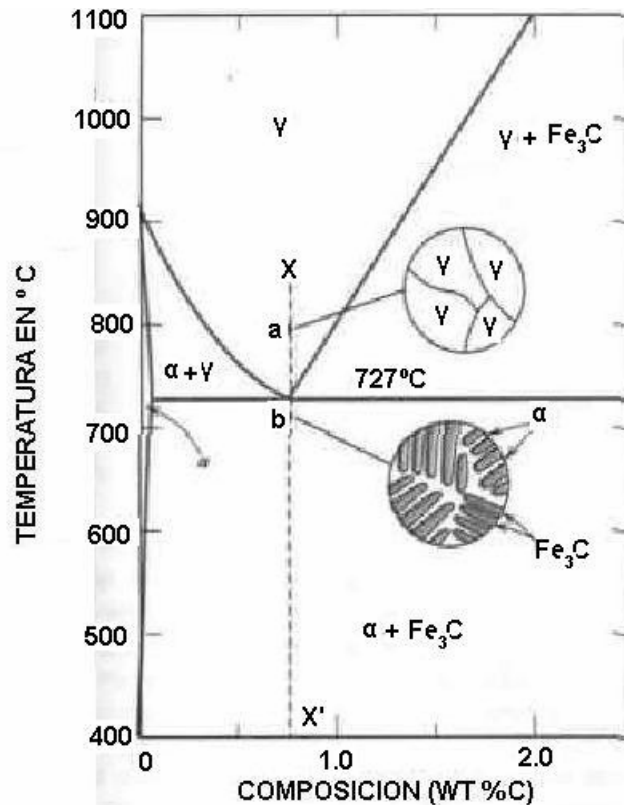
Los aceros más utilizados en los procesos de manufactura son los siguientes:

- Acero dulce, que es el que contiene un porcentaje de carbono menor al 0.01%.
- Aceros, que son los que contienen un porcentaje de carbono ente el 0.1% y el 2.0%.
- Hierro fundido, que son los que contienen un porcentaje de carbono encima del 2.0% pero menor al 4.0%.

#### **3.2.1 ACERO EUTECTOIDE.**

Una aleación eutectoide es aquella que tiene una composición de 0.77% C. Al enfriar esta composición desde los 800 °C de la región monofásica y que es el punto *a* (FIGURA 3.2) equivale a descender por la vertical *xx'*. Al enfriar no ocurre ningún cambio hasta llegar a la temperatura eutectoide (727°C). En el punto *b* (FIGURA 3.2), por debajo de esta temperatura, la austenita se transforma en ferrita más cementita. Este cambio de fase necesita la difusión del carbono porque las tres fases tienen distinta composiciones.





**FIGURA 3.2 .- MICROESTRUCTURAS DE UN ACERO EUTECTOIDE.**

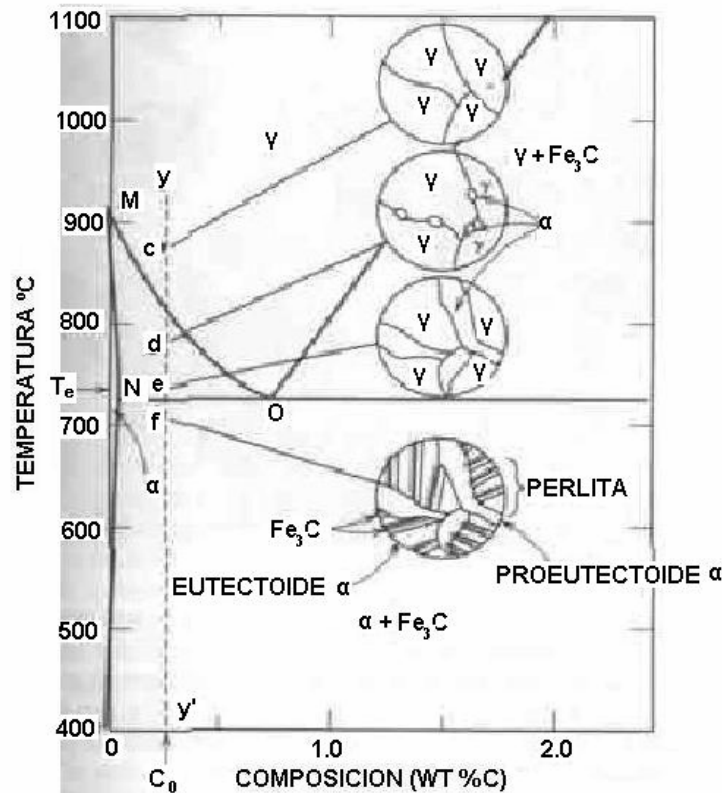
La microestructura del acero eutectoide enfriado lentamente a través de la temperatura eutectoide forma capas o láminas alternadas de dos fases ( $\alpha$  y  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) durante la transformación. A esta microestructura se denomina perlita porque tiene la apariencia de la madre perla. La perlita aparece en granos denominados colonias; dentro de cada colonia las capas están orientadas en la misma dirección y esta dirección varía de una colonia a otra. Las capas claras son de ferrita y las oscuras de cementita. La disposición alternada de capas  $\alpha - \text{Fe}_3\text{C}$  se debe a que el carbono necesita difundir durante una distancia relativamente corta para originar esta microestructura.<sup>9</sup>

### 3.2.2 ACERO HIPOEUTECTOIDE.

Una aleación de composición  $C_0$  a la izquierda del eutectoide entre 0.022 y 0.77% C se denomina aleación hipoeutectoide (menos que la eutectoide). El enfriamiento de una aleación de esta composición está representado en el descenso a lo largo de la vertical  $yy'$  (FIGURA 3.3). Hacia los 875°C, punto  $c$  (FIGURA 3.3), la microestructura consta enteramente de granos de fase  $\gamma$ . En el punto  $d$  (FIGURA 3.3) de la región bifásica  $\alpha + \gamma$ , a unos 775°C, estas fases coexisten, según indica el esquema microestructural. La mayoría de las partículas  $\alpha$  se generan en los límites

<sup>9</sup> Callister D. William .- Ciencia e Ingeniería de los Materiales Editorial Reverté S. A., España.

de los granos originales. Las composiciones de las fases  $\alpha$  y  $\gamma$  se determinan utilizando la regla de la palanca, cuyos extremos coinciden con 0.020 y 0.50% C. respectivamente.



**FIGURA 3.3 .- MICROESTRUCTURAS DE UN ACERO HIPOEUTECTOIDE.**

Cuando se enfría un acero a través de la región de fases  $\alpha+\gamma$ , la composición de la ferrita varía según la línea MN, del límite de fase  $\alpha-(\alpha+\gamma)$  y se enriquece ligeramente en carbono. Al mismo tiempo, la composición, de la austenita cambia de modo mucho más drástico, pues la composición frente a la temperatura sigue la línea MO del límite de fase  $(\alpha+\gamma) - \gamma$ . Enfriando desde el punto *d* (FIGURA 3.3) al *e* (FIGURA 3.3), muy próximo al eutectoide pero dentro de la región  $\alpha+\gamma$ , se aprecia un incremento de la microestructura de la fracción de Fase  $\alpha$ . En este punto las composiciones de las fases  $\alpha$  y  $\gamma$  se determinan dibujando la recta de reparto a la temperatura  $T_e$ ; la fase  $\alpha$  contiene 0.022% C, mientras que la fase  $\gamma$  tiene la composición del eutectoide 0.77% C.

Al descender la temperatura al punto *f* (FIGURA 3.3) , justo por debajo del eutectoide, toda la fase  $\gamma$ , presente en la temperatura  $T_e$ , y con la composición del eutectoide, se transforma en perlita. La fase  $\alpha$  existente en el punto *e* prácticamente no cambia al cruzar la temperatura eutectoide; permanece como matriz continua alrededor de las colonias de perlita. De este modo la ferrita presente en el acero procede del enfriamiento a través de la región  $\alpha+\gamma$  y de la reacción eutectoide. La ferrita de la perlita se denomina ferrita eutectoide y la ferrita formada antes de  $T_e$  se denomina

ferrita proeutectoide. La ferrita proeutectoide y la perlita son los microconstituyentes que aparecen en todos los aceros hipoeutectoides enfriados lentamente desde la temperatura eutectoide.

El acero 1018, que es el metal que será utilizado en este estudio, se encuentra dentro de este tipo de acero por su bajo contenido de carbono.

### 3.2.3 ACERO HIPEREUTECTOIDE.

Una aleación de composición entre el 0.77 y el 2.11% C se conoce como aleación hipereutectoide. El enfriamiento desde el campo  $\gamma$  de aceros al carbono de composición comprendida entre 0.77 y 2.11% en peso de carbono, origina transformaciones y microestructuras análogas. El acero de composición  $C_1$  se enfría descendiendo por la vertical  $zz'$  (FIGURA 3.4). En el punto  $g$  (FIGURA 3.4) solo aparecen granos de fase  $\gamma$  y composición  $C_1$ . Al enfriar a lo largo del campo de fase  $\gamma + Fe_3C$ , hasta el punto  $h$  (FIGURA 3.4), por ejemplo la fase cementita va creciendo en los límites iniciales de los granos  $\gamma$ , esta cementita se denomina cementita proeutectoide por que se forma antes de la reacción eutectoide.

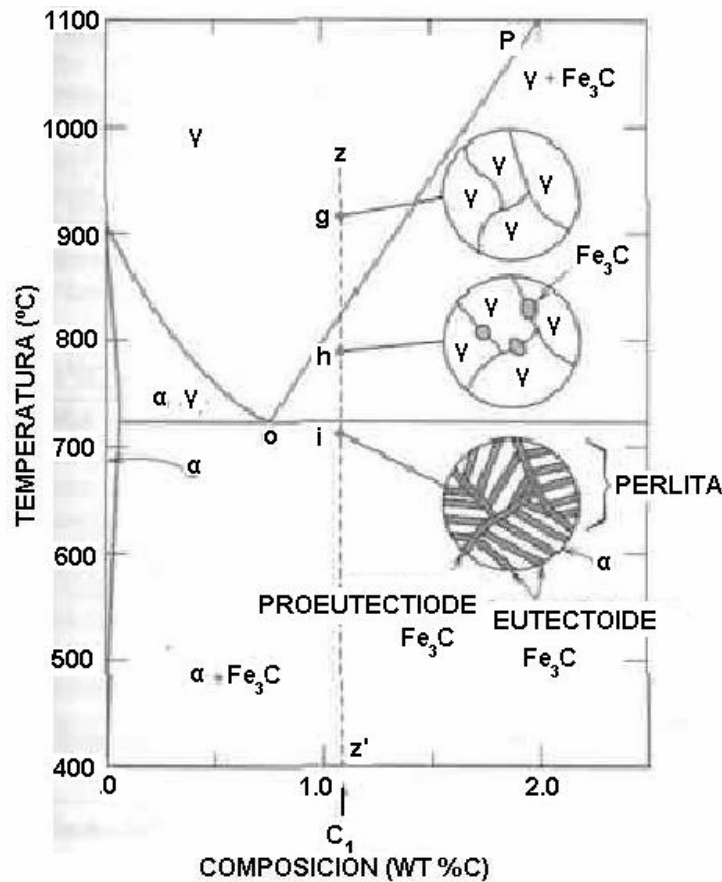


FIGURA 3.4 .- MICROESTRUCTURAS DE UN ACERO HIPEREUTECTOIDE.

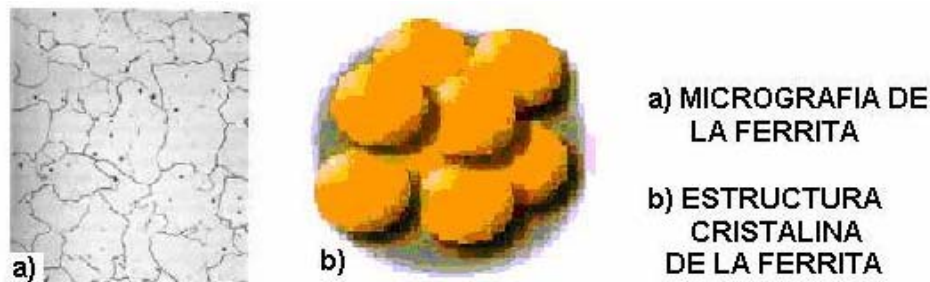
La composición de la austenita permanece constante al variar la temperatura. Sin embargo, la composición de la austenita se desplaza a lo largo de la línea PO antes del eutéctico. Al descender por debajo de la temperatura eutéctica, toda la austenita remanente de composición eutécticoide se transforma en perlita.

### 3.3 ESTRUCTURAS DE LOS ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.

Para poder realizar la caracterización de la soldadura por fricción en el acero 1018, es importante conocer las estructuras que se puedan generar en este, ya que al realizar la soldadura, el acero se llevará a la temperatura de fusión, lo cual hará cambiar su estructura. A continuación se hablará brevemente de estas estructuras.

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono. Este acero contiene menos del 0.25% C, no responde al tratamiento térmico para formar martensita. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad: además son fáciles de maquinar, soldables y baratos. +

La estructura que presenta el hierro a temperatura ambiente, se conoce como hierro alfa o ferrita y tiene una estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado. Tiene átomos en cada uno de los vértices del cubo que integra a su estructura y un átomo en el centro. (FIGURA 3.5).



**FIGURA 3.5 .- ESTRUCTURA DE HIERRO A TEMPERATURA AMBIENTE.**

La estructura cristalina cúbica de cara centrada aparece en el hierro cuando su temperatura se eleva más allá de los 912°C y hasta aproximadamente 1400°C, se conoce como hierro gamma o austenita. Tiene átomos en los vértices y en el centro de cada una de sus caras, su cambio es notado por la modificación de sus propiedades eléctricas, por la absorción de calor y por las distancias intermoleculares. (FIGURA 3.6).



**FIGURA 3.6 .- ESTRUCTURA DEL HIERRO ENTRE LOS 900 Y 1400 °C.**

### **3.4 TAMAÑO DE GRANO DE LOS ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.**

Cuando un acero en su estado líquido se enfría sus cristales o granos, se van solidificando formando estructuras dendríticas, las que crecen uniformes hasta que se encuentran con otra estructura que también ha estado creciendo, en ese lugar de encuentro de las dos estructuras se forman los límites de los granos de los aceros. Un acero con granos pequeños será más duro y resistente que uno con granos grandes, debido a que los granos grandes tienden a fracturarse y deslizarse uno sobre el otro, lo que no sucede con los granos pequeños.

La mejor forma de determinar el tamaño de grano de un material es por medio de microscopio metalúrgico o electrónico de transmisión, el que actúa por medio de un haz de electrones que se lanza sobre una superficie pulida al espejo y atacada con una mezcla de 3% de ácido nítrico y 97% de alcohol etílico. Los contrastes de la imagen se consiguen por diferencias del haz difractado o dispersado por varios elementos de la microestructura o defecto. La examinación microscópica constituye una herramienta extremadamente útil para el estudio y la caracterización de los aceros.

### **3.5 ACEROS ALEADOS.**

Los aceros al ser calentados pueden modificar su estado físico pasando por varias etapas, las que van desde la alteración de algunas de sus propiedades hasta el cambio de su estado sólido al líquido. El qué tan rápido o con qué tanta energía se logra un cambio de estado en un metal dependerá de los elementos aleantes que lo integran. Se debe recordar que casi nunca se utilizan metales puros. A la combinación química de dos o más metales se le llama aleación y las propiedades de las aleaciones dependen también de los metales que la integran. La aleación de los aceros consiste en añadir intencionadamente elementos metálicos en concentraciones específicas, estos elementos aleantes pueden ser el cobre, vanadio, níquel, molibdeno y cromo. En los aceros de bajo contenido de carbono solo contienen concentraciones residuales de impurezas distintas al carbono.

---

Una parte importante que interviene en la calidad de la soldadura por fricción de un acero, es la calidad de dicho acero a soldar, la cual se basa en el contenido y tipo de elementos aleantes presentes. En seguida se hablará brevemente de los principales aleantes en el acero 1018.

### **3.5.1 ELEMENTOS ALEANTES EN LOS ACEROS DE BAJO CARBONO.**

Existen muchos elementos químicos que dan las características de ingeniería a las aleaciones ferrosas, sin embargo hay algunos que se destacan por sus efectos muy definidos, a continuación se presentan algunos de estos elementos:

#### **3.5.1.1 Carbono.**

El carbono es el elemento aleante más importante en acero. Es esencial en la formación de cementita (y otros carburos), perlita, esferoidita (un agregado de carburos esféricos en una matriz de ferrita), bainita y hierro carbono martensítico. Las microestructuras que comprende uno o más de estos componentes pueden proporcionar una gama amplia de propiedades mecánicas y características de fabricación. Las cantidades y distribuciones relativas de estos elementos pueden manipularse por tratamientos térmicos para alterar la microestructura, y por consiguiente las propiedades, de una pieza particular de acero. El esfuerzo y la dureza se aumentan cuando el volumen del carbono se aumenta; sin embargo, la resistencia y la ductilidad son reducidas por el aumento en el contenido de carbono (manejabilidad, soldabilidad, y maquinabilidad también son afectadas por altos contenidos del carbono). Arriba del 4% baja la calidad del acero, sin embargo se puede decir que es el elemento que da la dureza al acero y por medio de sus diferentes formas en las que se presenta, se pueden definir varias propiedades de las aleaciones y su grado de maquinabilidad.

**3.5.1.2 Silicio.** El Silicio es uno de los desoxidantes principalmente usado en la fabricación del acero. La cantidad de este elemento en un acero, que no siempre es nombrado en las especificaciones de la composición química, depende de la práctica de la desoxidación especificada para el producto. En aceros de bajo carbono, el silicio es normalmente perjudicial en la calidad de la superficie, y esta condición es más pronunciada en las calidad del acero de bajo carbono resulfurizado. Este elemento hasta un 3.25% es un ablandador del hierro y es el elemento predominante en la determinación de las cantidades de carbono en las aleaciones de hierro. El silicio arriba de 3.25% actúa como endurecedor. Las fundiciones con bajo contenido de silicio responden mejor a los tratamientos térmicos. El Silicio ligeramente aumenta la fuerza de la ferrita, sin causar una pérdida seria de ductilidad. En cantidades más grandes, aumenta la resistencia de acero a la formación de incrustaciones de óxidos al aire (a aproximadamente 260 °C, o 500 °F) y disminuciones la pérdida de histéresis magnética. Tales aceros de alto silicio son generalmente difíciles de procesar.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Irons, Steels and High-Performance Alloys Metal Handbook, part II.

---

**3.5.1.3 Manganeso.** Es un elemento importante en la fabricación de acero porque lo desoxida en la fusión y facilita el trabajo en caliente del acero reduciendo la susceptibilidad de fragilidad en caliente. Cuando el manganeso se agrega a la fundición arriba del 0.5% sirve para eliminar al azufre del hierro. Como la mezcla producto del azufre y el manganeso tiene baja densidad flota y se elimina en forma de escoria. La combinación del manganeso y el azufre forman inclusiones de sulfuro de manganeso que mejora la maquinabilidad del acero. También aumenta la fluidez, resistencia y tiene un efecto fuerte en el incremento de la dureza de un acero. El manganeso es benéfico para la calidad de la superficie del acero.

**3.5.1.4 Azufre.** No sirve de mucho en el acero, debe ser eliminado y controlado.

**3.5.1.5 Fósforo.** Es un elemento que aumenta la fluidez del metal fundido y reduce la temperatura de fusión.

El azufre y fósforo normalmente son usualmente considerados deteriorantes de las propiedades mecánicas de los aceros; por consiguiente, se ponen restricciones en las cantidades aceptables de estos elementos para la mayoría de las calidades. Las cantidades de azufre y fósforo invariablemente son reportadas en los análisis de aceros al carbono y aceros aleados. Otros elementos residuales generalmente ejercen una influencia menor que la del azufre y el fósforo en las propiedades de acero. Para muchas calidades de acero, las limitaciones en las cantidades de estos elementos residuales son opcionales o enteramente omitidas. Generalmente no se informan las cantidades de elementos residuales en la hornada o en el análisis del producto, salvo razones especiales.

### **3.6 PROPIEDADES DE LOS ACEROS Y PRUEBAS MECANICAS.**

Para poder realizar el estudio de la caracterización de una soldadura, se necesita evaluar la integridad y calidad de esta, y esto se logra aplicando pruebas mecánicas, por lo que a continuación se realizará una breve descripción de las pruebas mecánicas más comunes.

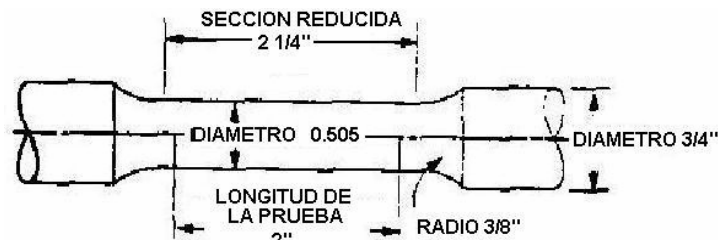
Las principales propiedades físicas de los materiales incluyen densidad, presión de vapor, expansión térmica, conductividad térmica, propiedades eléctricas y magnéticas, así como las propiedades de ingeniería o mecánicas. En los procesos de manufactura son de gran importancia las propiedades de ingeniería o mecánicas, de las que destacan las siguientes:

- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la torsión.
- Ductilidad.
- Prueba al impacto o de tenacidad.
- Dureza.

Cada una de las propiedades antes señaladas requiere de un análisis específico y detallado, lo que se da en asignaturas como las de ciencia de materiales y resistencia de materiales. A continuación sólo se presentan algunas de sus principales características.

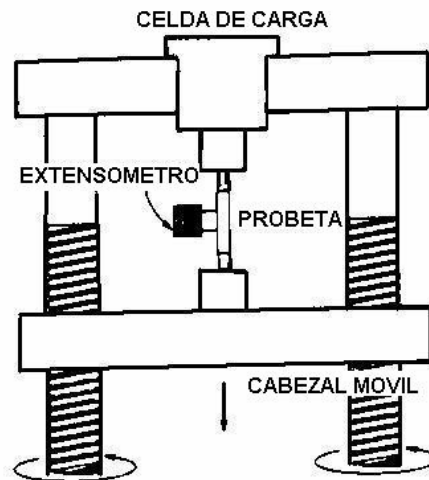
### 3.6.1 RESISTENCIA A LA TRACCION.

Se determina por el estirado de los dos extremos de una probeta con dimensiones perfectamente determinadas (FIGURA 3.7) y con marcas previamente hechas.



**FIGURA 3.7 .- PROBETA PARA EL ENSAYO DE TRACCION.**

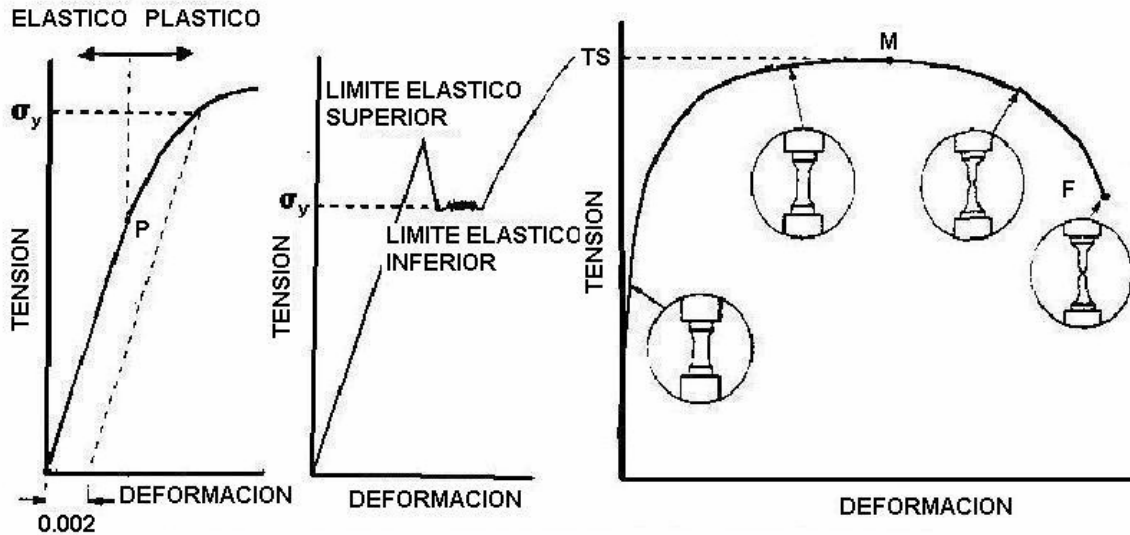
Al aplicar una carga uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta, (FIGURA 3.8) que aumenta gradualmente en los dos extremos y se mide la deformación relacionándola con la carga aplicada hasta que la probeta rebasa su límite de deformación elástica y se deforma permanentemente o se rompe.



**FIGURA 3.8 .- MAQUINA DE ENSAYO DE TRACCION.**

Los resultados de las pruebas de resistencia a la tracción se plasman en series de curvas que describen el comportamiento de los materiales al ser estirados, de dichas graficas se pueden obtener los valores del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de ruptura, resistencia a la tracción, punto de ruptura, así como los límites plásticos y elásticos (FIGURA 3.9).

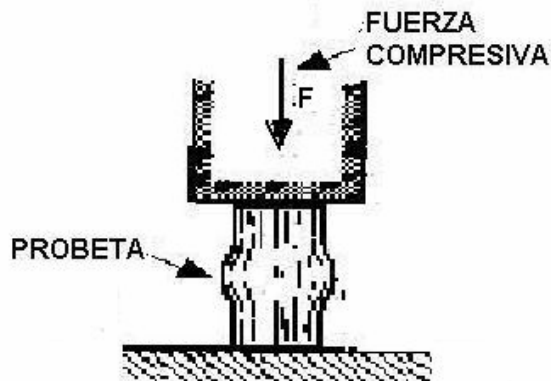




**FIGURA 3.9 .- CUERVAS OBTENIDAS EN EL ENSAYO DE TRACCION.**

### 3.6.2 RESISTENCIA A LA COMPRESION.

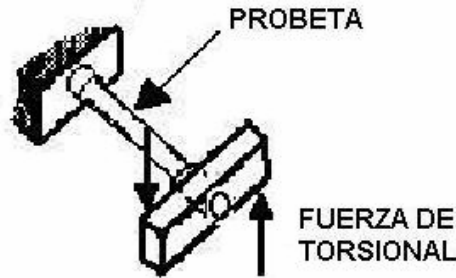
La prueba de compresión se realiza de forma similar a la de tracción, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. Esta prueba se realiza cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes o bien cuando se tiene un comportamiento frágil a tracción (FIGURA 3.10).



**FIGURA 3.10 .- ENSAYO DE COMPRESION.**

### 3.6.3 RESISTENCIA A LA TORSION.

Consiste en deformar un miembro estructural (FIGURA 3.9), por medio de fuerzas torsionales las cuales producen un movimiento rotacional alrededor del eje longitudinal de un extremo del miembro respecto al otro extremo. Los ensayos de torsión se realizan generalmente sobre cilindros sólidos y tubos.



**FIGURA 3.11 .- ENSAYO DE TORSION.**

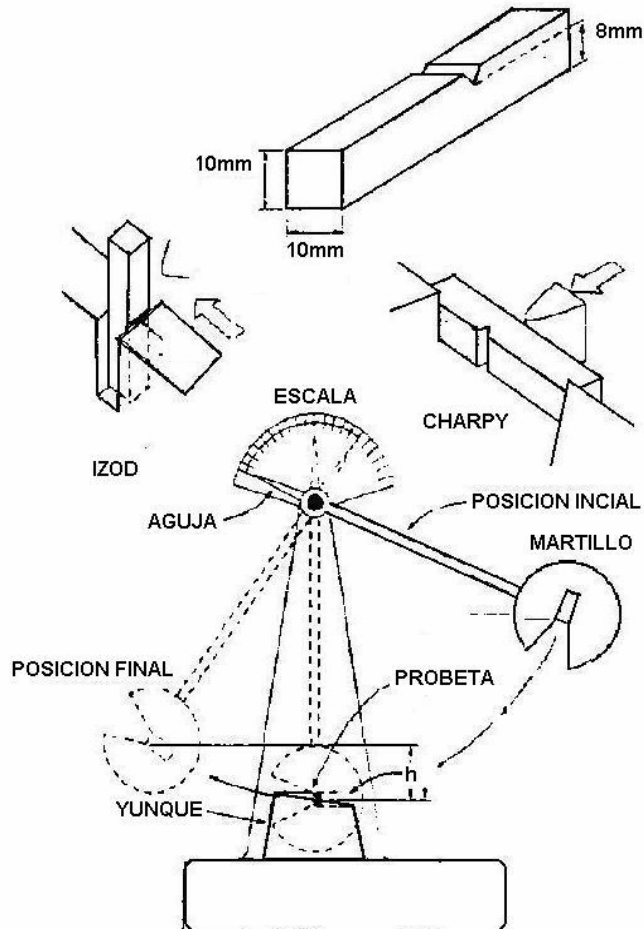
### **3.6.4 DUCTILIDAD.**

Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil. La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como el alargamiento relativo porcentual, o bien por el porcentaje de reducción del área.

El conocimiento de la ductilidad de un material es importante por lo menos por dos razones. En primer lugar, se puede indicar el grado en que una estructura podrá deformarse antes de producirse la rotura, y en segundo lugar se especifica el grado de deformación que puede permitirse durante las operaciones de conformación.

### **3.6.5 TENACIDAD.**

Es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura. La tenacidad de fractura es una propiedad que nos indica la resistencia a la fractura de un material cuando existe una grieta. Se determina por medio de pruebas de impacto (Charpy ó Izod) (FIGURA 3.12) en la que una probeta con dimensiones como se muestra en la figura tiene forma de barra con una muesca en V, donde la carga es aplicada en forma de un golpe con un martillo en forma de péndulo.



**FIGURA 3.12 .- ENSAYO DE IMPACTO.**

### **3.6.6 DUREZA.**

Por lo regular se obtiene por medio del método denominado resistencia a la penetración, la cual consiste en medir la marca producida por un penetrador con características perfectamente definidas y una carga también definida; entre más profunda es la marca generada por el penetrador de menor dureza es el material.

Existen varias escalas de dureza, estas dependen del tipo de penetradores que se utilizan y las normas que se apliquen. Las principales pruebas de dureza son Rockwell, Brinell y Vickers, y cada una de ellas tiene su escala de dureza. (FIGURA 3.13).

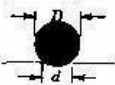

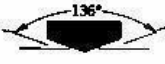





ENSAYO	PENETRADOR	FORMA DEL PENETRADOR		CARGA	FORMULA PARA EL NUMERO DE DUREZA
		VISTA LATERAL	VISTA SUPERIOR		
BRINELL	ESFERA DE 10mm DE ACERO O DE CARBURO DE TUNGSTENO			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
MICRODUREZA VICKERS	PIRAMIDE DE DIAMANTE			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
ROCKWELL Y ROCKWELL SUPERFICIAL	CONO DE DIAMANTE ESFERAS DE ACERO DE 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 IN DE DIAMETRO	  	  	60 kg } 100 kg } ROCKWELL 150 kg } 15 kg } 30 kg } ROCKWELL 45 kg } SUPERFICIAL	

FIGURA 3.13 .- TIPOS DE ENSAYOS DE DUREZA.

En la prueba de dureza Rockwell se usan penetradores de bolas esféricas de acero endurecido y un penetrador cónico de diamante. En la prueba de dureza Brinell se fuerza un penetrador duro esférico en la superficie del metal a ensayar. En la prueba de dureza Vickers se usa un penetrador de diamante muy pequeño y de geometría piramidal. Esta última prueba es utilizada en materiales frágiles, como las cerámicas. En las pruebas de dureza Rockwell y Brinell los penetradores generan marcas en los metales a probar, posteriormente se mide la profundidad de las marcas. En algunas publicaciones se considera a la prueba Rockwell como la prueba del sistema inglés y a la Brinell como la del sistema métrico.

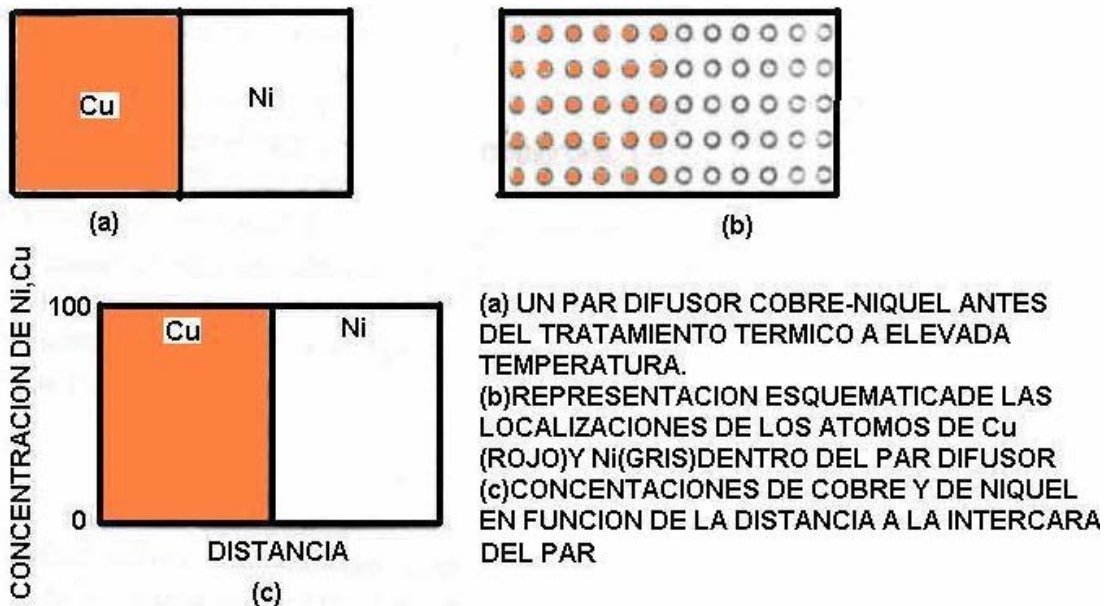
Para la evaluación de la calidad e integridad de la unión por el proceso de soldadura por fricción, se realizará únicamente los ensayos de dureza y tracción en este trabajo.

### 3.7 DIFUSION EN LOS MATERIALES.

Todo proceso de soldadura involucra un mecanismo de difusión, que es un fenómeno de transporte por movimiento atómico y que en este punto citaremos los desarrollos matemáticos de la difusión y la influencia de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias difusivas en la velocidad de difusión.

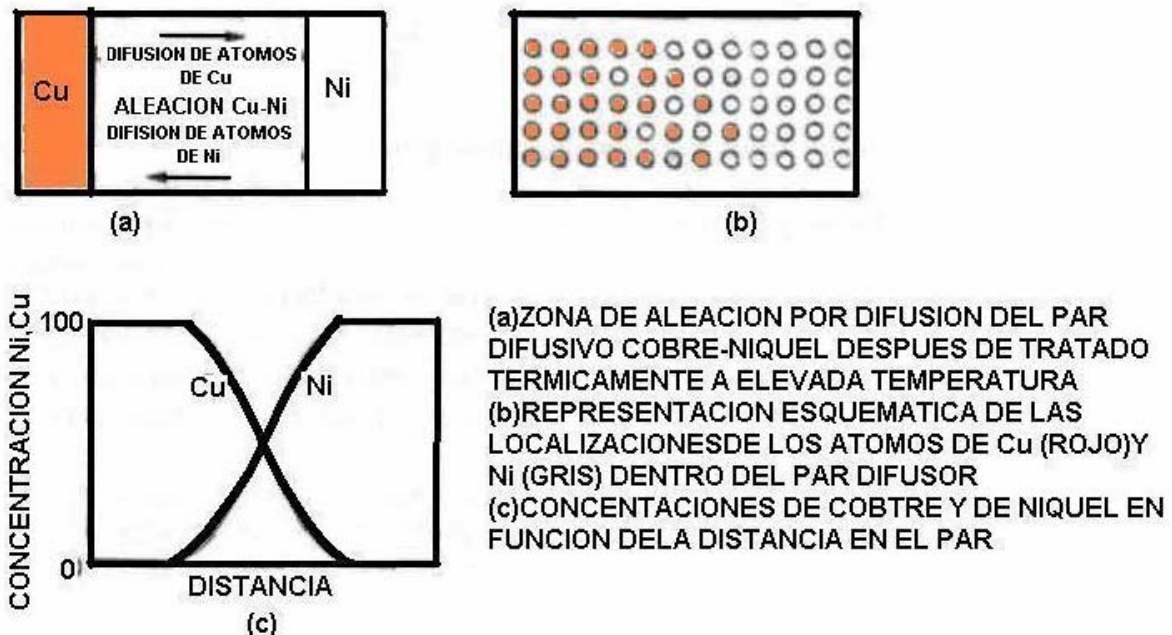
La mayor parte de los procesos y reacciones más importantes del tratamiento de materiales se basa en la transferencia de masa, dentro de un determinado sólido (generalmente a nivel microscópico), o bien desde un líquido, un gas u otro sólido. A este fenómeno de transporte por movimiento atómico se le llama **difusión** y este se puede demostrar mediante el *par difusor* formado por la unión de dos metales puestos en contacto a través de las dos caras, por ejemplo, para el cobre y el níquel (FIGURA 3.14), donde se representa la posición de los átomos y la composición a través de la intercara.

Este par de materiales se calientan a elevada temperatura (por debajo de la temperatura de fusión de ambos metales) durante un periodo de tiempo largo y luego se enfría a temperatura ambiente.



**FIGURA 3.14 .- DEMOSTRACION DEL FENOMENO DE DIFUSION.**

El análisis de los materiales revela una condición parecida a la representada en la siguiente figura (FIGURA 3.15).



**FIGURA 3.15 .- VARIACION DE LA COMPOSICION DE AMBOS METALES EN FUNCION DE LA DISTANCIA.**

El cobre y níquel puros en los extremos del par, separados por una región de aleación. La composición de ambos materiales varía con la distancia. Este resultado indica que los átomos de cobre han emigrado o difundido dentro del níquel y que el níquel ha difundido dentro del cobre. Este proceso, en que los átomos de un metal difunden en el otro, se le conoce como *interdifusión o difusión de impurezas*. Desde el punto de vista macroscópico, la interdifusión se interpreta como los cambios de concentración que ocurren con el tiempo, como en el par de difusión Cu-Ni. Existe un claro transporte de átomos desde las regiones de elevada concentración a las de baja concentración. Esta difusión también ocurre en metales puros, donde los átomos del mismo tipo intercambian posiciones y se denomina autodifusión.

### 3.7.1 MECANISMOS DE DIFUSION.

La difusión consiste en la migración de los átomos de un sitio de la red a otro sitio a nivel atómico. En los metales y en otros materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento, cambiando rápidamente de posición. La movilidad atómica tiene dos condiciones:

- 1) exista un lugar vecino vacío, y
- 2) el átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento, por ejemplo los átomos son capaces de difundir debido a la intensidad de su energía vibratoria. Esta fracción aumenta al elevar la temperatura.

#### 3.7.1.1 Difusión por Vacantes.

Es un mecanismo de difusión que implica el cambio de un átomo desde una posición reticular normal a una vacante o lugar reticular vecino vacío (FIGURA 3.16 A).



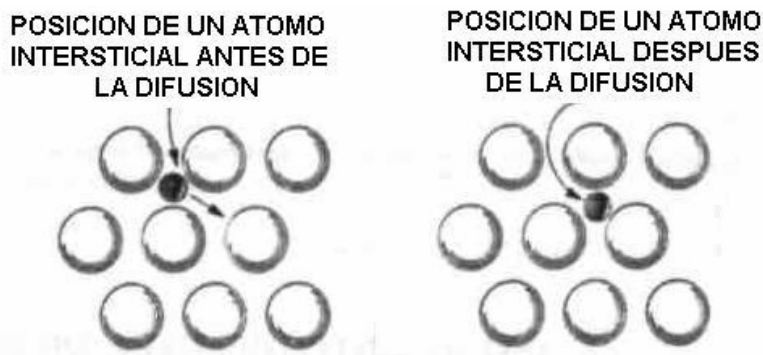
**FIGURA 3.16 A .- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA DIFUSION.**

---

Este mecanismo recibe el nombre de *difusión por vacantes*. Este proceso necesita la presencia de vacantes, y las posibilidades de la difusión hacia las vacantes es función del número de estos defectos que existan. A elevada temperatura el número de vacantes de un metal es mayor, puesto que en el movimiento difusivo los átomos y las vacantes intercambian posiciones, el movimiento de los átomos en la difusión va en sentido opuesto al de las vacantes. La autodifusión y la interdifusión ocurren mediante este mecanismo; en la interdifusión los átomos de soluto sustituyen a los átomos del disolvente.

### 3.7.1.2 Difusión Intersticial.

Este tipo de difusión implica a átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada (FIGURA 3.16 B). El mecanismo tiene lugar por interdifusión de solutos tales como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que son átomos de tamaño pequeño, idóneos para ocupar posiciones intersticiales. Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo. Este fenómeno se denomina **difusión intersticial**.



**FIGURA 3.16 B .- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA DIFUSION INTERSTICIAL.**

En la mayoría de las aleaciones, la difusión intersticial ocurre más rápidamente que la difusión por vacantes, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacantes y tienen mayor movilidad. Teniendo en cuenta que hay más posiciones intersticiales vacías que vacantes, la probabilidad del movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes.

### 3.7.2 DIFUSION EN ESTADO ESTACIONARIO.

Desde un punto de vista macroscópico, la difusión es un proceso que depende del tiempo: la cantidad de un elemento transportado dentro de otro es una función del tiempo. Muchas veces es necesario conocer a qué velocidad ocurre la difusión, o la velocidad de la transferencia de masa. Normalmente esta velocidad se expresa como un **flujo de difusión (J)**, definido como la masa (o número de átomos) **M** que difunden perpendicularmente a través de la unidad de área de un sólido por unidad de tiempo. La expresión matemática se puede representar por:

$$J = - \frac{M}{At}$$

Donde **A** es el área a través de la cual ocurre la difusión y **t** el tiempo que dura la difusión. La forma diferencial de esta expresión es la siguiente:

$$J = - \frac{1}{A} \frac{dM}{dt}$$

El flujo de difusión (J) se expresa en kilogramos o átomos por metro cuadrado por segundo ( $\text{kg/m}^2\text{-s}$  o  $\text{átomos/m}^2\text{-s}$ ).

La condición para que exista estado estacionario es que el flujo de difusión no cambie con el tiempo. Un ejemplo clásico de la difusión en estado estacionario es la difusión de átomos de un gas a través de una lámina metálica cuyas concentraciones (o presiones) de las sustancias que difunden se mantienen constantes a ambos lados de la lámina. En la FIGURA 3.17(a) se representa esta condición.

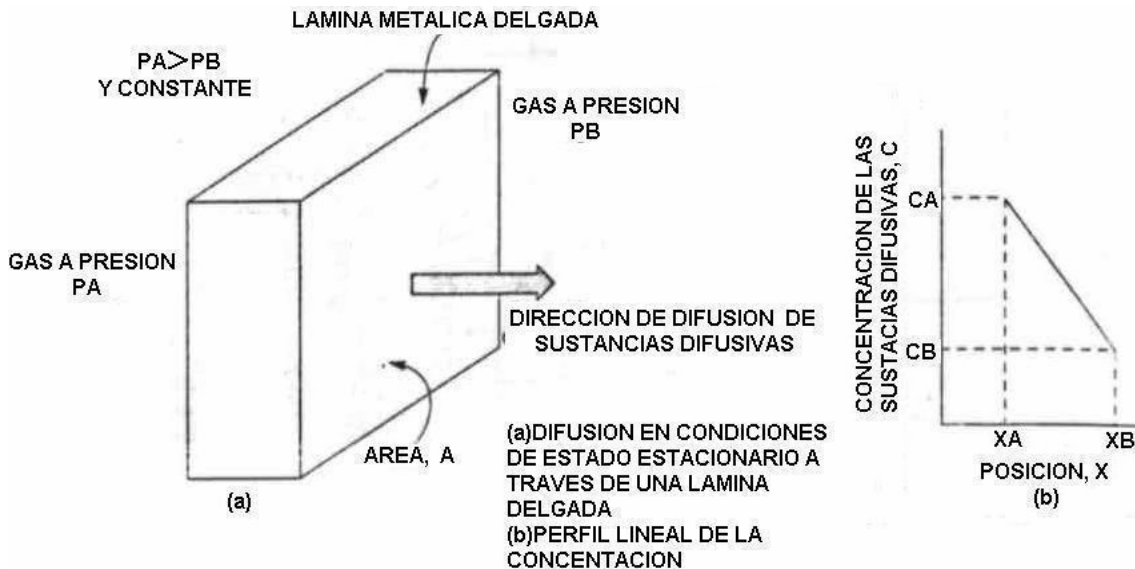


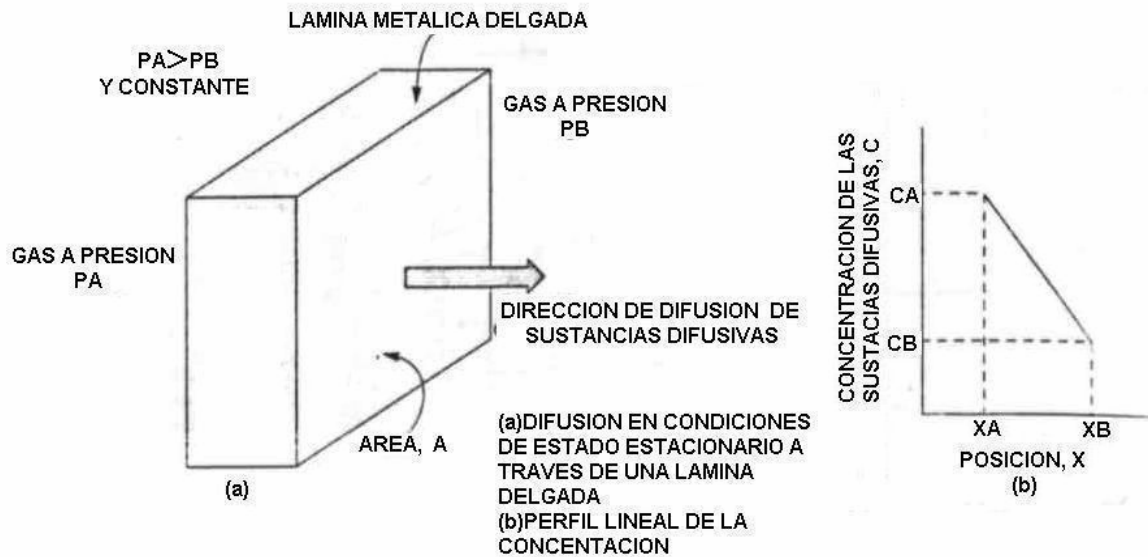
FIGURA 3.17 .- DIFUSION EN ESTADO ESTACIONARIO.



Al representar la concentración  $C$  frente a la posición (o distancia) dentro del sólido  $x$ , la gráfica resultante se denomina **perfil de concentración**. La pendiente de esta gráfica en un punto determinado es el **gradiente de concentración**.

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{dC}{dx}$$

Con esto, se supone que el perfil de concentración es lineal, (FIGURA 3.17(b)); así



**FIGURA 3.17.- DIFUSION EN ESTADO ESTACIONARIO.**

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{\Delta C}{\Delta X} = \frac{C_A - C_B}{X_A - X_B}$$

En los problemas de difusión suele ser más conveniente expresar la concentración en función de la masa de las sustancias que difunden por unidad de volumen del sólido ( $\text{kg/m}^3$  o  $\text{g/cm}^3$ ).

La ecuación matemática de la difusión en estado estacionario en una dirección ( $x$ ) es relativamente sencilla. El flujo es proporcional al gradiente de concentración:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

La constante de proporcionalidad  $D$  se denomina **coeficiente de difusión** y se expresa en metros cuadrados por segundo. El signo negativo de esta ecuación indica que la dirección de difusión es contraria al gradiente de concentración: va

---

desde elevada concentración a baja concentración. Esta ecuación también se le llama **primera ley de Fick**.

A veces se utiliza el término **fuerza impulsora** para denominar a aquello que obliga a realizar una reacción. En las reacciones de difusión existen varias fuerzas de este tipo, pero si la reacción transcurre de acuerdo con la ecuación anterior, el gradiente de concentración es la fuerza impulsora.

Un ejemplo de la difusión en estado estacionario tiene lugar en la purificación del gas hidrógeno. Una cara de una fina lámina de paladio se expone al gas impuro, compuesto por hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua, y entonces el hidrógeno difunde selectivamente a través de la lámina hacia el lado opuesto, que se mantiene a una presión de hidrógeno constante y baja.

### 3.7.3 DIFUSION EN ESTADO NO ESTACIONARIO.

La mayoría de las situaciones prácticas de difusión en estado no estacionario. En una zona determinada del sólido, el flujo de difusión y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden. Esto se puede observar en la siguiente figura, que muestra perfiles de concentraciones a tres tiempos de difusión diferentes. En condiciones no estacionarias no es conveniente utilizar la ecuación  $J = -D \frac{dC}{dx}$ , sino la ecuación de derivadas parciales.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Esta ecuación se denomina **segunda ley de Fick**. Si el coeficiente de difusión es independiente de la composición, lo cual deberá comprobarse para cada situación particular de difusión. Esta ecuación se simplifica como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2}{\partial x^2} (C)$$

Las soluciones a esta expresión (concentración en función de posición y de tiempo) se consiguen especificando condiciones límites físicamente significativas. Un conjunto de estas condiciones fueron dadas por Crank y Carslaw y Jaeger.

En la práctica, una solución importante es la de un sólido semiinfinito cuya concentración superficial se mantiene constante. Frecuentemente, la sustancia que difunde es un gas, cuya presión parcial se mantiene constante. Además, se plantean las siguientes hipótesis:

1. Antes de la difusión, todos los átomos de soluto están uniformemente distribuidos en el sólido a concentración  $C_0$ .
2. El valor de  $x$  en la superficie es cero y aumenta con la distancia dentro del sólido.
3. El tiempo se toma igual a cero en el instante inmediatamente antes de empezar la difusión.

Estas condiciones límite son:

Para  $t = 0$ .  $C = C_0$  a  $0 \leq x \leq \infty$

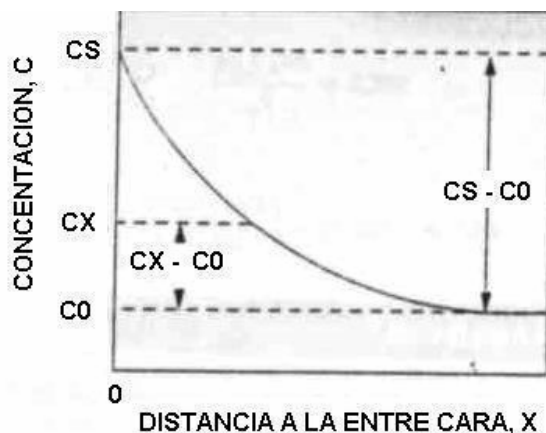
Para  $t > 0$ .  $C = C_s$  (la concentración superficial constante)  $x = 0$

$C = C_0$  a  $x = \infty$

Aplicando las ecuaciones límites a la ecuación anterior, la solución es:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{ferr}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Donde,  $C_x$  representa la concentración a la distancia  $x$  después del tiempo  $t$ . La expresión  $\text{ferr}(x/2\sqrt{Dt})$  es la función de error gaussiana. En la siguiente tabla se dan los datos para varios valores de  $x/2\sqrt{Dt}$ . Los parámetros de concentración que aparecen en la ecuación anterior están representados en la siguiente figura de abajo, con un perfil de concentración a un tiempo determinado (FIGURA 3.18).



**FIGURA 3.18 .-PERFILES DE CONCENTRACION PARA LA DIFUSION EN ESTADO NO ESTACIONARIO.**

La ecuación demuestra la relación entre concentración, posición y tiempo, siempre que  $C_x$ , una función del parámetro adimensional  $x/\sqrt{Dt}$ , se puede determinar en un tiempo y en una posición fija y sean conocidos los parámetros  $C_0$ ,  $C_s$  y  $D$ . Cuando se desea conseguir una concentración determinada de soluto,  $C_1$ , el primer miembro de la ecuación se convierte en:

$$\frac{C_1 - C_0}{C_s - C_0} = \text{constante}$$

En esta condición, el segundo miembro de esta misma expresión también es una constante:

$$\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \text{constante}$$

o

$$\frac{x^2}{4Dt} = \text{constante}$$

Mediante estas relaciones se facilitan los cálculos de algunas difusiones.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

### 3.7.4 FACTORES DE LA DIFUSION.

#### 3.7.4.1 Substancias que difunden.

La magnitud del coeficiente de difusión  $D$  es indicativo de la velocidad de difusión atómica. En la siguiente tabla se dan coeficientes de interdifusión y de autodifusión de varios metales. Las substancias que difunden y los materiales a través de los cuales ocurre la difusión influyen en los coeficientes de difusión. Por ejemplo, existe notable diferencia entre la autodifusión del hierro y la interdifusión del carbono en hierro  $\alpha$  a  $500^\circ \text{C}$ . El valor de  $D$  es mayor para la interdifusión del carbono ( $1.1 \times 10^{-20}$  frente a  $2.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Esta comparación también evidencia la diferencia en las velocidades de la difusión vía vacantes y la difusión vía intersticial. La autodifusión ocurre por el mecanismo de vacantes, y la difusión del carbono en hierro por el mecanismo intersticial.

#### 3.7.4.2 Temperatura.

La temperatura ejerce gran influencia en los coeficientes y en las velocidades de difusión. Por ejemplo, para la autodifusión del Fe en Fe- $\alpha$  se multiplica por cinco (de  $1.1 \times 10^{-20}$  a  $3.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ ) al aumentar la temperatura desde  $500$  a  $900^\circ \text{C}$  (ver la siguiente tabla). La dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura cumple la siguiente expresión:

$$D = D_0 \exp \left[ - \frac{Q_d}{RT} \right]$$

Donde

$D_0$  = factor de frecuencia independiente de la temperatura ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).

$Q_d$  = energía de activación para la difusión ( J/mol o eV/átomo).

$R$  = la constante de los gases, 8.3 J/mol-K, 1,987 cal/mol-K o  $8,62 \times 10^{-5}$  eV/átomo.

$T$  = temperatura absoluta (K).

La energía de activación se puede interpretar como la energía requerida para producir el movimiento difusivo de un mol de átomos.

Tomando logaritmos naturales en la ecuación resulta:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q_d}{R} \frac{1}{T}$$

Ya que  $D_0$ , y  $R$  son constantes, esta expresión adquiere la forma de la ecuación de la recta:

$$y = b + mx$$

Donde  $y$  y  $x$  son variables análogas a  $\ln D$  y  $1/T$ , respectivamente. Si se representa gráficamente  $D$  frente a la recíproca de la temperatura absoluta, resulta una recta:  $-Q_d/R$  es la pendiente y  $\ln D_0$  es la ordenada en el origen. De este modo se determinan experimentalmente los valores de  $Q_d$  y  $D_0$ . En la siguiente figura se representan varias gráficas de aleaciones y se aprecia una relación lineal en todos los casos.

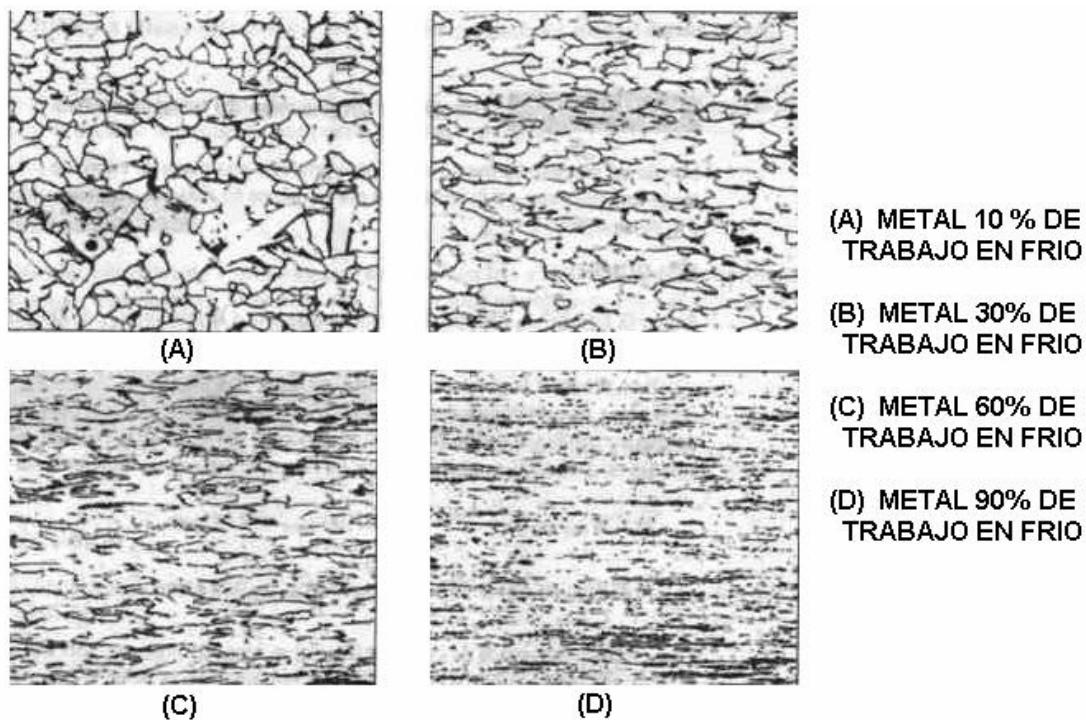
### 3.7.5 OTROS TIPOS DE DIFUSION.

La emigración atómica tiene lugar, también, a lo largo de dislocaciones, límites de grano y superficies externas. Estos tipos de difusión a veces se denominan *difusión en corto circuito* ya que ocurre a una velocidad mucho mayor que la difusión a través del volumen. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones, la contribución de la difusión en cortocircuito es insignificante comparada con el flujo total de difusión porque el área de la sección a cruzar es extraordinariamente pequeña.

La estructura de un material se relaciona con la disposición de sus componentes internos, por eso cuando un acero es rolado en frío la estructura interna cambia dependiendo al porcentaje de deformación, lo que acarrea una concentración de esfuerzos entre la estructura interna, cambiando así algunas propiedades como la dureza; durante este punto se verán los efectos del rolado en frío junto con sus propiedades ya que es muy importante para el estudio realizado en la soldadura, pues nos dará una visión más clara sobre los resultados obtenidos, que más adelante se analizaran.

### 3.8 MICROESTRUCTURA Y ESFUERZOS RESIDUALES EN LOS METALES.

Durante la deformación, al alargarse los granos dentro del metal se forma una microestructura fibrosa (FIGURA 3.19).



**FIGURA 3.19 .- CAMBIO DE LA MICROESTRUCTURA DE UN METAL DEBIDO AL TRABAJO EN FRIO.**

#### 3.8.1 COMPORTAMIENTO ANISOTROPICO.

A lo largo del proceso, los granos giran y al mismo tiempo se alargan, haciendo que ciertas direcciones y planos cristalográficos queden alineados. En consecuencia, se desarrollan orientaciones, es decir, texturas preferenciales, causando un comportamiento anisotrópico.

En procesos como por ejemplo, el laminado, se producen tanto una dirección como un plano preferencial, lo que da una textura foliada o laminar. Las propiedades de una hoja o placa laminada dependerán de la dirección en la cual se mida dicha propiedad.

### 3.8.2 ESFUERZOS RESIDUALES.

Los esfuerzos residuales se desarrollan durante la deformación. Una pequeña parte del esfuerzo aplicado –quizás aproximadamente el 10 %- queda almacenada en el interior de la estructura en forma de una intrincada red de dislocaciones. Los esfuerzos residuales incrementan la energía total de la estructura.

Los esfuerzos residuales no están uniformemente distribuidos en todo el metal deformado. Por ejemplo, puede haber altos esfuerzos residuales a la compresión en la superficie de una placa laminada, mientras en su centro quedan almacenados esfuerzos a la tensión elevados. Si se maquina una pequeña porción de metal superficial de una pieza trabajada en frío, se eliminará metal que sólo contiene esfuerzos residuales a la compresión. Para que el equilibrio se restablezca, la placa tendrá que distorsionarse.

Los efectos residuales afectan la capacidad de la pieza para soportar una carga (FIGURA 3.20). Si se le aplica un esfuerzo a la tensión a un material que ya tenga esfuerzos residuales a la tensión, el esfuerzo total actuando sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicado y residual.<sup>12</sup>



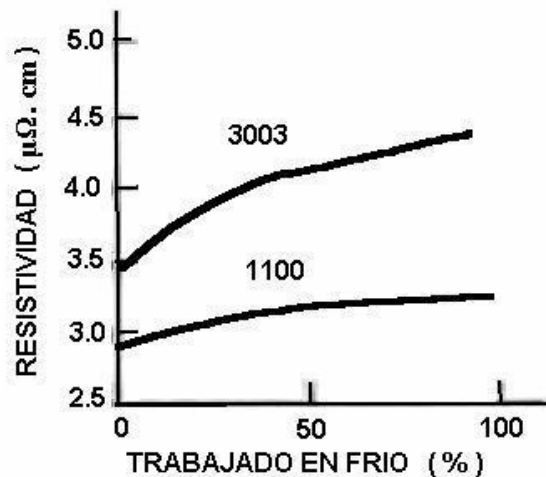
**FIGURA 3.20 .- EFECTO DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES.**

<sup>12</sup> Donald R. Askeland .- Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial International Thomson Editores, México.

La noción de “propiedad” necesita cierta elaboración. Un material en uso está expuesto a estímulos externos que provocan algún tipo de respuesta. Por ejemplo, una muestra sometida a esfuerzos experimenta deformación; o un metal pulido refleja la luz. Las propiedades de un material se expresan en términos del tipo y magnitud de la respuesta a un estímulo específico impuesto. Las definiciones de las propiedades suelen ser independientes de la forma y del tamaño del material.

### 3.9 PROPIEDADES DE LOS METALES DEFORMADOS PLASTICAMENTE.

La deformación plástica cambia la estructura interna de un metal; así que es esperarse que también cambie sus *propiedades*. Evidencias de tales cambios pueden obtenerse mediante medidas de resistividad. La estructura distorsionada por la deformación, reduce la trayectoria libre media de los electrones, y por lo tanto, se incrementa la resistividad (FIGURA 3.21)



**FIGURA 3.21 .- CAMBIO EN LA RESISTIVIDAD DEBIDO AL TRABAJO EN FRÍO.**

En la figura recién citada, así como en otros casos, es conveniente referirse a la cantidad de *trabajo en frío* como un índice de la cantidad de deformación plástica. El trabajo en frío es la cantidad de deformación plástica obtenida durante el procesado del metal, y se expresa por la reducción del área de la sección transversal.

$$TF = \left[ \frac{A_o - A_f}{A_o} \right] 100$$

Donde  $A_o$  y  $A_f$  son las áreas originales y finales, respectivamente.



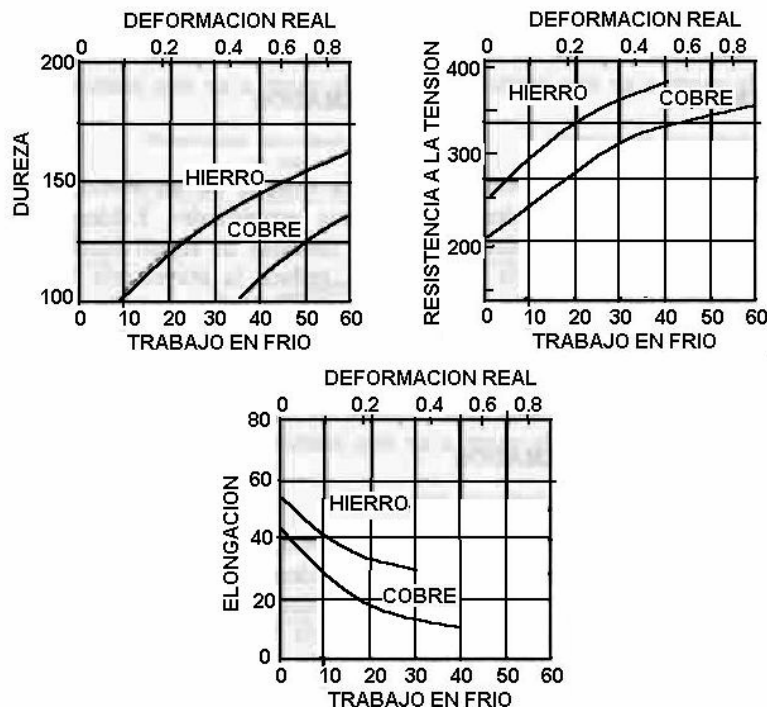
### 3.9.1 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION.

Las huellas de los planos de deslizamiento, por ejemplo, en cobre trabajado en frío (FIGURA 3.22), muestran que ocurrió deformación.



**FIGURA 3.22 .- COBRE DEFORMADO PLÁSTICAMENTE.**

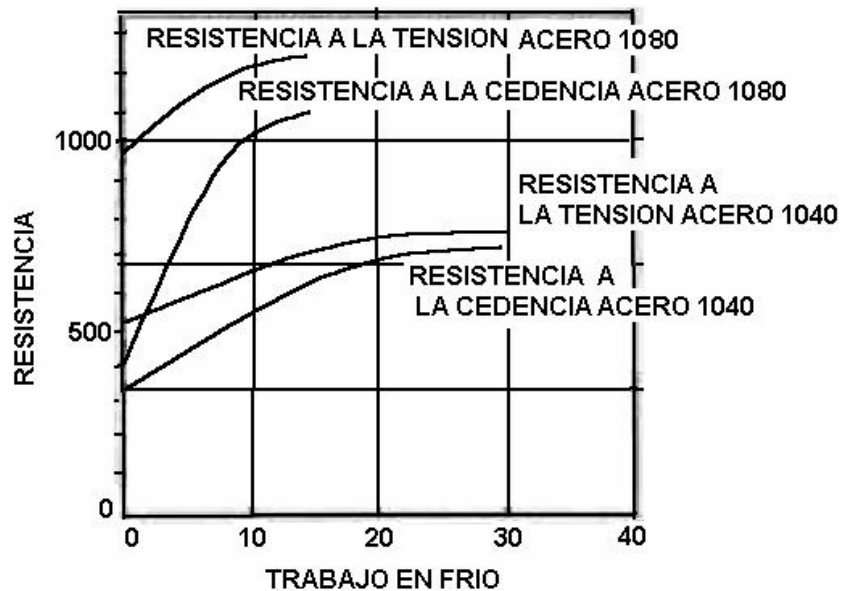
El movimiento de las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento y la distorsión de los planos producida por las constricciones de los granos adyacentes, modifican la regularidad del patrón cristalino inicialmente presente. Es por esto que con más dificultad ocurre un mayor deslizamiento y la dureza del metal se ve incrementada (FIGURA 3.23).



**FIGURA 3.23 .- VARIACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS CON RESPECTO A LA VARIACION DEL TRABAJO EN FRIO.**

El incremento en dureza que resulta de la deformación plástica se llama *endurecimiento por deformación*. Las pruebas de laboratorio muestran que el incremento en dureza va acompañado de un incremento en la resistencia a la tracción y en la resistencia de cedencia. Por otro lado, el endurecimiento por deformación reduce la ductilidad de los metales durante el trabajo en frío del metal que se examina antes de haberle puesto las marcas indicadoras, usadas en las pruebas de deformación.

Así que durante la prueba se observa una elongación menor. El proceso de endurecimiento por deformación incrementa más la resistencia a la cedencia que la resistencia a la tensión (FIGURA 3.24) y ambos tienden al valor verdadero de la resistencia a la fractura cuando la cantidad de trabajo en frío se incrementa.

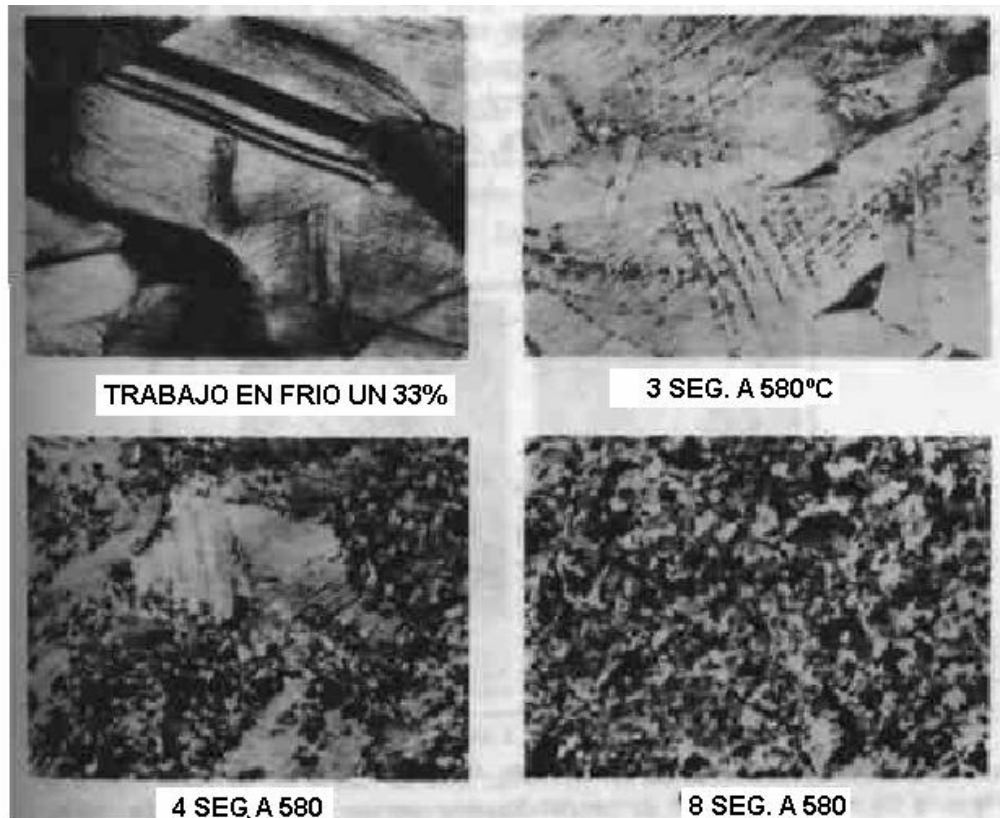


**FIGURA 3.24 .- INCREMENTO EN EL VALOR DE CEDENCIA EN ACEROS NO ALEADOS DEBIDO AL TRABAJO EN FRIO.**

### 3.9.2 RECRISTALIZACION.

Los cristales que han sido plásticamente deformados, tienen más energía que los no deformados debido a que los primeros contienen dislocaciones y otras imperfecciones. Si se les permitiera, los átomos se moverían para formar un arreglo más perfecto y libre de deformaciones.

Tal oportunidad la tienen cuando el cristal se sujeta a altas temperaturas durante el proceso de *recocido*. Entre mayores sean las vibraciones térmicas de la red a altas temperaturas, mayor será el reordenamiento de los átomos para formar granos menos distorsionados (FIGURA 3.25).



**FIGURA 3.25 .- PASOS DE LA RECRISTALIZACION DE UN METAL DEFORMADO.**

### 3.9.2.1 Temperaturas de recrystalización.

En vista de que la recrystalización produce cristales más blandos, las medidas de dureza son buenos indicadores de que tuvo lugar una recrystalización.

La temperatura a la cual se observa un marcado reblandecimiento se llama *temperatura de recrystalización*. Un metal altamente endurecido por deformación es cristalográficamente más inestable que un metal menos trabajado en frío como se puede inferir del hecho de que el metal con más trabajo en frío se va a reblandecer a temperaturas significativamente menores (275 °C contra 330 °C). La temperatura de recrystalización también es afectada por la duración del calentamiento. Tiempos prolongados dan mayor oportunidad a los átomos de reacomodarse, y la recrystalización se puede llevar a cabo a menores temperaturas.

La recrystalización requiere reacomodo o difusión de átomos en el material; así que, la temperatura requerida para recrystalización depende de la magnitud de la fuerza que mantiene unidos a los átomos. Esta conclusión es consistente con el hecho de que la energía térmica requerida para fusión está relacionada con la fuerza que mantiene a los átomos unidos.

---

De aquí que es natural esperar que exista alguna correlación entre las temperaturas de recristalización y fusión. Aunque hay algunas excepciones, la temperatura de recristalización está siempre entre un tercio y la mitad de la temperatura (absoluta) de fusión.

### **3.10 COMPARACION ENTRE EL TRABAJO EN CALIENTE Y TRABAJO EN FRIO DE LOS METALES.**

En operaciones de producción, la distinción entre *trabajo en caliente* y *trabajo en frío* no estriba solamente en la temperatura, sino en la relación entre la temperatura de procesado y la temperatura de recristalización. El trabajo en caliente se lleva a cabo arriba de la temperatura de recristalización; el trabajo en frío por debajo de ésta.

Desde el punto de vista de la producción es muy lógico escoger la temperatura de recristalización como el punto para distinguir entre trabajo en caliente y en frío. Abajo de la temperatura de recristalización, el metal se vuelve más duro y menos dúctil al trabajarlo mecánicamente. Así que se va requiriendo más potencia para su deformación y existe la posibilidad de producirle fracturas durante el procesado. Arriba de la temperatura de recristalización, el metal se recocerá por sí solo durante o inmediatamente después del trabajo mecánico. Así que permanece blando y más o menos dúctil.

#### **3.10.1 IMPORTANCIA DEL TRABAJO EN FRIO Y RECOCIDO EN LA INGENIERIA.**

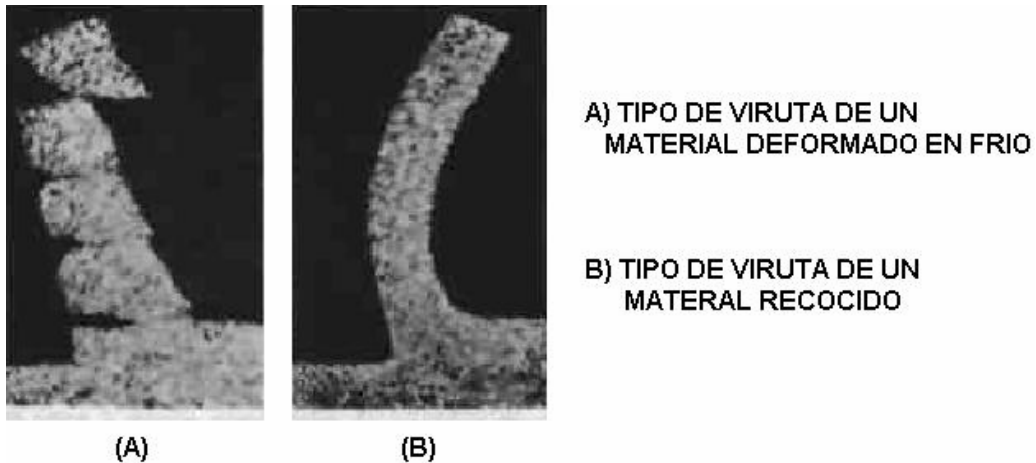
El endurecimiento por trabajo en frío es de vital importancia para el ingeniero diseñador. Le permite usar piezas más pequeñas con alta resistencia. Por supuesto, el producto no deberá utilizarse a temperaturas que produzca recocido en el metal.

El trabajo en frío limita la cantidad de deformación plástica que un metal puede resistir durante una operación de torneado. El trabajo de un metal endurecido y menos dúctil requiere más potencia y está expuesto a agrietarse. Así que, durante la producción es necesario aplicar ciclos de trabajo en frío y recocido.

La pérdida de ductilidad durante el trabajo en frío tiene un útil efecto secundario para el maquinado. Con menos ductilidad, las virutas metálicas se quiebran facilitando la operación de corte. (FIGURA 3.26)<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Lawrence H. Van Vlack .- Materiales para ingeniería. Editorial Continental. México.



**FIGURA 3.26 .- EFECTO DE LA PERDIDA DE DUCTILIDAD.**

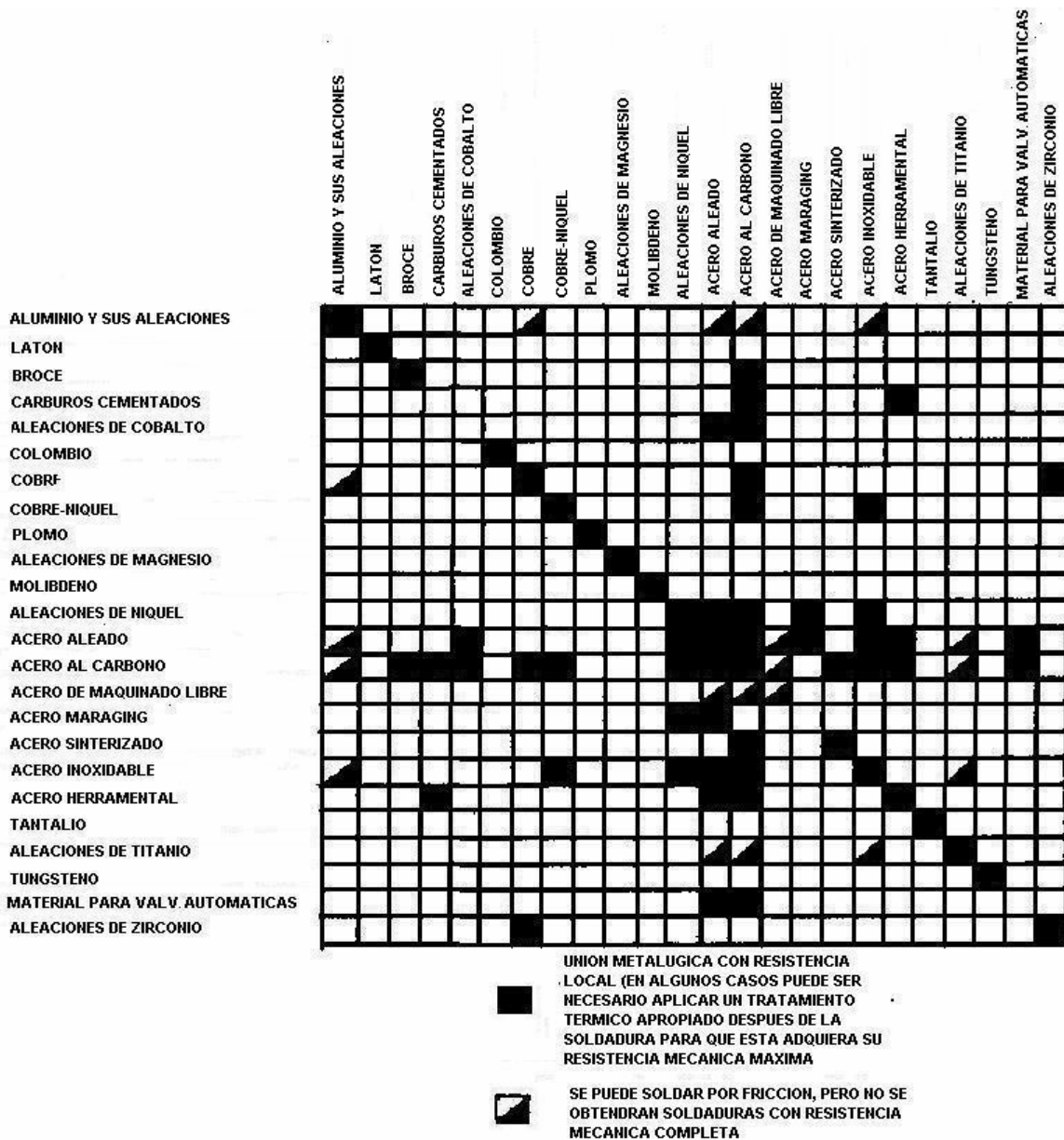
### **3.11 MATERIALES APLICADOS EN LA SOLDADURA POR FRICCION.**

Los materiales son de gran importancia para el desarrollo tecnológico del ser humano y éste sea a encargado de estudiarlos para satisfacer sus necesidades de confort y seguridad, por eso la selección de los materiales para la soldadura es muy importante ya que podemos obtener una visión mayor de en que y donde los podemos utilizar, por eso el estudio de los mismos nos acarrea un mayor conocimiento de las propiedades de cada material y así como poder agruparlos por características afines de una manera selectiva para encontrar el uso más óptimo y de calidad.

La soldadura por fricción puede usarse para unir casi cualquier metal, metales con propiedades mecánicas y térmicas ampliamente diferentes. A menudo combinaciones que pueden ser soldadas por fricción no pueden ser unidas por otros procesos de soldadura porque la formación de fases frágiles o quebradizas harían a tales juntas inservibles. Las temperaturas abajo del punto de fusión y cortos tiempos de soldadura por fricción permiten unir muchas combinaciones de metales de trabajo.

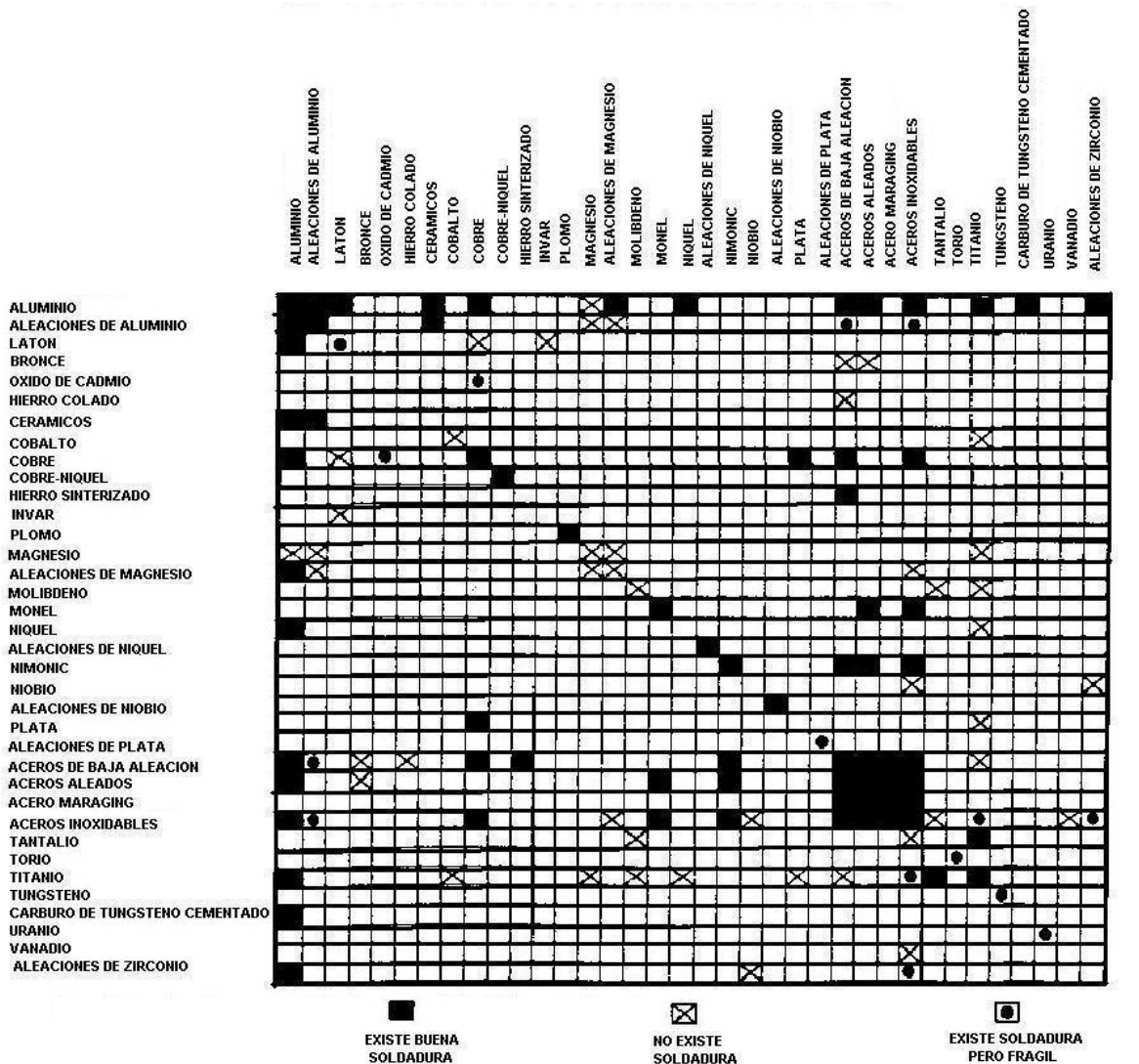
Muchas combinaciones de metales idénticos y distintos pueden ser soldadas por fricción, y en la mayoría de las combinaciones una sólida ligadura metalúrgica es formada. En algunas combinaciones, la ligadura no es tan fuerte como en el metal base, y el tratamiento térmico posterior a la soldadura puede ser necesario para desarrollar una fuerte zona de soldadura en *aceros aleados* y en *aceros inoxidables endurecidos*.

Un considerable esfuerzo se ha hecho para determinar la soldabilidad de pares de metales por los procesos de FRW. A continuación se muestra una carta de soldabilidad para soldaduras por soldadura por inercia desarrolladas comercialmente (FIGURA 3.27).



**FIGURA 3.27 .- CARTA DE SOLDABILIDAD PARA SOLDADURAS POR FRICCION POR INERCIA DESARROLLADAS COMERCIALMENTE.**

Una carta similar de soldaduras demandadas que han sido exitosamente logradas por soldadura por fricción por manejo continuo es mostrada en la FIGURA 3.28.



**FIGURA 3.28 .- CARTA DE SOLDABILIDAD PARA SOLDADURAS POR FRICCION POR MANEJO CONTINUO.**

Los materiales con valores altos de difusividad térmica, o materiales que tienden a sujetarse y trabajados en frío en las superficies de la unión, exigen velocidades altas para producir altas proporciones de entrada de calor mientras se limitan los torques. El cobre y molibdeno son dos ejemplos de materiales que requieren velocidades altas.

Las limitaciones en la soldabilidad de materiales están basadas en las características del proceso, los cuales requieren calentamiento friccional y forjado en la junta. Los metales a ser soldados deben ser maleables a temperatura alta. Por consiguiente, para los materiales siguientes, la FRW normalmente no tendrá éxito:

- Hierro fundido en cualquier forma de grafito libre limita el calentamiento friccional. Cualquier soldadura incipiente que puede ocurrir con hierro fundido que es de naturaleza quebradiza tal que no tiene valor comercial.
- Bronces y latones que tienen un alto contenido de plomo (más de 0.3%).
- Aceros libres de maquinado que contienen más de 0.13% de azufre, de plomo o de telurio; por ejemplo, SAE 1141 (0.37 – 0.45 % C, 1.35 – 1.65 % Mn, 0.04 % P, 0.08 – 0.13 % S) es soldable considerando que el SAE 1144 (0.40 – 0.48 % C, 1.35 – 1.65 % Mn, 0.04 % P, 0.24 – 0.33 % S) no lo es.
- Materiales altamente anisotrópicos, por ejemplo el berilio que no tiene casi ninguna ductilidad transversal.
- Cualquier material con una fase débil distinta presente en la microestructura, por ejemplo, el grafito, el sulfuro del manganeso, plomo libre, telurio, etc.<sup>11</sup>

### **3.11.1 EL ACERO AL CARBONO Y ACEROS ALEADOS EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.**

Los acero al carbono y aceros aleados son relativamente fáciles para soldar por fricción. Aceros de bajo y de medio carbono pueden ser soldados bajo una amplia gama de condiciones de soldadura. Aleaciones de alto carbono son fácilmente unidos pero las condiciones de la soldadura debe ser controladas dentro de rangos limitados que son permisibles para soldar aceros de bajo carbono, y la presión axial debe ser aumentada para compensar la baja forjabilidad.

Los materiales de base ferrosa, desde acero de bajo carbono hasta acero para herramienta de alta velocidad, todos pueden ser soldados. Los aceros dulces o suaves son relativamente fáciles de unir y tienen una gama amplia de parámetros. Aceros de alta aleación, tales como aceros de alta velocidad, también pueden unirse eficazmente, pero con una muy estrecha banda de parámetros operación y más fuerza axial de empuje, correspondiente con sus altos esfuerzos de fluencia. Su falta de tenacidad y su sensibilidad a las grietas y al choque térmico puede dictar que la perturbación o residuo de la soldadura sea quitada antes de un tratamiento térmico de templado para prevenir la propagación de grietas.

El acero de herramienta de alta velocidad puede ser soldado a insertos de aceros al carbono y a aleaciones de carbono para hacer taladros, escariadores y otras herramientas de corte

Los aceros de maquinado libre, excepto aquellos que presentan o dejan un alto contenido de azufre y un bajo contenido de manganeso, puede ser soldados, pero los elementos del acero de libre maquinado producen propiedades direccionales indeseables en la zona de la soldadura. Las soldaduras por fricción en aceros de maquinado libre tiene un esfuerzo de fatiga menor del 80% que la del metal base y no debe ser usadas en aplicaciones dónde las tensiones altas están involucradas y alta fuerza es requerida.

---

<sup>11</sup> Melvin M. Schwartz .- Metals Joining Manual Editorial McGraw-Hill, E.U.A



---

La soldadura por fricción de aceros de maquinado libre debe limitarse a aquellos con 0.08 a 0.13% azufre, plomo o telurio. Por ejemplo, el acero 1141 (0.37 – 0.45 % C, 1.35 – 1.65 % Mn, 0.04 % P, 0.08 – 0.13 % S) se suelda satisfactoriamente, pero el 1144 (0.40 – 0.48 % C, 1.35 – 1.65 % Mn, 0.04 % P, 0.24 – 0.33 % S) no lo es.

Los aceros tratados térmicamente pueden ser soldados por fricción con cambios localizados sólo en la dureza porque el calentamiento se confina a una zona muy estrecha. También, el templado rápido restaura la dureza a la zona de la soldadura.

Los metales sinterizados son compactados adicionalmente durante la soldadura por fricción y tienen una estructura forjada en la zona de la soldadura. La unión normalmente es más fuerte que el metal base.

Los resultados de la soldadura por fricción de aceros forjados y aceros fundidos son aproximadamente los mismos que aquellos de barras de acero soldadas por fricción de similar composición.

Los aceros inoxidable son comparativamente fáciles de soldar por fricción, y buenas propiedades de soldadura pueden ser obtenidas bajo una amplia gama de condiciones de soldadura. Los aceros inoxidable tratados térmicamente son sensibles al calor y la presión y, para buenas propiedades de soldadura, requieren un tratamiento térmico posterior a la soldadura en la zona afectada por el calor. Una aplicación importante de la soldadura por fricción de aceros inoxidable es la producción de ejes bimetálicos que son expuestos a una atmósfera corrosiva o desgaste en el servicio. Para proporcionar el tipo correcto de resistencia donde es necesitada, para reducir el costo trabajo-metal, o aumentar la maquinabilidad, una aleación que resistirá una atmósfera corrosiva puede ser unida a un metal que es menos caro y más fácil de maquinar.

### **3.11.2 LOS METALES Y ALEACIONES NO FERROSOS EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.**

Las aleaciones de aluminio son soldadas por fricción a las aleaciones de aluminio iguales y distintas, las aleaciones de cobre a las aleaciones de cobre iguales y distintas, y aleaciones de aluminio a aleaciones de cobre. La mayoría de las aplicaciones de soldadura por fricción para estos metales son uniendo aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre a aceros, aunque los problemas son presentados por la alta conductividad térmica, las grandes diferencias de las temperaturas de forjado y la formación de compuestos intermetálicos frágiles.

---

Las uniones entre la aleación de aluminio 6061 (0.4 y 0.8 % Si; 0.7% Fe, 0.15 - 0.4% Cu, 0.15% Mn, 0.8 - 1.2% Mg, 0.04 - 0.35% Cr, 0.15% Ti y 0.25% Zn) y cobre tienen una resistencia a la tensión cercana a la del cobre. Las juntas entre la aleación de aluminio 1100 (0.95 % Si + Fe, 0.05 – 0.20 % Cu, 0.05 % Mn, 0.10 % Zn) y el acero inoxidable tienen una resistencia cercana a la de la aleación de aluminio. La soldadura por fricción de otras aleaciones de aluminio puede desarrollar una resistencia de la junta de sólo 60 a 70% que la del metal base más débil. Aunque estas juntas son relativamente débiles, son útiles para el sellado por presión y para unir ensambles que requieren buena conductividad eléctrica y térmica, en lugar de alta fuerza.

El titanio, las aleaciones de titanio, las aleaciones de zirconio y aleaciones de magnesio pueden ser soldadas por fricción entre ellos mismos.

La mayoría de aleaciones de base níquel y aleaciones de base cobalto, incluso las aleaciones resistentes al calor, son fácilmente soldadas entre ellas mismas y entre aceros aleados. La aleación de base níquel GMR-235 (2.5% Al, 0.05% B, 0.1% C, 14% Cr, 0.1% Co, 8.0% Fe, 4.5% Mo, 1.5% Ti) puede soldarse a un acero 1040 (0.37-0.44% C, 0.6-0.9% Mn, 0.04% P, 0.050% S), un Inconel 718 (50-55% Ni, 17.21% Cr, 4.75-5.5% Nb, 4.2% Mo, 0.65-1.15% Ti, 0.2-0.8% Al) a un Inconel 713C (12.5% Cr, 4.2% Mo, 0.12% C, 6.1% Al, 0.8% Ti, 2% Nb, 0.012% Bi, 0.10% Zr), y un Inconel 713C a un acero 8630 (0.27-0.34 % C, 0.6-0.9% Mn, 0.15-0.30% Si, 0.35-0.6% Cr, 0.4-0.7% Ni, 0.15-0.25% Mo) en la producción de partes de máquinas de inyección que requieren ligaduras de resistencia superior.

Los metales refractarios - el tungsteno, el molibdeno, el columbio y tantalio- pueden soldarse entre ellos mismos. Las soldaduras por fricción entre las barras del molibdeno son bastantes dúctiles para resistir una reducción sustancial por el trazado de alambre.

### **3.11.3 LAS CARACTERISTICAS METALURGICAS DE LA SOLDADURA POR FRICCION.**

En general, las soldaduras por fricción de materiales idénticos consisten en una capa delgada muy deformada de estructura de grano muy refinada cerca de la interfase de la soldadura. Hay una estrecha región de zona afectada por el calor entre la soldadura y las estructuras del metal base. A continuación se muestra, (FIGURA 3.29), es una macrosección típica de una barra de acero de baja aleación soldada mostrando la microdureza vickers, la zona afectada por el calentamiento, y el metal perturbado. La forma de la zona afectada por el calor y la perturbación dependen de los materiales y las condiciones de soldadura.



**FIGURA 3.29 .- MACROSECCION TIPICA DE UNA SOLDADURA POR FRICCION DE UN ACERO DE BAJO CARBONO**

Para las soldaduras de metales distintos en la parte inicial del ciclo de soldadura los fragmentos del espécimen más suave se transfiere a la superficie del espécimen más duro y dentro de un período muy corto de tiempo la superficie del espécimen más duro es completamente cubierta con una capa del metal más suave. Esta sucesión de eventos pasa durante la soldadura de la aleación de aluminio al acero apacible y al cobre.

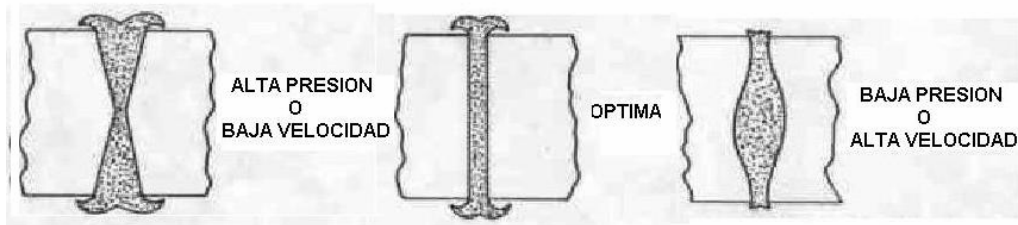
La capa de metal suave en el espécimen más duro forma una capa estancada y por consiguiente el plano de frotación la mueve axialmente en el espécimen más suave. Así el frotamiento se da entre dos materiales idénticos y eventualmente una zona anular plastificada se desarrolla en el plano frotante. El material plastificado es completamente del metal más suave. La localización y espesor de la zona plastificada dependerán de la velocidad de frotación y la presión axial. La mayoría del calor se genera por revoltura de metal en la capa plastificada.

El espécimen más duro no participa en la formación de la capa plastificada o en la corona de la perturbación. Sin embargo, ejerce un poco de influencia en el tamaño del material plastificado reduciendo la capa adherida estancada. También actúa como un sumidero de calor y así influye en el porcentaje de perturbación.

De lo anterior, está claro que hay una diferencia importante en los mecanismos de formación de la junta entre los metales idénticos y los distintos. En la soldadura de metales idénticos la capa plastificada está en la interfase de las partes a ser soldada y forman el material de la unión entre ellas. En la unión de metales distintos la junta es hecha en la parte inicial del ciclo de soldadura por el traslado de fragmentos del metal suave al metal más duro y esto es seguido por una soldadura entre las capas de material idéntico.

A pesar del hecho que sólo una ligadura parcial se puede haber formado en la interfaz de soldaduras de metales distintos, el mecanismo de mezcla y entrelazado mecánico puede jugar un papel importante logrando una soldadura sólida. El grado de mezclado interfacial depende de los materiales y la situación en la interfase.

En general, la alta presión o la baja velocidad producirán una zona afectada por calor en forma de cuña hacia el centro, (FIGURA 3.30).

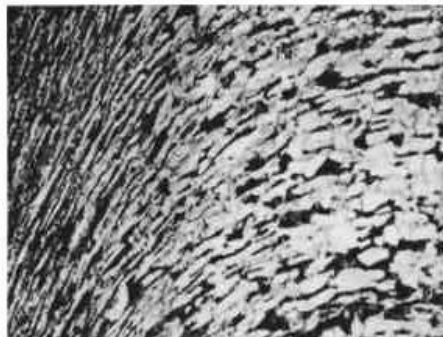


**FIGURA 3.30 .- CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE LA SOLDADURA CUANDO SE VARIAN LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA.**

Por otro lado, la alta velocidad o la baja presión producirán una zona afectada por el calor ligeramente pandeada en el centro. La zona afectada por el calor producida bajo una condición de soldadura óptima debe ser relativamente uniforme y estrecha a lo largo de la sección entera. Si la energía guardada en el volante es excesiva, forzará una gran cantidad de material fuera de la interfase para formar una rebaba o perturbación mayor. En la soldadura por inercia, la velocidad de rotación, que dicta la energía cinética más que cualquier otro parámetro, es un factor muy importante que afecta la ejecución de la soldadura. Una velocidad crítica mínima normalmente tiene que ser alcanzada para lograr una soldadura exitosa.

Debido a la interacción compleja entre los factores mecánicos, térmicos, y metalúrgicos durante el proceso de la soldadura, las microestructuras en regiones diversas son considerablemente diferentes. Cerca de la interfase, granos finos y severamente elongados prevalecen como resultado del mecanismo de deformación. La recuperación, recristalización, y crecimiento de grano del material deformado tiene lugar colindantemente con la zona afectada por el calor en varios grados, dependiendo del efecto térmico en la región.

A continuación (FIGURA 3.31) se muestra una parte de las microestructuras de una soldadura de acero al carbono blando que exhibe cambio gradual de estructuras de grano en la interfase hasta el metal base. La micrografía también muestra el modelo de flujo de metal en la región del radio medio para una soldadura que tiene una zona afectado por el calor en forma de cuña.



**FIGURA 3.31 .- MICROGRAFIA DE UNA BARRA DE ACERO AL CARBONO SOLDADA POR FRICCIÓN.**

Las microestructuras también son afectadas por las condiciones de soldadura. Para el proceso de manejo continuo se encontró que la presión más alta generalmente produce una estructura de grano en la interfase fina con una estrecha y doble zona afectada por el calor en forma de cuña. La velocidad creciente, por otro lado, tiende a compensar el efecto de presión ligeramente.

Estos resultados son concebibles en vista del hecho que la velocidad alta causará el efecto térmico que será dominante por encima del efecto mecánico en las microestructuras que, a su vez, dicta la dureza y el esfuerzo a la tensión en la zona de la soldadura. También se ha informado que forjando la interfase de la soldadura sobrecalentada se debilitarán el metal en la zona afectada por el calor. Después de la soldadura un tratamiento térmico de normalizado eliminaría los efectos adversos de forja en la interfaz de la soldadura recalentada.

La importancia del comportamiento térmico en la soldadura por fricción podría producir una diferencia mayor entre los procesos de inercia y de manejo continuo por lo que se refiere a la distribución de dureza. En la soldadura por inercia de barras de acero blando, se encontró que el promedio de dureza de Knoop para la interfase es aproximadamente superior 27% que la del metal base.

El hecho que la soldadura es más resistente que el metal base se evidencia por el resultado de una prueba de tensión típica (FIGURA 3.32).



**FIGURA 3.32 .- PROBETA SOLDADA POR FRICCION EN UNA PRUEBA DE TRACCION.**

La fractura incluso ocurrió fuera de la región de la soldadura después de que se maquinó ligeramente para reducir el área de la sección transversal en la soldadura. Por otro lado, aceros al medio carbono soldados por el proceso parecen tener generalmente más baja dureza en la zona afectada por el calentamiento que la del metal base.

El esfuerzo de tracción en la soldadura varía de 77 a 100% respecto al del metal base, dependiendo de las condiciones de soldadura. La diferencia en el esfuerzo de la soldadura que es el resultado del efecto térmico puede haber sido un factor que contribuye a un esfuerzo de fatiga ligeramente más alta en las soldaduras por inercia que en las soldaduras de manejo continuo reportadas para algunos materiales superaleados.

### **3.11.3.1 Ligaduras interfaciales en los metales soldados por fricción.**

Para la soldadura por fricción de metales idénticos bajo condiciones apropiadas, las ligaduras metalúrgicas se logran normalmente expeliendo las capas de la superficie contaminadas y reuniendo las subcapas nacientes cerca del rango de atracción atómica. Hasta cierto punto, puede esperarse que la difusión tenga lugar en la interfase durante las fases de calentamiento y forjado. De hecho, después de la soldadura un recocido de las soldaduras por fricción de acero de medio carbono causa que la interfase desaparezca completamente, y que los granos equiaxiales se restauren a lo largo de la soldadura como si no hubieran sido soldadas. El mecanismo de ligadura de soldaduras de metal distintos, sin embargo, parece ser mucho más complejo. Entre otros, los factores como las propiedades físicas, energía de la superficie, la estructura cristalina, la solubilidad mutua, y la posible formación de compuestos intermetálicos de los materiales a soldarse todos pueden jugar un papel en el mecanismo de ligadura.

---

La complejidad hace que la predicción de soldabilidad de un par de metales sea casi imposible sin ejecutar experimentos extensos. Es por tanto obvio que más que trabajo se necesita analizar sistemáticamente los mecanismos de unión para entender bien el proceso.

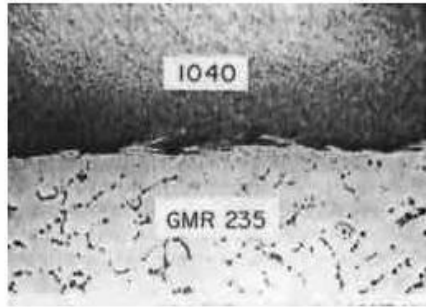
La clave para lograr una ligadura metalúrgica en el estado sólido es separar y quitar las capas de la superficie contaminadas, los materiales con diferencia sustancial en la dureza son generalmente más difíciles de soldar. El material duro no incurre en prácticamente ninguna deformación mientras el suave es deformado severamente o empujado hacia fuera. Los ejemplos incluyen soldaduras de acero inoxidable con aleación de aluminio y soldaduras de cobre con aluminio en que el acero inoxidable y el cobre no muestran señal obvia de deformación. En estos casos, el levantamiento completo de capa de la superficie del metal duro no puede ser posible debido a la falta de flujo por debajo de la superficie. Se esperan que algunos desechos de la superficie contaminante permanezcan incluidos en la interfase.

A pesar del hecho que sólo una ligadura parcial se puede haber formado en la interfaz de soldaduras de metales distintos, el mecanismo de mezcla y entrelazado mecánico puede jugar un papel importante logrando una soldadura sólida. El grado de mezclado interfacial depende de los materiales y la situación en la interfase. Se ha encontrado que a una profundidad de aproximadamente 0.002 in (0.05 mm) el mecanismo de mezclado existe a través de la interfase de soldaduras por inercia de tantalio con acero SAE 1018 (0.14-0.2% C, 0.6-0.9% Mn, 0.04% P, 0.050% S) (FIGURA 3.33)



**FIGURA 3.33 .- SOLDADURA POR FRICCIÓN DE UN ACERO 1018 Y TANTALIO.**

Al igual en la unión de la superaleación GMR235 (2.5% Al, 0.05% B, 0.1% C, 14% Cr, 0.1% Co, 8.0% Fe, 4.5% Mo, 1.5% Ti) con acero 1040 (0.37-0.44% C, 0.6-0.9% Mn, 0.04% P, 0.050% S) (FIGURA 3.34).



**FIGURA 3.34 .- SOLDADURA POR FRICCION DE UN ACERO 1040 Y UNA SUPER ALEACION GRM235.**

El grado de mezclado interfacial depende de los materiales y la situación en la interfaz. Una soldadura por inercia entre el acero de medio carbono y carburo de tungsteno (FIGURA 3.35) indica un mezclado muy pequeño. La ligadura se forma al parecer entre el acero y el aglutinante de cobalto dentro del carburo cementado.



**FIGURA 3.35 .- SOLDADURA POR FRICCION DE UN ACERO 1020 Y UN CARBURO DE TUNGSTENO.**

Aunque los procesos de soldadura por fricción parecen ser demasiado rápidos para que la difusión tenga lugar, comparado con los procesos de difusión típicos en la soldadura, los análisis de microsonda han indicado una zona de transición lisa enriquecida con acero de bajo carbono cuando tal soldadura por inercia fue examinada. Otras investigaciones de microsondas de aluminio con acero y acero de bajo carbono con titanio han encontrado evidencia de un elemento de mezcla. En una probeta se encontró la existencia de una capa de descarburización delgada en el lado de acero seguido por una solución sólida de hierro-titanio y/o un compuesto intermetálico de hierro-titanio. Aunque la formación de las capas de la aleación varía de lugar a lugar y la naturaleza exacta de estas capas no fue identificada, estas observaciones tienden a indicar que algún grado de difusión ha ocurrido en la zona de la soldadura durante el proceso.



---

### **3.12 MATERIALES A EMPLEAR EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN EN ESTE TRABAJO DE TESIS.**

Para este estudio sobre la soldadura por fricción realizaremos la unión de dos piezas de acero 1018 entre ellas y la unión de una pieza de acero 1018 a una pieza de aluminio 6061 T6, esta última como una manera comparativa de la unión entre metales idénticos y metales distintos.

#### **Propiedades de AISI 1018 (Cold Rolled)**

El acero 1018 es un acero hipoeutectoide y su principal composición química es la siguiente: contiene Carbono (C) con un porcentaje máximo de 0.2 y un mínimo de 0.14, contiene Hierro (Fe) con un porcentaje máximo de 99.26 y un mínimo de 98.81, contiene Manganeso (Mn) con un porcentaje máximo de 0.9 y un mínimo de 0.6, contiene Fósforo (P) con un porcentaje máximo de 0.04 y contiene Azufre (S) con un porcentaje máximo de 0.05. El tamaño de grano del acero 1018 es  $n_g = 5$ .

#### **La propiedad física del acero 1018.**

Es la densidad que es de  $7.87 \text{ g / cm}^3$ .

#### **Las principales propiedades mecánicas del acero 1018 son:**

Dureza Brinell:	126.
Dureza Knoop:	145.
Dureza Rockwell B:	71-126.
Dureza Vickers:	131.
Resistencia a la tracción:	400 - 440 MPa.
Esfuerzo de cedencia:	220 - 370 MPa.
Elongación en 50 mm:	5 - 25%.
Reducción de área :	40%.
Modulo de Elasticidad:	205 Gpa.
Maquinabilidad:	70%.

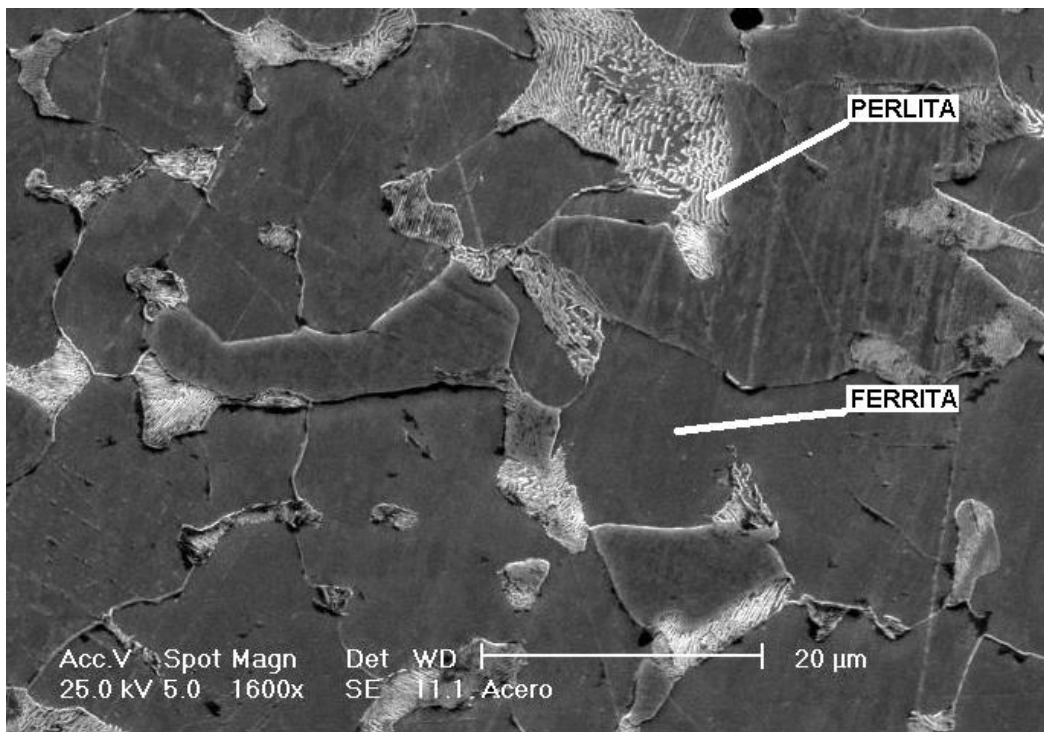
### Propiedad eléctrica.

Resistividad eléctrica:  $1.59E-05 \Omega \cdot \text{cm}$ .

### Propiedad térmica.

Conductividad térmica.  $51.9 \text{ W / m } \cdot \text{K}$

A continuación muestra las microestructuras presentes en el acero 1018. (FIGURA 3.36)



**FIGURA 3.36 .- MICROESTRUCTURAS PRESENTES EN EL ACERO 1018.**

El aluminio 6061 T6 es una aleación de aluminio con tratamiento T6, un tratamiento de envejecimiento artificial, que fortalece y optimiza las propiedades mecánicas y físicas de esta aleación. Sus elementos aleantes son los siguientes: contiene silicio, hierro, cobre, manganeso, magnesio, cromo, titanio y zinc. El porcentaje de silicio en este aluminio está entre el 0.4 y 0.8 % Si; el del hierro es de 0.7% Fe, el cobre está entre el 0.15 y el 0.4% Cu, el manganeso es de 0.15% Mn, el del magnesio está entre el 0.8 y 1.2% Mg, el cromo está entre el 0.04 y 0.35% Cr, el titanio es de 0.15% Ti y el zinc es de 0.25% Zn.

### La propiedad física del aluminio 6061 T6.

Es la densidad que es de  $2.7 \text{ g / cm}^3$ .

---

## Las principales propiedades mecánicas del aluminio 6061 T6 son:

Dureza Brinell:	95.
Resistencia a la tracción:	310 MPa.
Esfuerzo de cedencia:	275 MPa.
Elongación en 50 mm:	17%.
Modulo de Elasticidad:	69 GPa.

### Propiedad eléctrica.

Resistividad eléctrica:	0.043 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .
-------------------------	---

### Propiedad térmica.

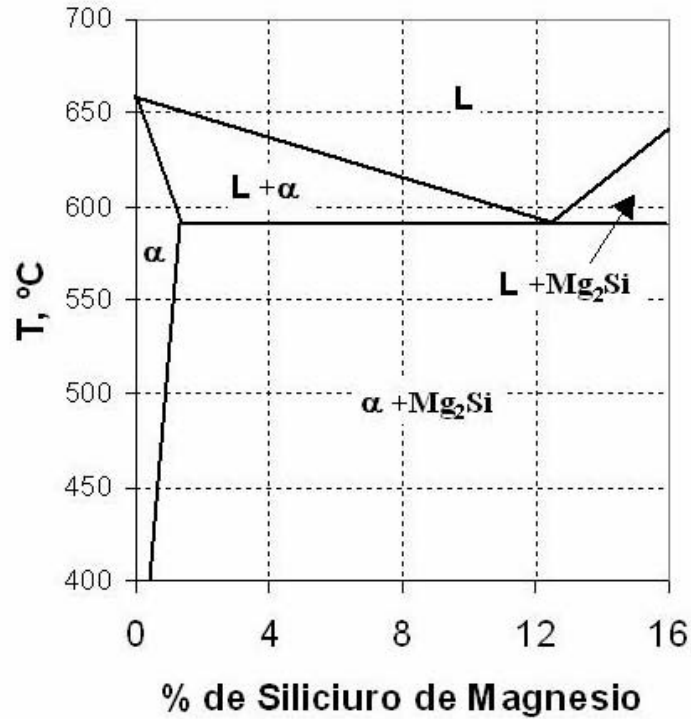
Conductividad térmica.	167 W / m *K
------------------------	--------------

Para este trabajo de tesis, se escogió el aluminio 6061 T6, por las siguientes razones:

- Buenas propiedades mecánicas.
- Buenas características de soldabilidad.
- Resistencia alta a la corrosión.
- Buena maquinabilidad.
- Es una de las aleaciones comerciales más usadas en los procesos de manufactura.
- Tiene una mejor dureza.
- Es una de las aleaciones de aluminio que más comúnmente se menciona que se ha logrado soldar por fricción.

Al igual que el acero 1018, las fases presentes en el aluminio 6061 T6, se pueden observar mediante el análisis del Diagrama del sistema Al – Mg<sub>2</sub>Si (Siliciuro de magnesio) (FIGURA 3.37), ya que los principales aleantes del 6061 T6 son el magnesio y el silicio.

La cantidad de Mg<sub>2</sub>Si contenida en el es alrededor 2%, por lo cual las principales fase presentes en esta aleación son: la fase  $\alpha$  + Mg<sub>2</sub>Si que se encuentra desde la temperatura ambiente hasta alrededor de los 500 °C subiendo por un línea vertical. Arriba de los 500 °C hasta los 610 °C se encuentra la fase  $\alpha$ . De los 610 °C hasta los 660 °C se tiene  $\alpha$  + L, y por encima de los 660 °C al aleación se encuentra en fase L .



**FIGURA 3.37 .- FRAGMENTO DEL DIAGRAMA Al – Mg<sub>2</sub>Si.**

En la siguiente tabla A se muestran algunas de las aleaciones de aluminio soldadas por el proceso de soldadura por fricción.

**Tabla A .- ALEACIONES DE ALUMINIO SOLDADAS POR EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION**

METAL A	METAL B
Aluminio 1100	Aluminio 1100
Aluminio 1100	Aluminio 6061
Aluminio 1100	Cobre
Aluminio 2024	Aluminio 2024
Aluminio 6061	Aluminio 6061
Aluminio 6061	Aluminio 6063
Aluminio 6061	Aluminio 1100
Aluminio 6063	Aluminio 6063
Aluminio 6063	Aluminio 7075

---

# CAPITULO 4.

## CARACTERIZACION MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION.

En éste capítulo se desarrolla el objetivo principal de este trabajo:

“Caracterización de la soldadura por fricción de la unión acero 1018 con acero 1018, y la evaluación del proceso de soldadura por fricción entre las uniones acero 1018 con acero1018 y aluminio 6061 T6 con acero1018. “

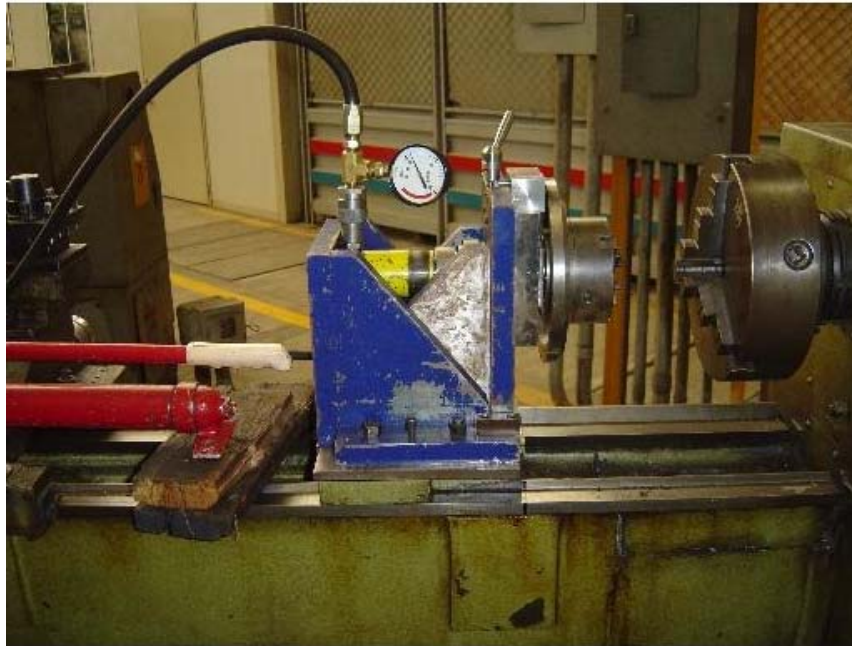
Esta caracterización se realizará en base a los valores obtenidos en los ensayos de dureza y tracción para tales uniones, y se evaluará el proceso de soldadura por fricción entre la unión acero 1018 con acero 1018, (metales idénticos) y aluminio 6061 T6 con acero1018 (metales distintos)

Para esto se describirá de una manera general los pasos para la obtención de las probetas y las pruebas mecánicas realizadas a estas, así como también la interpretación de los resultados obtenidos del proceso de soldadura en las pruebas mecánicas de cada una de las probetas.

#### 4.1 BREVE DESCRIPCION DEL EQUIPO PARA SOLDAR POR FRICCION.

Partiendo del objetivo de este trabajo daremos una breve descripción del equipo utilizado para realizar la soldadura por fricción (FIGURA 4.1), que fue modificado para cubrir las necesidades de seguridad, ya que se utiliza en un torno convencional que no está adecuado para realizar este proceso.

El equipo fue modificado de su diseño original por seguridad del usuario y el cuidado del torno. Se retiró del carro donde originalmente se encontraba y se ancló sobre la bancada encima de la base del contrapunto, ya que el equipo durante el proceso llega a tener vibraciones y esto puede dañar el husillo así como los engranes del carro, ocasionando desajustes en el torno. La ventaja que se tiene al anclar el equipo a la bancada es que aseguramos que el equipo no daña ninguna parte mecánica del torno y se disminuyen las vibraciones ya que son éstas las que pueden en algún momento desalinearse las piezas o sacarlas de centro por lo que el proceso no se realizaría óptimamente.



**FIGURA 4.1 .- EQUIPO DE SOLDADURA POR FRICCION.**

Otra parte importante de las mejoras realizadas es el añadirle un sistema de freno el cual basándose en la soldadura por fricción convencional e inercial, se modificó a un sistema híbrido en donde se juntan las características de la primera y de la última, dando como resultado que se tiene el chuck del torno que gira a cierto número de rpm y se mantiene otro chuck fijo por medio de un perno que se acciona con una pequeña leva (FIGURA 4.2).



**FIGURA 4.2 .- LEVA ACCIONADORA DEL FRENO.**

Durante el proceso el perno sujeta al chuck y lo fija por medio de un plato con una serie de barrenos y el perno introducido en uno de estos barrenos mantiene sin girar al chuck permitiendo que las piezas en contacto se friccionen y calienten.

Al finalizar la expulsión del material durante el proceso y teniendo las piezas al rojo vivo se libera el perno por medio de la leva que gira libremente junto con el chuck del torno mientras se le aplica una fuerza axial producida por un pistón y después de desconectar el chuck del torno se mantiene la presión hasta que el equipo deja de girar, solo hasta entonces las piezas giran libremente hasta que se detienen.

Sobre el reacomodo de las partes de la máquina para soldar está el disco de freno, (FIGURA 4.3), el cual está atornillado al chuck de la máquina para soldar; se le hicieron una serie de barrenos junto con una caja para poder quitarle peso y esto ayuda a evitar que la inercia sea mayor y alcance la misma velocidad del chuck del torno en muy poco tiempo, si esto no se hubiera realizado tardaría más tiempo en alcanzar la velocidad del chuck del torno por tener una masa mayor.



**FIGURA 4.3 .- DISCO DE FRENO DE LA MAQUINA.**

La disminución de peso en el chuck de la máquina nos asegura que la soldadura no tenga una gran deformación ya que estimamos que al estar el acero en una fase líquida pueda tener cambios de forma al tardar éste en girar y ésta sea un factor para que la soldadura no sea buena.

Dentro de las modificaciones hechas a la máquina para soldar (FIGURA 4.4), está el sistema de giro del chuck el cual consta de un eje que tiene una rosca para sujetar el chuck y está soportado por 4 rodamientos que son dos axiales y dos radiales y un par de tuercas para poder sujetar el eje.



**FIGURA 4.4 .- MODIFICACIONES HECHAS A LA MAQUINA.**



Los rodamientos están distribuidos de la siguiente forma: uno de los dos axiales están sobre la pared de la máquina y el otro está en la base del pistón, donde esto nos permite, que al aplicarle la fuerza al eje, este gire libremente, y los radiales están dentro de un barreno que atraviesa la pared donde se sujeta el chuck y a la que se le sumó un bloque de acero que también se le barrenó y que se le hicieron las cajas para poder poner los rodamientos.

Al bloque que se le sumó a la pared de la máquina este fue puesto para tener una mayor distancia de eje para poder así evitar que el eje saliera de centro y para tener mayor apoyo a los rodamientos y evitar que estos se dañen.

#### 4.2 PREPARACION DE LAS PIEZAS A SOLDAR.

Como ya se explicó en el capítulo 2 las probetas deben ser de forma cilíndrica y refrentadas en la parte en la que se va a llevar a cabo la unión, ésta parte debe de ser plana. En nuestro caso las probetas con las características anteriores nos generaron mucha vibración en la máquina, por lo cual decidimos proponer las siguientes dimensiones, (FIGURAS 4.5 y 4.6), para las piezas antes de ser soldadas: (nota: la disposición geométrica de las piezas a soldar en nada afecta el proceso de soldadura ya que durante éste sólo se expulsa más material).

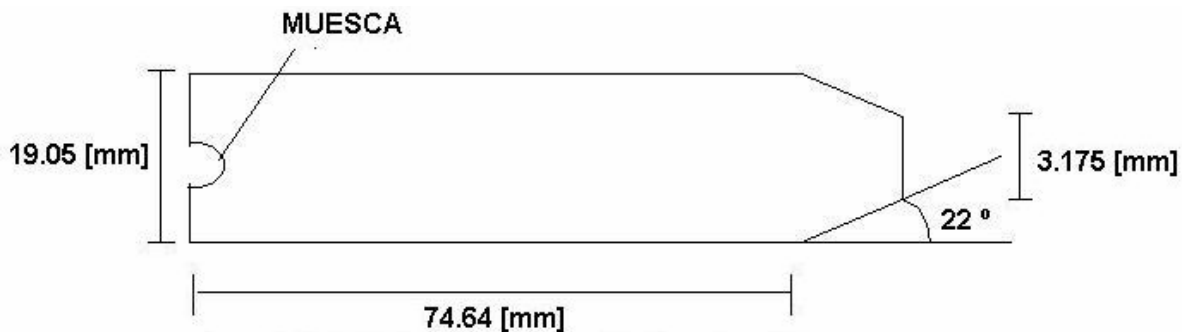


FIGURA 4.5 .- DIMENSIONES DE LA PIEZA DEL CHUCK DEL TORNO.

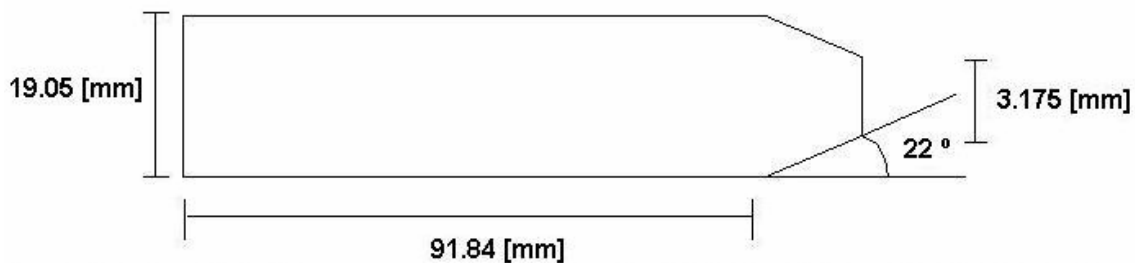


FIGURA 4.6 .- DIMENSIONES DE LA PIEZA DEL CHUCK DEL DISPOSITIVO PARA SOLDAR.

---

Para las piezas, se requirió de una boquilla (FIGURA 4.7) la cual nos ayuda a sujetar la pieza al chuck del torno, ya que durante el proceso se le aplica una fuerza con el pistón, que llega a ser de 8 ton aproximadamente, y esto podría hundir la pieza por acción de la fuerza y además ésta boquilla permite que la pieza no patine entre las mordazas del chuck ya que se le hizo un barreno en la parte trasera para poner un perno, el cual nos ayuda como un tope para evitar que la pieza gire, y a ésta también se le hace una muesca con un cortador para que embone con el perno y todo esto asegura que la pieza no se hunda y que tampoco gire.



**FIGURA 4.7 .- BOQUILLA PARA LA PIEZA QUE ES COLOCADA EN EL CHUCK DEL TORNO.**

Para la unión acero 1018 con acero 1018, la posición en los chucks de las piezas a soldar son indistintas, ya que nos referimos a la soldadura de un metal idéntico, y se está partiendo del mismo material, es decir, del material base que es un acero 1018 como se había mencionado en el capítulo anterior.

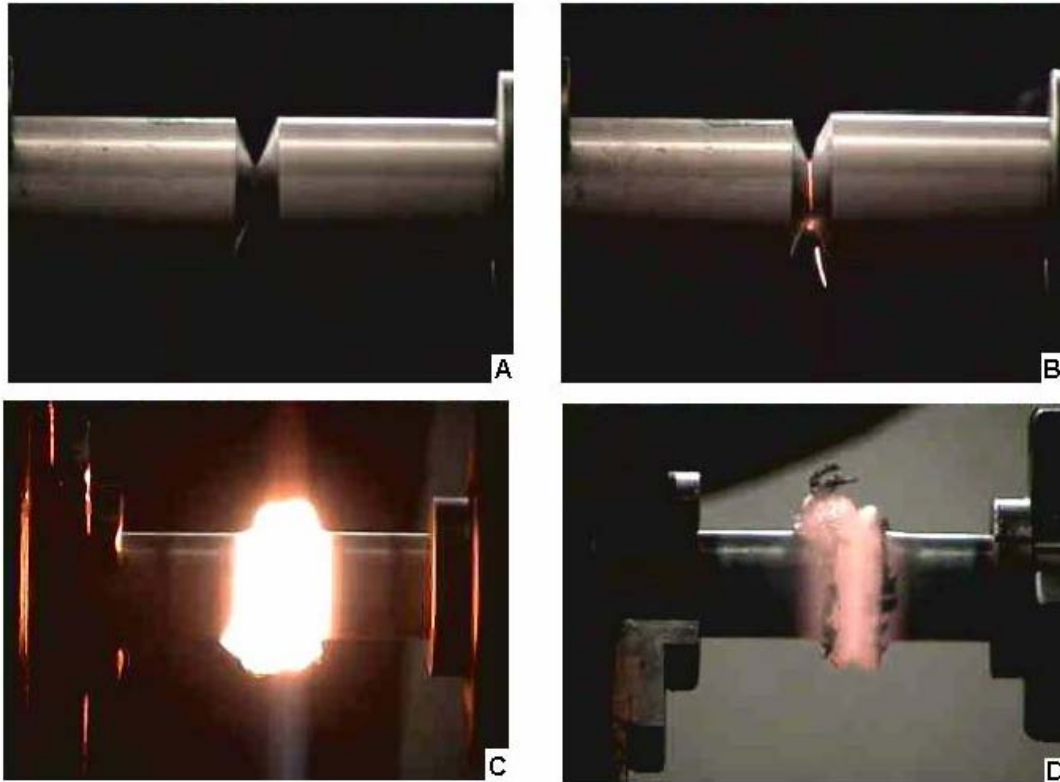
En el caso de la unión de aluminio 6061 T6 con acero 1018, es muy distinto y difícil de realizar por que el punto de fusión del aluminio es más bajo que el del cold-rolled, y esto ocasiona que la soldadura no tenga una adecuada unión como la del acero con acero y todo esto no genera la rebaba característica de la soldadura por fricción.

La adecuada posición del aluminio para poder generar ésta rebaba, es colocarlo en el chuck del dispositivo para soldar, ya que éste por el tamaño le sirve para no disipar el calor y mantener un poco mas de tiempo la temperatura y así esto permita que el cold-rolled también pueda alcanzar una temperatura adecuada para llevar a cabo la unión. También cabe mencionar que a ésta pieza, la de aluminio, se le maquinó la misma conicidad que a las piezas de acero, esto para asegurar mayor material en contacto al momento en que éstas friccionen y mantengan la temperatura del centro hacia afuera en ambas piezas.

---

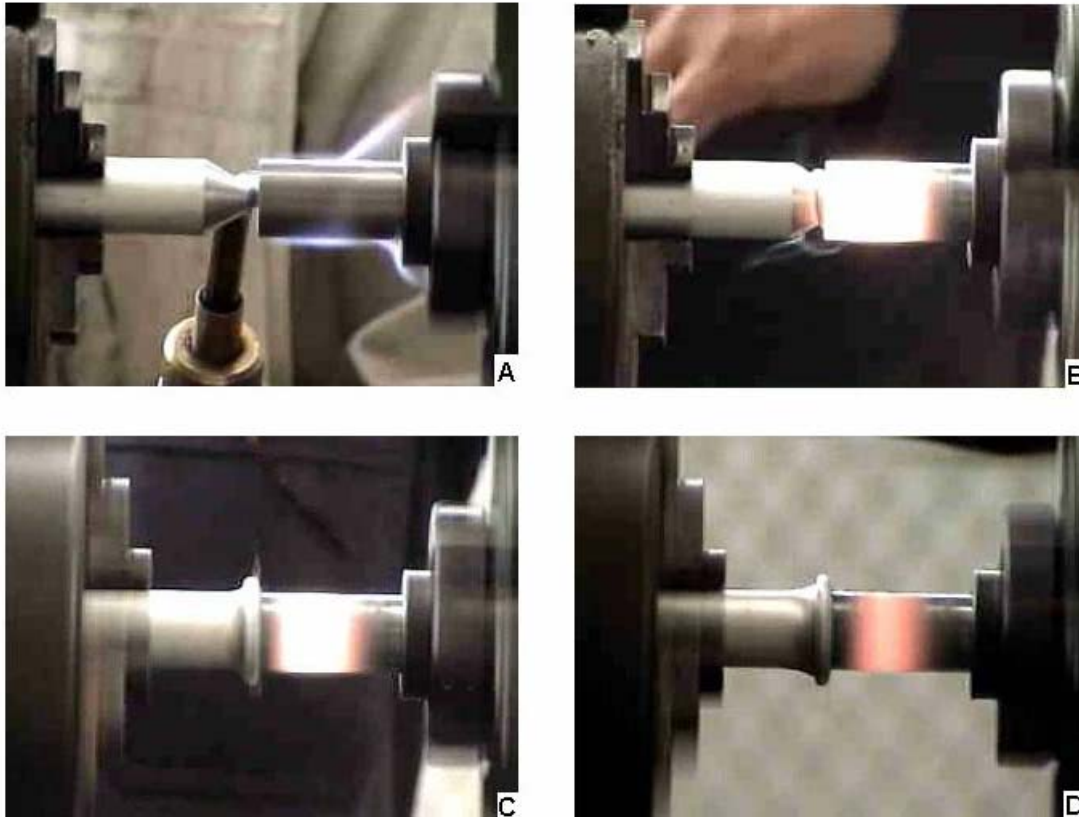
### 4.3 PROCEDIMIENTO PARA UTILIZAR LA MÁQUINA DE SOLDADURA Y PARA REALIZAR LAS PROBETAS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN.

1. Se inicia preparando las piezas y ajustando a la medida cada una de ellas a cada uno de los chucks, utilizando la boquilla que se fabricó para utilizarla en el chuck del torno, para así evitar que cuando se aplica la fuerza por medio del pistón la pieza no se introduzca entre las mordazas del chuck. Éstas piezas tienen las dimensiones ya antes mostradas, así como un ángulo en la punta de cada pieza la cual no influye en la unión de la soldadura ya que el ángulo en las piezas, como se había, mencionado anteriormente nos ayuda a que la fricción de ambas comience en un área menor y eso ayuda a que la maquina no vibre tanto al momento de desarrollar la soldadura y empuje el material del centro hacia fuera de ambas piezas, pero esto no es factor para que la soldadura se afecte ya que siempre llegaremos a formar dos planos en contacto y todo esto es solo para facilitar el desarrollo de la soldadura.
2. Se ajusta la leva y se introduce el perno dentro de alguno de los barrenos realizados en el disco y este actúa como freno para el chuck de la máquina, ayudando así, a que durante el proceso no se libere el chuck. Solo hasta que la leva gira, libera el perno y también se libera el disco que contiene al chuck de la máquina que gira libremente junto con el chuck del torno.
3. Durante el proceso de careado (FIGURA 4.8 A) de las dos piezas en contacto se le aplica una fuerza que es proporcionada por una bomba hidráulica manual que a su vez empuja a un pistón el cual se encuentra en la máquina de soldadura por fricción y esta nos proporciona la presión para calentar las piezas (FIGURA 4.8 B), al elevarse la temperatura, mientras se bombea aceite dentro del pistón y en el momento en que las dos piezas se encuentran en un estado plástico y un blanco intenso en la unión con los extremos al rojo vivo de ambas piezas (FIGURA 4.8 C); se mantiene un cierto tiempo para asegurar una alta temperatura esta presión y después se libera el chuck de la máquina sólo en ese instante se le aplica una presión mucho mayor de la que se utilizó durante el calentamiento a lo que llamamos de forja (FIGURA 4.8 D) . Con esta presión aseguramos que la soldadura sea de buena calidad.



**FIGURA 4.8 .- PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA UNIÓN ACERO 1018 CON ACERO 1018.**

4. Para el caso de la unión aluminio 6061 T6 con acero 1018, a la pieza de acero 1018 se le precalentó en el extremo en donde se llevará a cabo la unión (FIGURA 4.9 A) por medio de un soplete de oxiacetileno, esto para tratar de elevar la temperatura del acero, ya que su punto de fusión es más alto que el del aluminio y para dar oportunidad de que se lleve a cabo la unión formando se la rebaba característica, tratando de evitar la pérdida de calor durante el proceso. Después de calentar el acero se prosiguió a la etapa de calentamiento de ambas piezas ya en el proceso de soldadura por fricción (FIGURA 4.9 B). Se siguió elevando la temperatura de ambas piezas a través de aumentar la presión del pistón y mantenerla hasta el momento en que las dos piezas se encuentran en un estado plástico, (FIGURA 4.9 C). Se mantiene un cierto tiempo para asegurar que no halla pérdida de calor y después se libera el chuck de la máquina sólo en ese instante se le aplica una presión mucho mayor (aproximadamente de 10 ton) de la que se utilizó durante el calentamiento (FIGURA 4.9 D).



**FIGURA 4.9 .- PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA UNIÓN DE ALUMINIO 6061 T6 CON ACERO 1018.**

Durante la aplicación del proceso de soldadura por fricción se realizaron 6 probetas de la unión acero 1018 con acero 1018 para metalografía y otras 6 probetas para pruebas de tracción; además de una probeta de acero 1018 sin soldar. También se realizó 1 probeta de la unión aluminio 6061 T6 con acero 1018 para aplicarle el ensayo de dureza y otras 2 probetas para pruebas de tracción.

En la realización de las probetas se mantuvieron algunos parámetros constantes, no siendo así, para otros que se tuvieron que variar, dado que el torno en donde está montado el dispositivo de soldadura por fricción nos da una velocidad máxima de 1200 rpm, este fue uno de los parámetros que fijamos para todas las probetas que se soldaron. La presión de forja se mantuvo en 8 ton para todas las probetas de acero 1018 así como también se fijó el tiempo de forjado para cada una de ellas que fue de 12 s.

Los únicos parámetros que se variaron, fueron la presión de calentamiento, el tiempo de calentamiento y el tiempo en el que se llevo a cabo la fusión de los materiales.

Para el caso de la soldadura de metales distintos como son el acero 1018 y el aluminio 6061 T6 la unión se vuelve complicada ya que uno de los metales tiene un punto de fusión mucho menor que es el caso del aluminio, comparado con el que se tiene en el acero que es mayor y esto causa que durante el proceso el metal suave que es el aluminio adquiera una consistencia chiclosa mucho antes que el acero se encuentre a una temperatura adecuada donde pueda difundirse y así lograr la unión.

En esta unión la dificultad radica que el acero tiene un punto de fusión mayor, alrededor de los 1600 °C, y el aluminio lo tiene alrededor de los 660 °C y todo esto provoca que el acero solo se introduzca en el aluminio y este absorba la mayor parte de la temperatura que se encuentra en la unión, provocando una deficiente soldadura. De allí parte la necesidad de precalentar al acero para aumentar la temperatura tanto como se pueda para que durante el contacto con el aluminio este absorba el calor más rápido y permita que el acero este en una buena temperatura para realizar la unión. Nota: de preferencia hay que mantener el soplete sobre la pieza de acero durante todo el proceso para garantizar que el aluminio que es más blando difunda sobre el acero que es más duro. Por todo esto se mantuvo un mayor tiempo el calentamiento de ambos metales para asegurar que la pérdida de temperatura nos de cómo resultado una buena unión, así también el tiempo de forjado fue menor cerca de los 7 segundos para evitar una mayor pérdida de temperatura. La presión se mantuvo cerca de las 10 ton ya que el aluminio se deforma fácilmente con el calor y que esto permita una buena unión entre los metales.

#### 4.4 TABLA DE PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA.

En la tabla 2, se muestra los valores de los parámetros de las probetas de metal idéntico, a las cuales se les hará el análisis metalográfico:

Probeta	Material		RPM	Tiempos [s]			Presiones [Ton]	
	A	B		Calentamiento	Fusión	Forjado	Calentamiento	Forja
1	Acero1018	Acero1018	1200	60	140	12	2	8
2	Acero1018	Acero1018	1200	60	130	12	2	8
3	Acero1018	Acero1018	1200	25	40	12	3-4	8
4	Acero1018	Acero1018	1200	15	30	12	3-4	8
5	Acero1018	Acero1018	1200	50	100	12	2	8
6	Acero1018	Acero1018	1200	20	55	12	2-3	8

Tabla 2.

En la tabla 3, se muestran los valores de los parámetros de las probetas de metales distintos.

Probeta	Material		RPM	Tiempos [s]			Presiones [Ton]	
	A	B		Calentamiento*	Fusión	Forjado	Calentamiento	Forja
7	Acero1018	Aluminio 6061 T6	1200	240	15	7	4	10

**Tabla 3.**

(\*) Nota: incluye el precalentamiento del acero con el soplete

En la tabla 4, se muestran los valores de los parámetros de las probetas a las cuales se les aplicará el ensayo de tracción:

Probeta	Material		RPM	Tiempos [s]			Presiones [Ton]	
	A	B		Calentamiento	Fusión	Forjado	Calentamiento	Forja
1	Acero1018	Acero1018	1200	60	140	12	2	8
2	Acero1018	Acero1018	1200	60	130	12	2	8
3	Acero1018	Acero1018	1200	25	40	12	3-4	8
4	Acero1018	Acero1018	1200	15	30	12	3-4	8
5	Acero1018	Acero1018	1200	50	100	12	2	8
6	Acero1018	Acero1018	1200	20	55	12	2-3	8
7	Acero1018	Aluminio 6061 T6	1200	240*	15	7	4	10
8	Acero1018	Aluminio 6061 T6	1200	240*	15	7	4	10

**Tabla 4.**

**Nota:** Los parámetros de las probetas que se analizarán metalográficamente de la tabla 2 (probetas acero 1018 con acero 1018) corresponden a los parámetros de las probetas que se les aplicará el ensayo de tracción de la tabla 4, excepto para la soldadura de metales distintos, la cual como se mencionó en el capítulo anterior, solo serán utilizadas de manera comparativa en la prueba de tracción entre metales idénticos y metales distintos; es decir la probeta #1 de la tablas 2 y 4, se realizaron con los mismos valores de parámetros y así sucesivamente. Así como las de la tablas 3 y 4 correspondientes a los metales distintos; es decir, las probetas 7 y 8 (unión aluminio 6061 T6 con acero 1018) de la tabla 4 le corresponde la probeta 7 de la tabla 3.

---

## **4.5 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA EL ANALISIS DE LAS PROBETAS SOLDADAS.**

El estudio de la soldadura que realizaremos se basará en los siguientes pasos y pruebas mecánicas para poder dar un análisis más amplio de la soldadura obtenida por el proceso de soldadura por fricción. Estos pasos y ensayos mecánicos son los siguientes:

- Preparación de las probetas soldadas para metalografía.
- Metalografía de las probetas.
- Microscopia electrónica.
- Ensayo de dureza Rockwell B
- Ensayo de tracción.

Para la unión aluminio 6061 T6 con acero 1018 solo se aplico el ensayo de dureza rockwell B de manera superficial y el ensayo de tracción, ya que, como se mencionó en el capítulo anterior, solo el estudio de dicha unión se basará en la evaluación entre la unión de materiales idénticos (acero 1018 con acero 1018) y la unión de metales distintos (aluminio 6061 T6 con acero 1018). No se aplicará la metalografía para la soldadura de metales distintos, ya que es demasiado complicado la preparación de una probeta metalográfica de dicha unión, porque si no se tiene mucho cuidado durante el desbaste, se pueden generar inclusiones de un material a otro.

### **4.5.1 PREPARACION DE LAS PROBETAS SOLDADAS PARA METALOGRAFIA.**

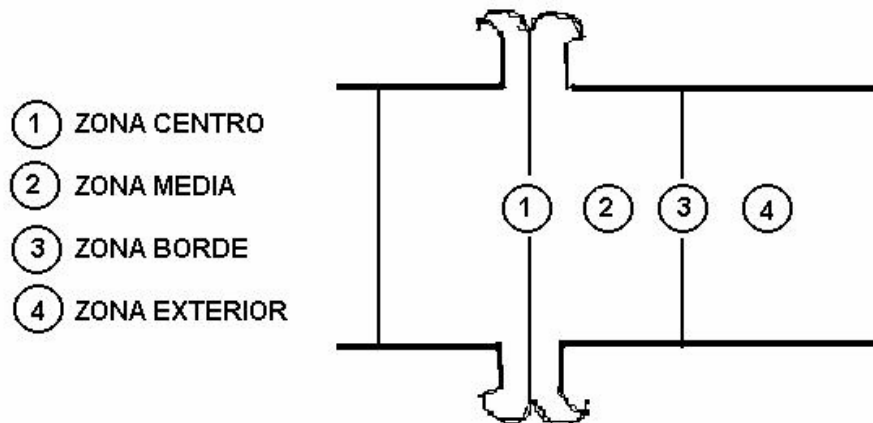
#### **4.5.1.1 Corte de las probetas.**

Para realizar el estudio de la soldadura debemos asegurarnos de elegir la parte adecuada para poder realizarlo, nosotros propusimos tomar en cuenta la existencia de 4 zonas que son de gran importancia para analizar la soldadura (FIGURA 4.10).

Estas zonas son:

- a) Parte central de la soldadura (zona central).
- b) Parte media de la soldadura (zona media).
- c) Parte afectada por el calor durante la soldadura (zona borde).
- d) Parte que no participa en la soldadura (zona exterior).





**FIGURA 4.10 .- ZONAS DE IMPORTANCIA EN LA ANALISIS DE LA SOLDADURA.**

La zona central es aquella en la que se llevo acabo la unión de las caras de las piezas, es decir la zona central de la soldadura.

La zona media es aquella donde se obtuvo la soldadura, es una zona cercana a la unión pero es de gran importancia por que es donde se encuentra la mayor parte de cordón de soldadura

La zona borde es una zona que fue afectada por el calor durante el proceso de la soldadura por fricción, es una zona de transición entre la parte de la probeta que participo en el proceso y la parte de la probeta que no se vio afectada por el proceso.

La zona exterior es aquella que se encuentra lejos de la soldadura y que no participo ni se vio afectada en el proceso de esta, y que mantiene las características esenciales del metal base.

Es por eso que para obtener muestras de tamaño adecuado para poderlas analizar el corte se realizo en la cortadora de disco abrasivo, que se encuentra en el laboratorio de análisis metalográfico del departamento de ingeniería mecánica, de la siguiente manera; al centro de cada espécimen, verticalmente al área transversal, (FIGURA 4.11), a una distancia aproximada de 2.5 pulgadas de longitud total, es decir, 1.25 pulgadas de cada lado tomando en cuenta el centro de la unión de la soldadura y, no afectar las cuatro zonas de importancia de las probetas y así poder ver como se va comportando cada una de estas zonas en el microscopio electrónico.



**FIGURA 4.11 .- CORTE DE LAS PROBETAS PARA METALOGRAFIA.**

#### **4.5.2 METALOGRAFIA DE LAS PROBETAS.**

Una vez cortadas las probetas, se procedió a tallarlas en las mesas para metalografía (FIGURA 4.12), en la siguiente secuencia:



**FIGURA 4.12 .- MESAS PARA METALOGRAFIA.**

---

1. Esmerilado planar o desbaste grueso.

Mediante el uso de bandas abrasivas con granos en el rango de malla de 60 –180, se dio planicidad a superficies irregulares y se eliminaron los defectos superficiales burdos y escoria, como lubricante se utiliza agua.

2. Esmerilado fino.

Se usaron papeles abrasivos en el rango de malla de 230 - 600 en secuencia descendente de tamaño de partícula.

3. Pulido grueso.

Se aplicó alúmina gris en un paño, sobre un plato rotatorio. Esta etapa realizó en uno o más pasos, se utilizó agua para dispersar los residuos del pulido.

5. Pulimento final.

Se aplicó alúmina blanca sobre un paño. Esta etapa realizó en uno o más pasos hasta desarrollar la superficie final altamente pulida y sin distorsión, como lubricante se utiliza agua.

6. Ataque.

Se aplicó una solución de alcohol al 97% y 3% de ácido nítrico (nital), para revelar los detalles microestructurales.

#### **4.5.3 MICROSCOPIA ELECTRONICA.**

Para poder estudiar de mejor manera la soldadura recurrimos a la microscopia electrónica (FIGURA 4.13) para analizar las cuatro zonas de importancia de la soldadura, de las cuales se tomaron imágenes, en una misma línea longitudinal, de dichas zonas a 100, 200, 400, 800 y 1600 aumentos para cada una de las probetas con la finalidad de poder ver como iba cambiando la microestructura del metal debido a los parámetros que manejamos durante el proceso de soldadura por fricción.



**FIGURA 4.13 .- MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.....**

Estas fotografías, mostradas en el punto 4.6, nos darán información importante en la zona de unión, en la zona media, en la zona borde y en la zona exterior para poder entender que sucede y como se fue modificando la microestructura durante el proceso en cada una esas zonas.

#### **4.5.4 ENSAYO DE DUREZA (ROCKWELL B).**

La finalidad de la aplicación del ensayo de dureza Rockwell B es para poder analizar como se comporta la dureza superficial en las cuatro distintas zonas de la soldadura y en la probeta misma; y así poder interpretar los resultados de dureza en cada una de las zonas así como el comportamiento de metal que se dio durante el proceso de soldadura por fricción.

Estas medidas fueron obtenidas en un durómetro Rockwell, (FIGURA 4.14), que se encuentra en el laboratorio de ciencia de materiales del departamento de ingeniería mecánica.

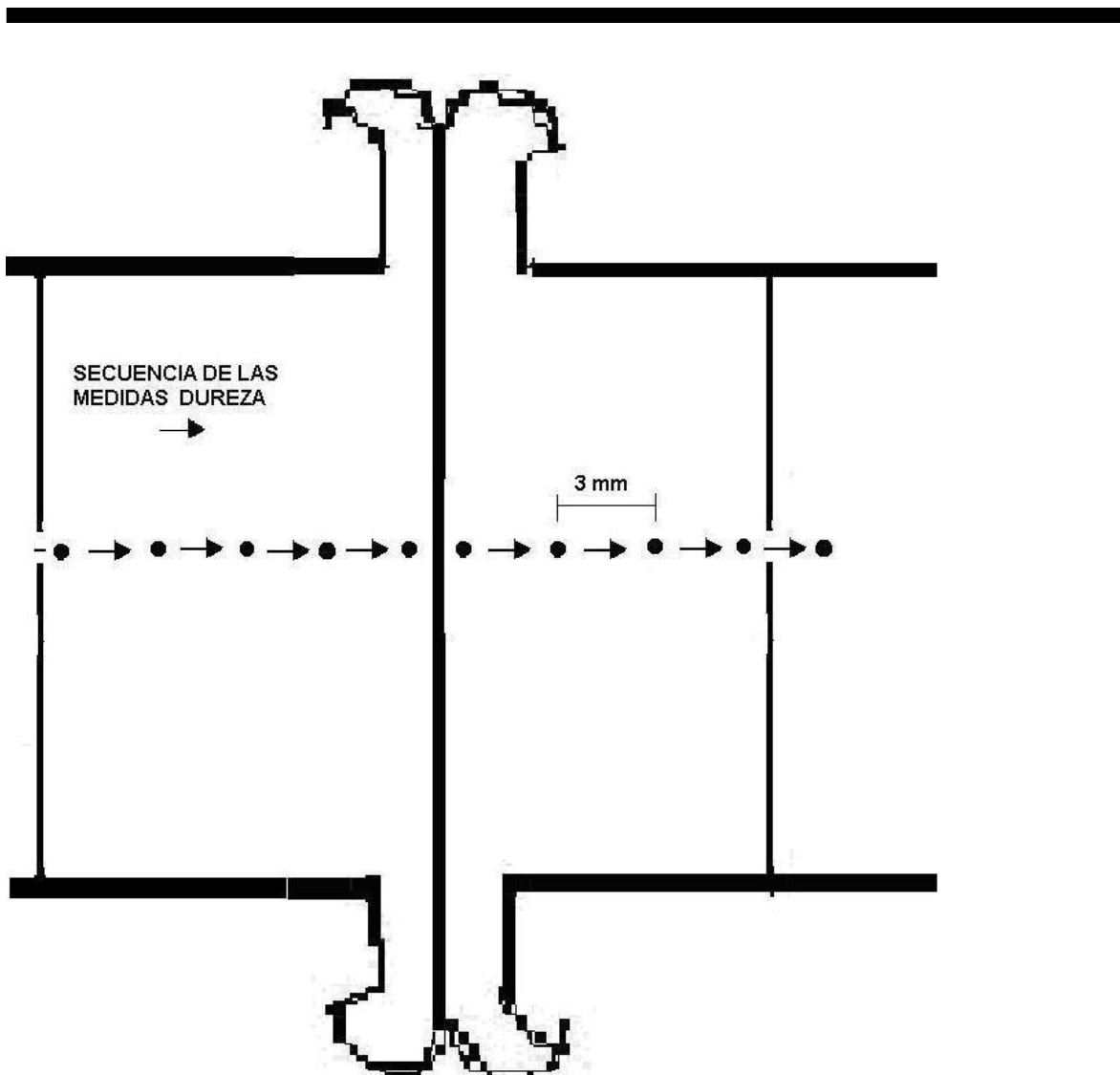


**FIGURA 4.14 .- DUROMETRO ROCKWELL.**

El tipo de indentador utilizado fue de bola de 1/16 de pulgada aproximadamente y con una carga de 100 Kg. Las medidas se hicieron en el centro de cada probeta y en toda la longitud de ésta (FIGURA 4.15).

Para el caso de la unión aluminio 6061 T6 con acero 1018, la probeta se maquina y se le hizo un pequeño plano en su superficie para tomar dureza Rockwell B en toda la probeta, para ver como se comportaron los materiales cerca de la unión, ya que como se menciona anteriormente, es muy difícil hacer una probeta metalográfica de este tipo de unión.

Las graficas para el ensayo de dureza Rockwell B, tanto para las probetas de metal idéntico como las de material distinto, se encuentran en el apéndice A.



**FIGURA 4.15 .- SECUENCIA DEL ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B.**

Como se puede observar en las gráficas de las probetas que se encuentran en el apéndice A, casi no hubo variación en la dureza de cada una de las probetas de material idéntico.

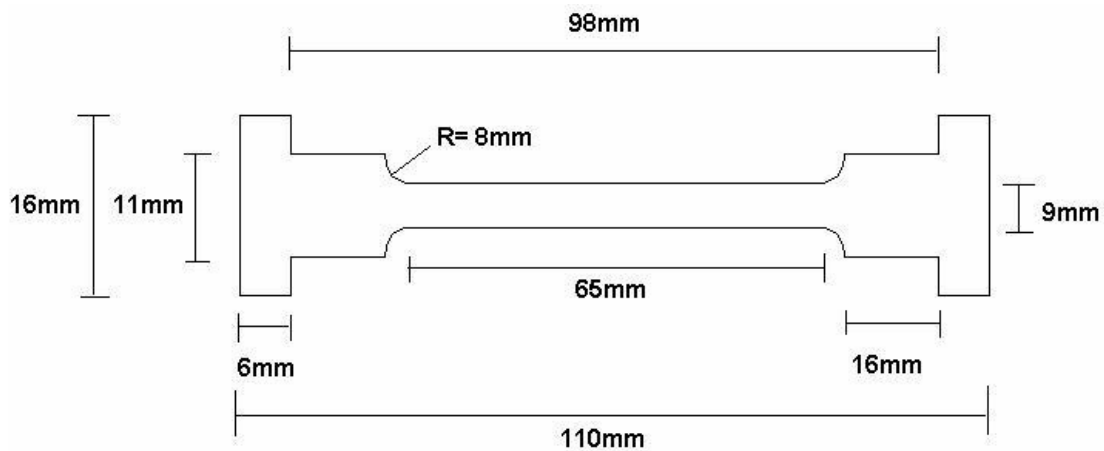
#### **4.5.5 ENSAYO DE TRACCION.**

La importancia de este ensayo mecánico en este trabajo radica en la necesidad de poder medir y conocer la resistencia a la tracción, en particular, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de ruptura para cada una de las probetas obtenidas por el proceso de soldadura por fricción y así poder obtener un valor real que nos permita verificar la calidad de la soldadura. Fueron obtenidos todos estos valores con la máquina de ensayo de tracción que se encuentra en el laboratorio de pruebas mecánicas del departamento de ingeniería mecánica (FIGURA 4.16).



**FIGURA 4.16 .- MAQUINA PARA EL ENSAYO DE TRACCION.**

Las probetas se maquinaron después de la soldadura hasta obtener una probeta estandarizada con las siguientes medidas (FIGURA 4.17).



**FIGURA 4.17 .- MEDIDAS DE LA PROBETA DE TRACCION.**

Después, de manera adicional, se hizo una probeta de acero 1018 sin soldar, con la finalidad de obtener los valores de resistencia a la tracción para poder compararlos con las de las piezas soldadas.

En la tabla 5 se pueden ver los resultados de la prueba de tracción realizada a las probetas de acero 1018 que fueron soldadas por fricción.

Probeta	Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	Elongación (%)
1	Acero1018	505.2	340.0	15.63
2	Acero1018	481.1	309.6	19.22
3	Acero1018	569.2	357.4	11.70
4	Acero1018	494.5	436.8	12.37
5	Acero1018	494.5	315.7	17.56
6	Acero1018	513.8	327.4	16.39

**TABLA 5.**

Los resultados de la prueba de tracción para la probeta de acero sin soldar se muestran en la tabla 6.

Probeta	Material (sin soldar)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	Elongación (%)
H	Acero 1018	633.2	404.2	14.46

**TABLA 6.**

Los resultados obtenidos de la prueba de tracción de la unión aluminio 6061 T6 con acero 1018 se muestran en la tabla 7.

Probeta	Material		Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	Elongación (%)
	A	B			
7	Acero 1018	Aluminio T 6061	99.72	99.72	2.22
8	Acero 1018	Aluminio T 6061	49.07	49.07	1.90

**TABLA 7.**

Las gráficas de ensayo de tracción de cada una de las probetas de las tablas 5,6 y 7 se muestran en el apéndice B.



#### 4.6 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE CADA PROBETA.

Para realizar la interpretación de los resultados obtenidos en la microscopia y en los ensayos de dureza y tracción de cada una de las probetas de la unión acero 1018 con acero 1018, se compararán dichos resultados con los obtenidos en la probeta H de acero 1018 sin soldar, para poder ver como se modificó la microestructura en las 4 zonas, así como el cambio de la dureza en toda la probeta y como influyeron los parámetros de soldadura en la prueba de tracción.

Para realizar dicha comparación también nos basaremos en las tablas 8 y 9, las cuales muestran el promedio de durezas Rockwell B, el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de ruptura, y el porcentaje de elongación de las probetas de metal idéntico y las de metal distinto.

**TABLA 8 .- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA Y TRACCION PARA LA UNION ACERO 1018 CON ACERO 1018.**

PROBETA	MATERIAL	DUREZA	ESFUERZO	ESFUERZO	ELONGACION
		Prom. RB	FLUENCIA	RUPTURA	
#			[MPa]	[MPa]	%
H	ACERO 1018	107.26	633.2	404.2	15.63
1	ACERO 1018	86.55	505.2	340	19.22
2	ACERO 1018	92.25	481.1	309.6	11.7
3	ACERO 1018	90.125	569.2	357.4	12.37
4	ACERO 1018	89.5	494.5	436.8	17.56
5	ACERO 1018	88.29166667	494.8	315.7	16.39
6	ACERO 1018	92	513.8	327.4	14.46

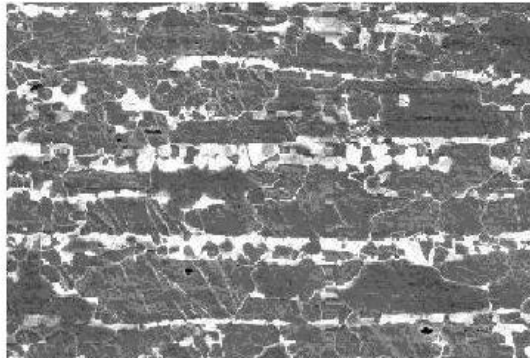
**TABLA 8.**

**TABLA 9 .- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA Y TRACCIÓN PARA LA UNIÓN ALUMINIO T6061 CON ACERO 1018.**

PROBETA	MATERIAL		ESFUERZO	ESFUERZO	ELONGACION
	DUREZA	DUREZA	FLUENCIA	RUPTURA	
#	Prom. Rb	Prom. Rb			%
	A	B	[MPa]	[MPa]	
	ALUMINIOT6061	ACERO 1018			
7	35.55	84.9	99.72	99.72	1.9
8	35.55	84.9	49.07	49.07	1.9

**TABLA 9.**

A continuación se muestra la imagen obtenida en la microscopia electrónica del material sin soldar (FIGURA 4.18).



**FIGURA 4.18 .- IMAGEN DE LA PROBETA H ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X.**

Donde se puede observar un bandeo en el material debido al rolado en frío al que fue sometido para su obtención; también se puede ver que el tamaño de grano es uniforme. La tabla de dureza Rockwell B para la probeta H se muestran en el apéndice A (FIGURA 7-A).

#### **PROBETA 1.**

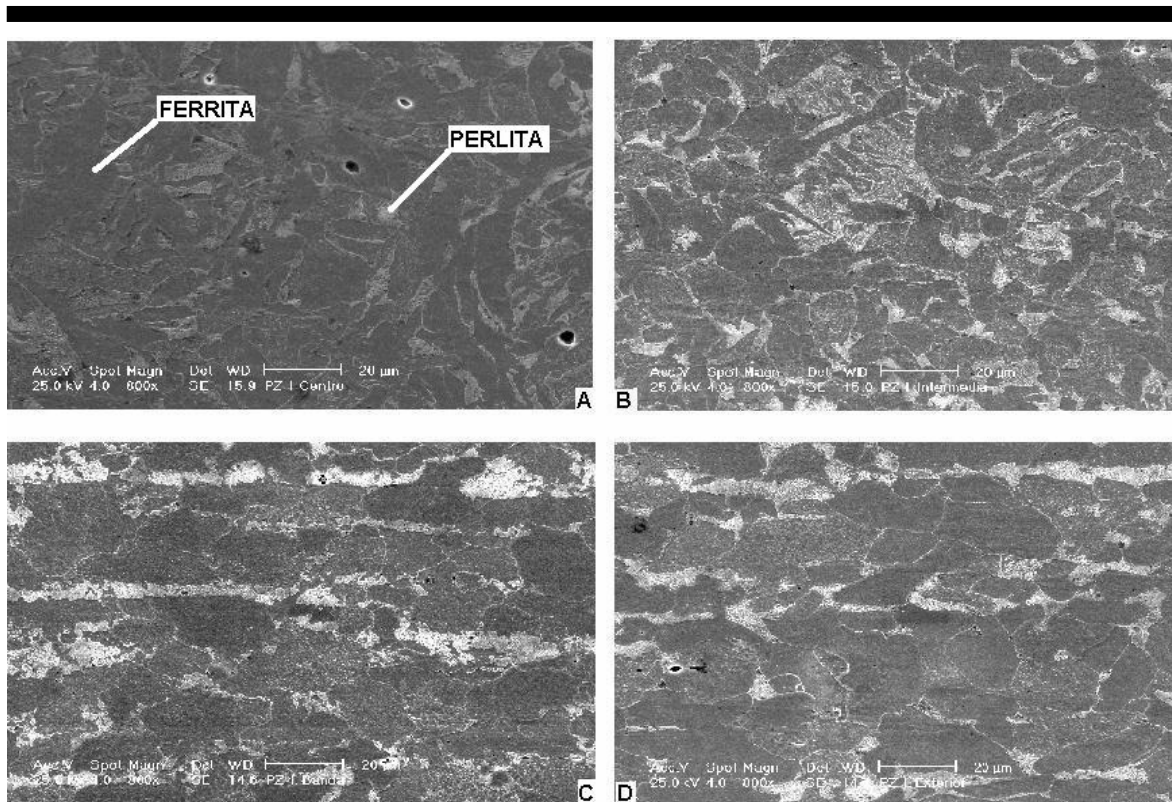
En la zona central, (FIGURA 4.19 (A)), se puede observar que se ha modificado la microestructura original del material comparándola con la microestructura de la probeta de acero 1018 sin soldar (FIGURA 4.18), ya que no se muestra ese bandeo característico del trabajo en frío que sufrió material al ser rolado en frío durante su fabricación.

En la zona media, (FIGURA 4.19 (B)), hay un rasgo muy ligero de ese bandeo, pero hay un cambio visible en la estructura que aparece debido al calentamiento que se generó durante el proceso de soldadura por fricción.

En la zona borde, (FIGURA 4.19 (C)), se puede ver que el bandeo característico del rolado en frío se mantiene, y ello nos lleva a la idea de que el calentamiento fue el causante de haber provocado un cambio en la microestructura original del material.

En la zona exterior, (FIGURA 4.19 (D)), el bandeo característico del trabajo en frío del material está intacto ya que esta zona no fue afectada por el calor.

En cuanto a la dureza existe poco cambio en toda la probeta que se puede asociar a que en las zonas borde y exterior se tiene un tamaño de grano semejante, mientras que en la zona media se notan rasgos de irregularidad en el tamaño de grano; solo en la zona central se ve que hay una irregularidad marcada en el tamaño de grano que pudo ser debido al calentamiento durante el proceso de soldadura y al efecto de la presión de forja. (FIGURA 1-A, anexo A).



**Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.**

**FIGURA 4.19 .- IMAGENES DE LA PROBETA 1 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X.**

## **PROBETA 2.**

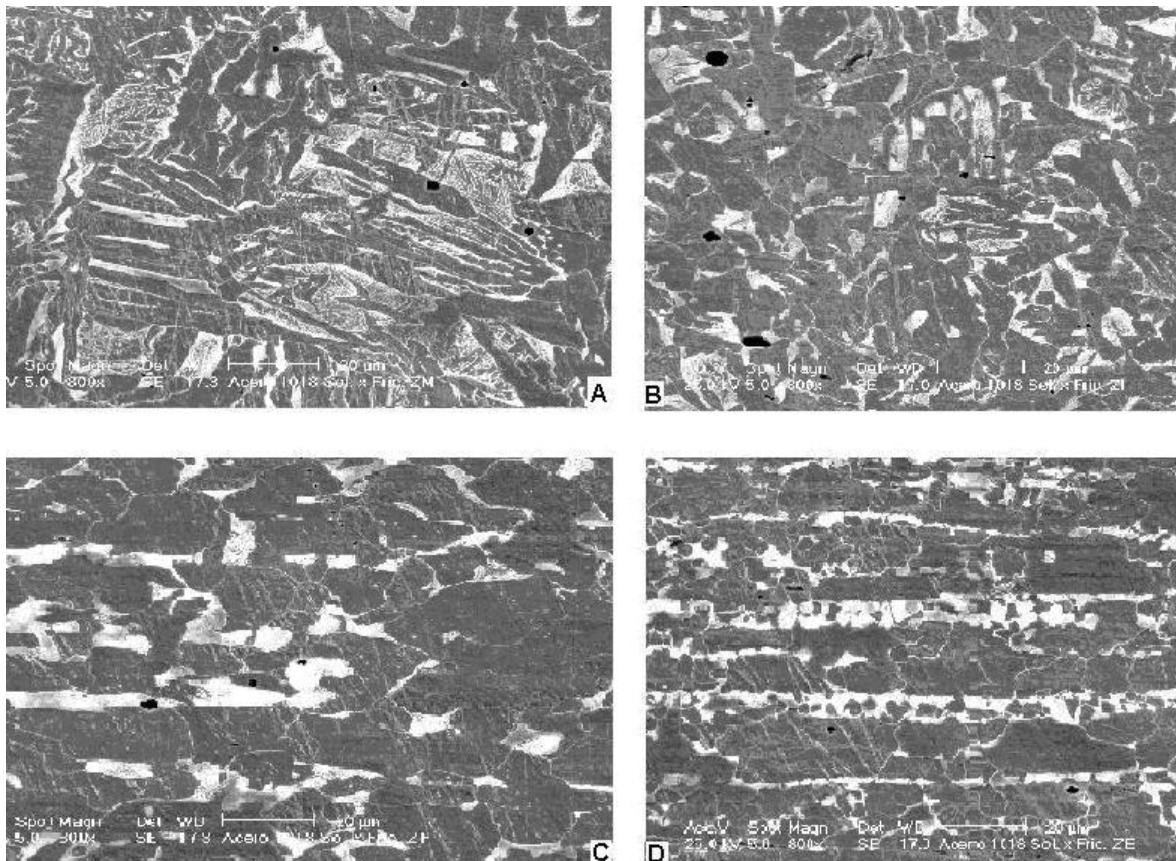
En la zona central, (FIGURA 4.20 (A)), también se ve que se ha modificado la microestructura original del material comparándola con la microestructura de la probeta de acero 1018 sin soldar (FIGURA 4.18). La microestructura en esta zona, muestra una serie de líneas en el interior de los granos que quizá puede asociarse con el proceso de solidificación y que vista esta zona a 1600x revela la presencia de zonas de perlita.

En la zona media, (FIGURA 4.20 (B)), parece haberse obtenido un cambio de una estructura bandeada a una estructura equiaxial con un tamaño de grano irregular.

En la zona borde, (FIGURA 4.20 (C)), se puede notar que en el bandeo característico del rolado en frío existe una separación marcada entre las bandas, lo cual puede asociarse al efecto de un ligero calentamiento provocado por la soldadura.

En la zona exterior, (FIGURA 4.20 (D)), el bandeo es más cerrado en cuanto a que la distancia entre bandas es menor.

La dureza parece homogénea pero con la diferencia mínima que en la parte central es un poco menor y conforme nos alejamos del centro hacia el exterior crece un poco. (FIGURA 2-A, anexo A).



(A) Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.

**FIGURA 4.20 .- IMAGEN DE LA PROBETA 2 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X.**

### PROBETA 3.

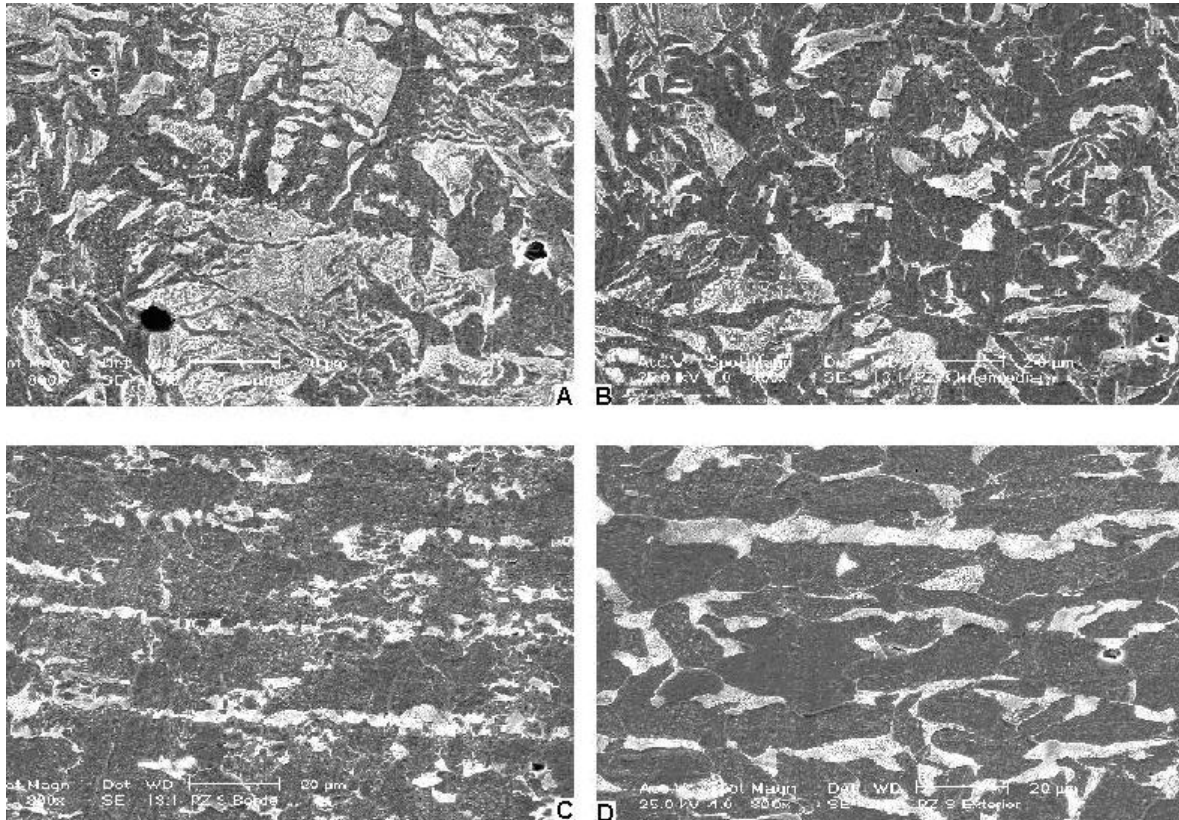
En la zona central, (FIGURA 4.21 (A)), se muestra que se ha modificado la microestructura, ya que aparecen zonas de perlita, lo cual parece que pudiera estar ligado a una redistribución del carbono, el tamaño de grano es irregular por la zonas cargadas de carbono y parece que no están muy bien delimitados los granos.

En la zona intermedia, (FIGURA 4.21 (B)), se puede ver que las zonas concentradas de carbono son un poco menores, pero empieza a generarse un delimitación de granos aunque todavía de una manera irregular de estos.

En la zona borde, (FIGURA 4.21 (C)), se observa el bandeo característico del material trabajado en frío, pero el tamaño de grano esta más delimitado y un poco más regular.

En la zona exterior, (FIGURA 4.21 (D)), el bandeo se sigue conservando y el tamaño de grano es más grande y mejor delimitado que en las zonas anteriores.

Hay un poco más de variación en la dureza y quizá tenga que ver con la redistribución del carbono. (FIGURA 3-A, anexo A).



(A) Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.

**FIGURA 4.21 .- IMAGEN DE LA PROBETA 3 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X.**

#### **PROBETA 4.**

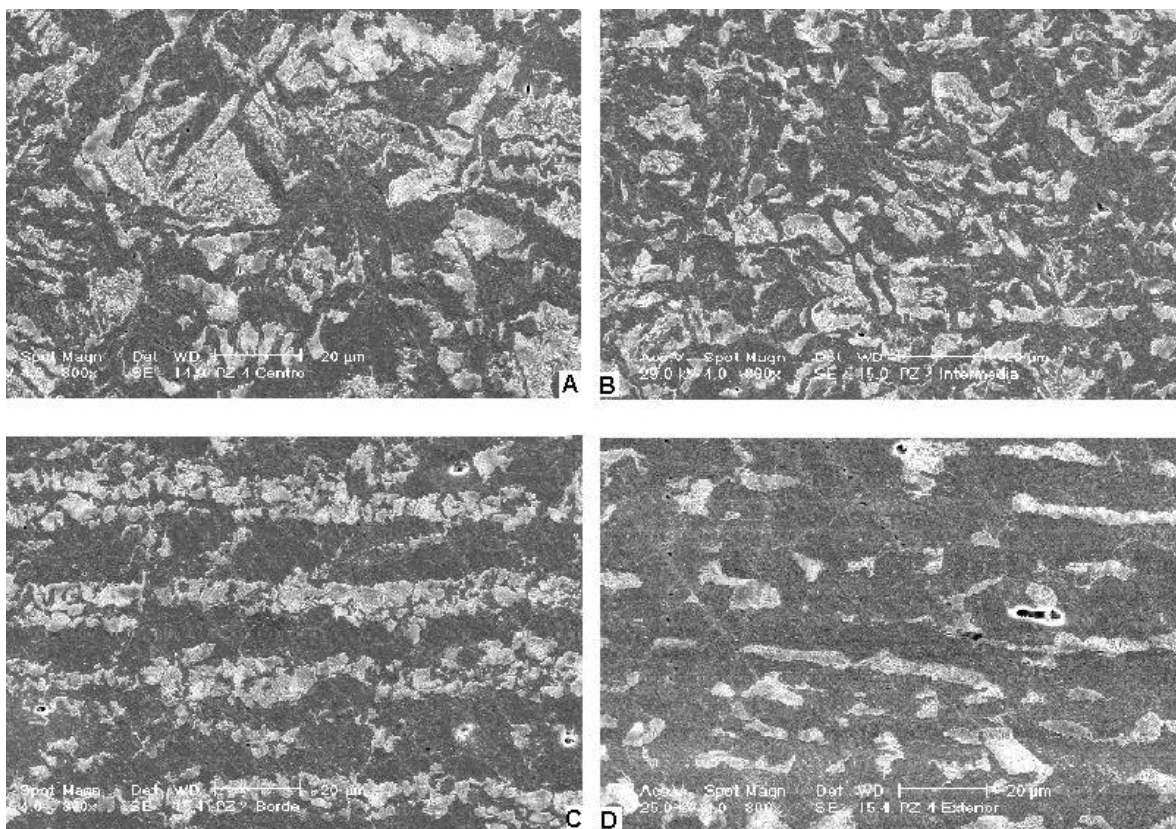
En la zona central, (FIGURA 4.22 (A)), también parece que hay una redistribución del carbono ya que hay zonas cargadas con más carbono y además el tamaño de grano no parece estar delimitado debido a esa redistribución.

En la zona media, (FIGURA 4.22 (B)), parece que hay rasgos de delimitación del tamaño de grano, pero es muy ligera. La distribución del carbono parece estar un poco más uniforme que en la zona central.

En la zona borde, (FIGURA 4.22 (C)), se sigue conservando el bandeo característico del trabajo en frío aunque las bandas de carbono parecen ser un poco más anchas. Empieza a notarse que el tamaño de grano está más delimitado.

En la zona exterior, (FIGURA 4.22 (D)), el bandeo existe pero un poco más uniforme ya que el ancho de las bandas de carbono es un poco más delgadas que las de la zona borde. El tamaño de grano está mejor delimitado.

En cuanto a la dureza, ésta es ligeramente mayor hacia las zonas exteriores de la pieza que en las zonas interiores y puede que se deba al trabajo en frío del material. (FIGURA 4-A, anexo A).



(A) Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.

**FIGURA 4.22 .- IMAGEN DE LA PROBETA 4 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO A 800 X.**

#### **PROBETA 5.**

En la zona central, (FIGURA 4.23 (A)), como se esperaba, hay cambio de microestructura en cuanto a la desaparición del bandeo. Las concentraciones de carbono son más ligeras en comparación con las probetas 3, (FIGURA 4.21 (A)), y 4, (FIGURA 4.22 (A)); existe una delimitación del tamaño de grano pero este



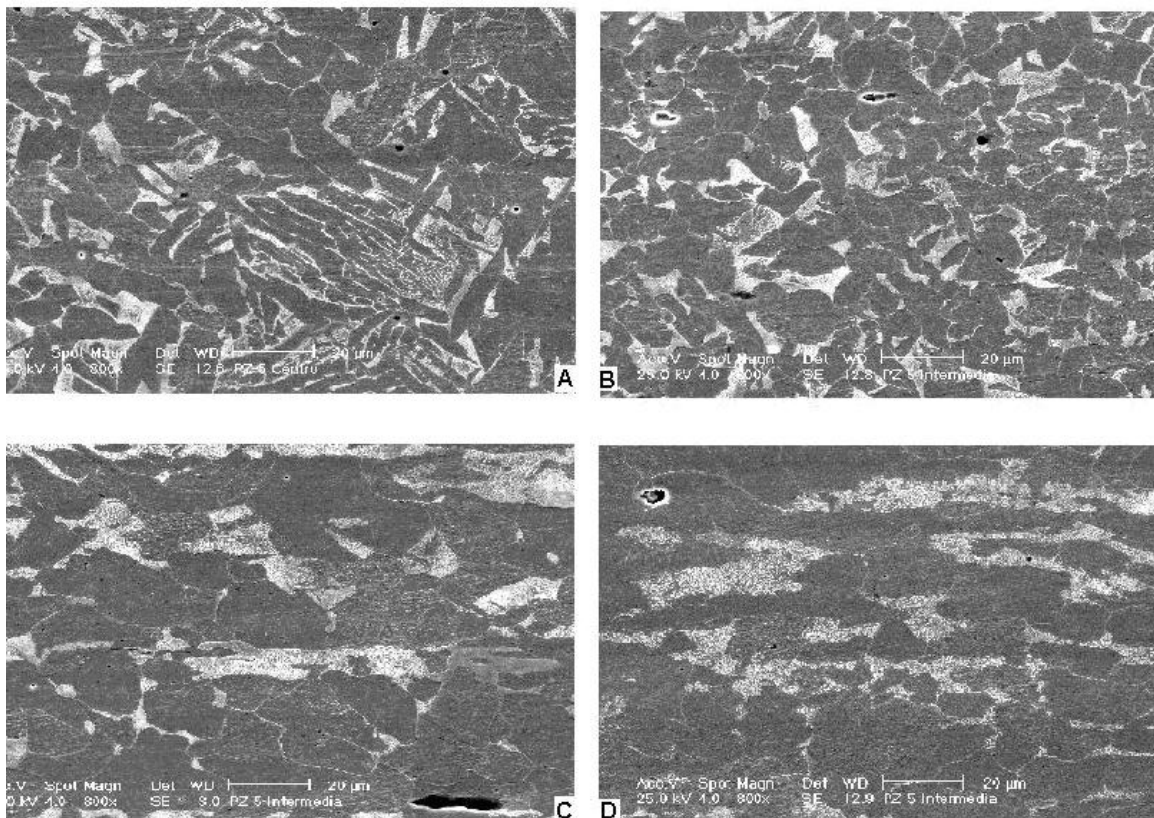
todavía es irregular y se pueden ver los granos deformados debido al calentamiento y a la presión.

En la zona media, (FIGURA 4.23 (B)), existe una mejor delimitación del tamaño de grano, ya no es tan irregular y las zonas de contenido de carbono son un poco menores.

En la zona borde, (FIGURA 4.23 (C)), el bandeo se ve entrecortado y el contenido de carbono es muy variable entre banda y banda. El tamaño de grano se ve mejor delimitado que en las zonas anteriores y el tamaño de grano es un poco más uniforme.

En la zona exterior, (FIGURA 4.23 (D)), el bandeo se conserva y se ven algunas bandas más cargadas de carbono, aunque existe un poco de discontinuidad en estas. El tamaño de grano se ve más uniforme y mejor delimitado.

En cuanto a la dureza casi no se nota una variación considerable, desde las zonas centrales hasta las exteriores, como con en las anteriores probetas. (FIGURA 5-A, anexo A). Todo indica que las condiciones de experimentación originan poco cambio (excepto en el centro) en la microestructura de toda la probeta.



(A) Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.

**FIGURA 4.23 .- IMAGEN DE LA PROBETA 5 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X .**

## PROBETA 6.

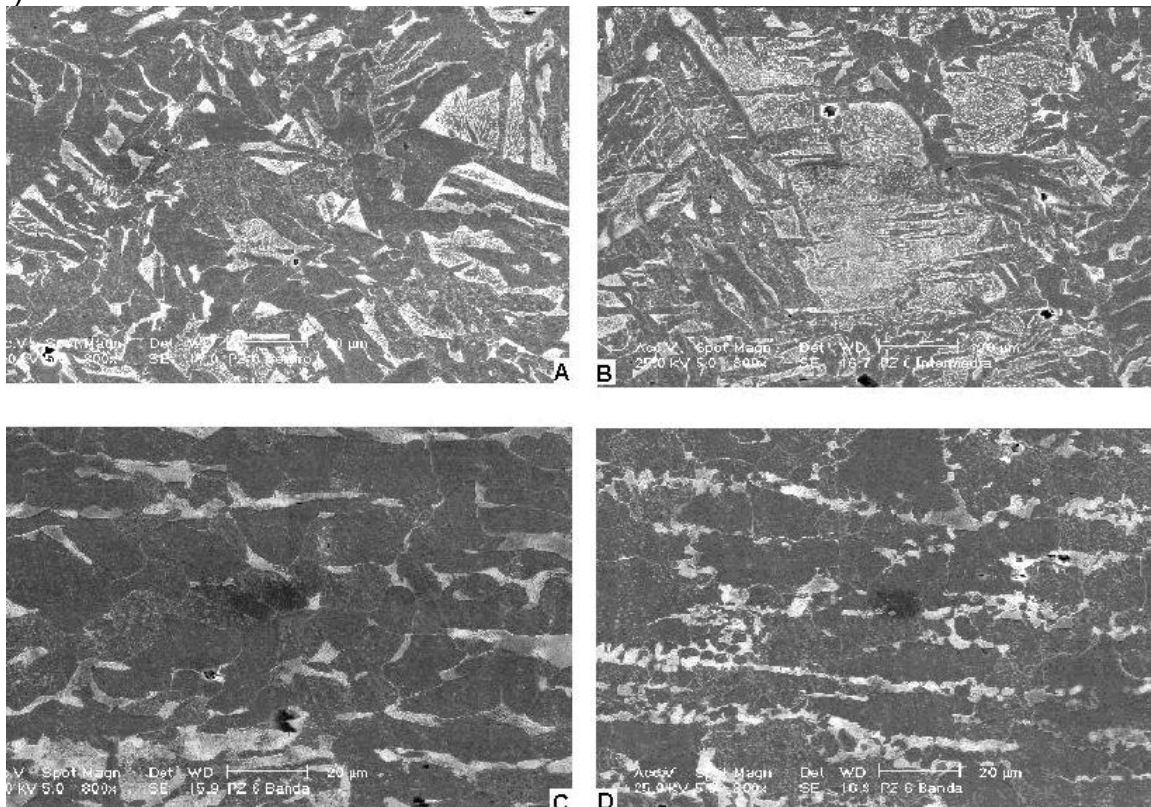
En la zona central, (FIGURA 4.24 (A)), se ven zonas concentradas de carbono y estas son más ligeras que las de las probetas 3, (FIGURA 4.21 (A)), y 4, (FIGURA 4.22 (A)). Los granos se ven delimitados pero deformados.

En la zona media, (FIGURA 4.24 (B)), el tamaño de grano se ve más equiaxial y menos deformado debido a un calentamiento mayor. Hay zonas grandes cargadas de perlita.

En la zona borde, (FIGURA 4.24 (C)), el bandeo es mas uniforme y el contenido de carbono en las bandas también lo es. El tamaño de grano se ve más delimitado y no tan deformado.

En la zona exterior, (FIGURA 4.24 (D)), el bandeo es igual de uniforme que en la zona borde, y el tamaño de grano se ve mejor delimitado y ya no deformado.

En cuanto a la dureza se puede analizar que entre las zonas media y borde se concentro más el carbono que en las zonas central y exterior. (FIGURA 6-A, anexo A).



(A) Zona central, (B) Zona media, (C) Zona borde, (D) Zona exterior.

**FIGURA 4.24 .- IMAGEN DE LA PROBETA 6 ATACADA CON NITAL 3% Y OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 800 X.**



---

En lo que respecta a la tabla 5 y las graficas de tracción de las probetas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, (anexo B FIGURAS 1-B hasta 14-B), de material idéntico, se puede ver que una presión de calentamiento arriba de las 2 ton, dio como resultado resistencias más elevadas, y que presiones de calentamiento bajas (2 ton), generan valores ligeramente mayores de 400 MPa pero menores de 500 MPa.

En las probetas 3 y 4, que corresponden a las presiones de calentamiento más altas, se muestra una ductilidad ligeramente menor. Para las presiones de calentamiento de 2 ton, las variaciones producidas por los diversos tiempos, fueron de poca relevancia.

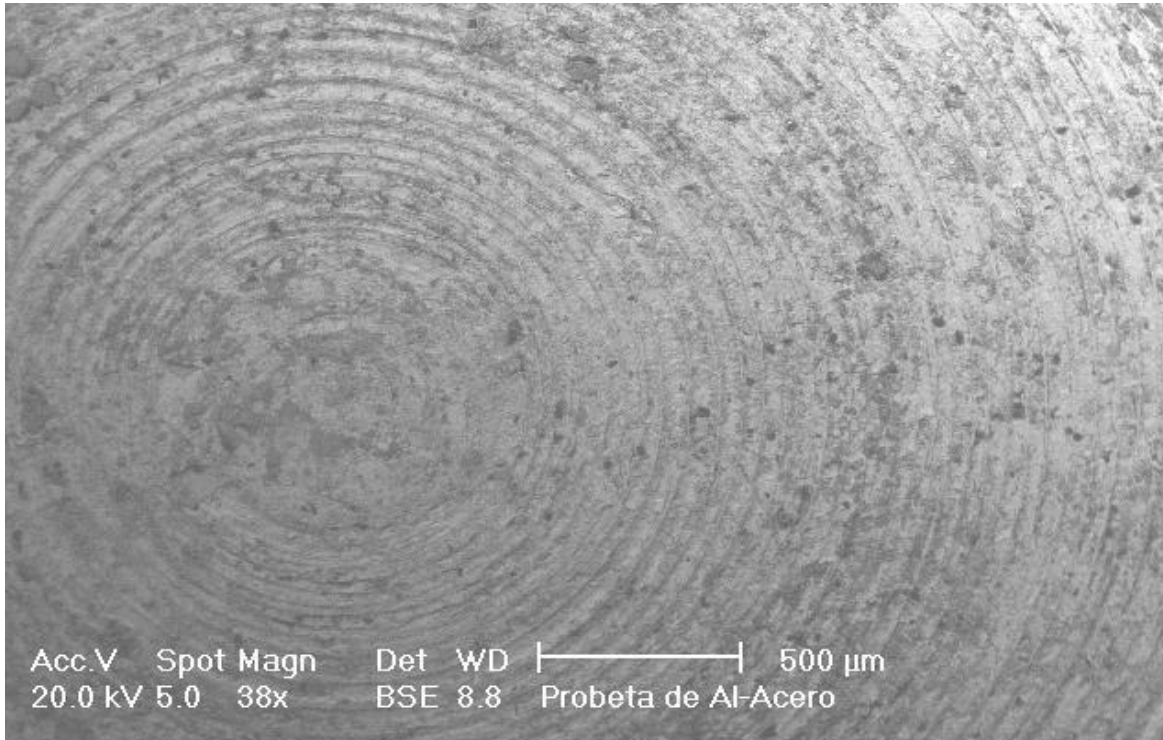
En ningún caso se alcanzan los valores de resistencia de la probeta de acero 1018 sin soldar, pero se considera que es aceptable la resistencia de la unión de cada una de las probetas, pues es cercana al valor del esfuerzo del acero.

Para las probetas de tracción aluminio T6061 con acero 1018, se tomaron fotografías de la zona de ruptura, la cual se dio en la unión de los dos metales, con la finalidad de poder analizar la zona y ver cual fue el resultado.

## **PROBETAS 7 Y 8.**

Para las probetas de aluminio T6061 con acero 1018, puesto que al aplicarles el ensayo de tracción, (FIGURAS 15-B, 16-B, 17-B y 18-B, ANEXO B), la ruptura de estas se dio en el centro de la unión, esto nos quiere decir que la soldadura no fue buena, que solamente se logro pegar los metales; que la zona de mezclado es demasiado pequeña, ya que se tomaron imágenes de la parte donde se despegaron lo metales, y se puede analizar que las zonas donde se adhirió el metal más suave en el más duro, fue en las líneas que dejo la herramienta de corte durante la operación de refrentado al preparar las piezas para el proceso de soldadura.

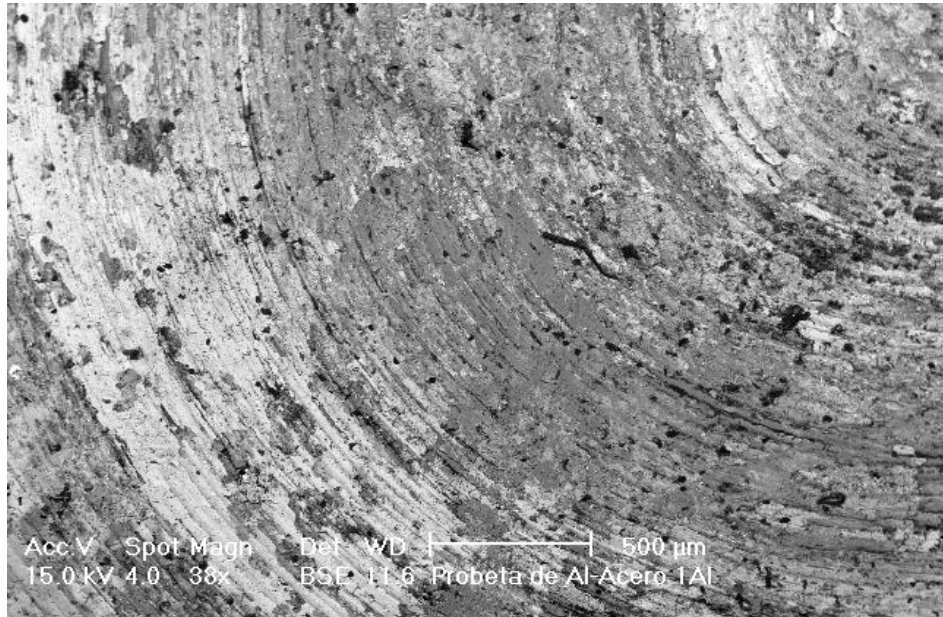
Como se puede ver, (FIGURA 4.24), del lado del acero, las pequeñas zonas de mezcla en cada una de estas probetas no representan más que cerca del 10 % de la superficie de unión, aunque esto no quiere decir que no hubo difusión entre los materiales, sino que esta difusión fue mínima en comparación con las probetas de metales idénticos.



**FIGURA 4.25 .- IMAGEN DE LA PROBETA ALUMINIO 6061 T6 CON ACERO 1018 OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 38 X (LADO DEL ACERO).**

También se puede observar, (FIGURA 4.25), que del lado del aluminio hubo más rastros de acero, esto nos quiere decir que solamente hubo inclusiones de acero en el aluminio, que realmente también hubo pequeñas zonas de mezclado de este lado.

Con respecto al ensayo de dureza Rockwell B aplicado a esta probeta (FIGURA 14-A), como se esperaba la dureza de ambos materiales fue menor, cerca de la soldadura, que en los extremos.



**FIGURA 4.25 .- IMAGEN DE LA PROBETA ALUMINIO 6061 T6 CON ACERO 1018 OBTENIDA POR EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIADO A 38 X (LADO DEL ALUMINIO).**

---

# CONCLUSIONES.

Con el desarrollo de la presente tesis podemos llegar a las siguientes conclusiones:

En cuanto a las dimensiones de las piezas a soldar, vimos que la conicidad hecha en las caras de las piezas ayudó a minimizar la vibración durante el proceso con la ventaja de lograr la expulsión de material del centro hacia afuera de las piezas, sacando el material al inicio del proceso y eliminando la escoria de la unión.

Con respecto a la unión del acero 1018, logramos la unión con 1200 rpm siendo esta la velocidad máxima que entrega el torno y que en comparación con la velocidad óptima para logra la unión de un acero 1018 con este proceso se requieren 4600 rpm, (TABLA 1), y esto nos permite aportar información sobre los parámetros utilizados durante el proceso y en concluir que la velocidad esta en función con la presión ya que si tenemos una velocidad menor a 4600 rpm, aumentamos la presión de calentamiento y al contrario, con una velocidad de 4600 utilizamos una presión menor; así también ocurre con el tiempo pues al tener mayor velocidad el tiempo de calentamiento es menor y al contrario al tener menos velocidad necesitamos más tiempo de calentamiento, por tanto el proceso se logra con éxito al variar estos parámetros que son los más importantes en este proceso.

Basándonos en los resultados de las pruebas de tracción realizadas a las probetas del acero podemos decir que, aunque la resistencia de la unión de estas es menor a la de una probeta de acero 1018 sin soldar, las soldaduras obtenidas son de buena calidad ya que los valores se encuentran cerca del 90% del valor del esfuerzo del acero 1018.

En general se puede concluir que la presión adecuada a las 3 y 4 dieron, en las pruebas de tracción, resultados cercanos a los del acero 1018 sin soldar, por lo tanto podemos decir que con esos valores de parámetros se pueden generar soldaduras con resistencia muy cercana a la del material sin soldar.

De los datos obtenidos del ensayo de tracción y de dureza podemos concluir, que al mantener más tiempo la presión durante el proceso, alarga el cinturón de calor a lo largo de la zonas de contacto y esto da como resultado una resistencia a la tracción 10 % menor a la del acero sin soldar ya que se altera la microestructura y se deforma por calentamiento lo que da también por resultado una ductilidad menor a la del material sin soldar; además de que para presiones de 2 ton las variaciones en los diversos tiempos fueron de poca relevancia, ya que estas probetas dieron curvas de tracción muy similares entre ellas.

---

Para la unión de metales distintos, tuvimos dificultad al realizar el proceso ya que, debido a la diferencia de temperaturas de fusión entre metales es demasiado grande.

No obstante se logró la unión precalentando con un soplete de acetileno a uno de los metales (acero 1018) para lograr dicha unión, pero comprobamos, por medio del ensayo de tracción, que la unión no fue de buena calidad, ya que la curva de tracción de estas probetas no rebasó el límite elástico, lo cual nos llevó a la conclusión de que solo logramos pegar el material; sin embargo se cumplió la expectativa de demostrar que la soldadura de aluminio con acero es una soldadura frágil.

Para este tipo de soldadura de materiales distintos se recomienda elevar la temperatura al metal con mayor punto de fusión ya que el material de menor punto, alcanza rápidamente un estado plástico y no da el tiempo necesario para que el material de mayor punto de fusión difunda en el de menor de allí la importancia de precalentar con un soplete la pieza de acero y asegurar que las dos piezas estén en estado plástico y puedan difundir.

Se concluye también que la utilización de acetileno para precalentar al acero es una muy buena opción para realizar este y otros procesos, pero representa un costo extra ya que quemamos combustible.

El equipo que se utilizó en este proceso puede ser desmontable y no puede perder su posición ya que tiene pernos guía que centran al dispositivo y todo esto ayuda a que en un futuro se pueda utilizar este equipo para realizar practicas de laboratorio en donde a los alumnos se les muestre otro tipo de proceso de unión de piezas y tengan otra perspectiva de la soldadura de materiales tanto idénticos como diferentes y todo esto ayude a su desarrollo profesional como ingenieros.

La soldadura por fricción para materiales idénticos puede realizarse con éxito en el dispositivo, ya que se pudo controlar la alineación axial de las piezas con las mejoras realizadas al equipo.

También se lograron soldaduras de mejor calidad con la adaptación de un freno, evitando desperdicio de material y cuidando la integridad mecánica del torno donde se implemento el dispositivo.

La implementación de los diferentes dispositivos al torno, se pudieron llevar a cabo mediante un costo relativamente bajo en comparación con el precio de una maquina de soldadura por fricción comercial; además dichas mejoras que se le hicieron al dispositivo, fueron fáciles de realizar y se realizaron mediante procesos de manufactura como el torneado, fresado, cepillado, soldadura eléctrica, oxicorte, ajuste de banco y rectificado.

---

# SUGERENCIAS.

La aplicación en la unión de metales diferentes se tendrá que analizar de manera más detallada, para poder realizarla en el dispositivo mejorado, ya que no se pudo lograr una soldadura confiable de este tipo.

Algunas mejoras que se pueden realizar en la implementación del proceso son:

- Contar con un mejor dispositivo hidráulico automatizado para poder controlar la presión en la etapa de forjado, ya que el sistema hidráulico actual es manual y es difícil poder controlar la aplicación de la carga.
- En lo que respecta a la unión de materiales diferentes, se recomienda tener un mejor control de los parámetros, esto se da a través de analizar la manera de cómo variar los puntos de fusión de los materiales, ya sea aplicando tratamientos térmicos a los metales antes del proceso de soldadura. También se pueden usar tratamientos térmicos después del proceso para ver si se pueden mejorar las propiedades mecánicas de las soldaduras obtenidas.
- Implementar un dispositivo que pueda medir la temperatura que se obtiene en las piezas durante el proceso de soldadura, para saber como afecta la temperatura en las propiedades físicas y metalúrgicas de la soldadura.
- Controlar con algún dispositivo los tiempos del proceso, ya que lo hicimos de manera manual con un cronómetro, y el tiempo es un parámetro importante en el proceso de soldadura por fricción.
- Todo esto nos lleva a sugerir la automatización del equipo, esto para poder realizar el proceso en mucho mejor condición ya que programando este dispositivo se pueden variar muchos parámetros que para nosotros fueron muy difíciles de controlar así como poder tomar el tiempo del proceso y programarlo en etapas.

---

# BIBLIOGRAFIA.

1. Henry Horwitz, P.E. .- Soldadura: aplicaciones y práctica Editorial AlfaOmega, Massachussets E.U.A.
2. Howard B. Cary .- Manual de Soldadura Moderna – Tomo 1 2ª edición Editorial Prentice Hill Hispanoamericana. México.
3. Amsted B. H. .- Procesos de Manufactura. Editorial Continental.
4. American Welding Society, Recomended Practices for Friction Welding. ANSI /AWS An American National Standard.
5. Jessop, T.J., Nicholas, e.d., and dinsdale, W.O. Friction Welding of Dissimilar Materials, in Advances in Welding Processes. 1978. Harrogtá, UK: The Welding Institute.
6. Leonard Koellhoffer.- Manual de Soldadura. Editorial Limusa.
7. ASM.- Metals Handbook Nonferrous Alloys and Special-Prupose. Vol. 2,1990.
8. Melvin M. Schwartz .- Source Book on innovative welding processes. A.S.M., E.U.A.
9. ASM .- Source: Metals Hand Book, 8<sup>th</sup> Ed, Vol. 6.
10. Melvin M. Schwartz .- Metals Joining Manual Editorial McGraw-Hill, E.U.A.

---

11. Callister D. William .- Ciencia e Ingeniería de los Materiales Editorial Reverté S. A., España.

12. Irons, Steels and High-Performance Alloys Metal Handbook, part II.

13. Donald R. Askeland .- Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial International Thomson Editores, México.

14. Lawrence H. Van Vlack .- Materiales para Ingeniería. Editorial Continental, México.

**Referencias electrónicas:**

[http:// www.aws.org](http://www.aws.org)

[http:// www.historywelding.org](http://www.historywelding.org)

<http://www.analitica.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1.html>

[http:// www.etatechnology.com/index.html](http://www.etatechnology.com/index.html)

<http://www.welding.org>.

<http://www.interfacewelding.com>

<http://www.nctfrictionwelding.com/index>

<http://www.historywelding.org>.





# APENDICES

# APENDICE A

## GRAFICAS DE DUREZA ROCKWELL B PARA PROBETAS SOLDADAS ACERO 1018 CON ACERO1018.

LECT. P. 1	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	4	97.5
2	4	98.5
3	4	93
4	4	84.5
5	3	83
6	3	82.5
7	3	81.5
8	3	84.5
9	3	84.5
10	3	76
11	3	75.5
12	3	76
13	3	78
14	3	80
15	3	89.5
16	4	97.5

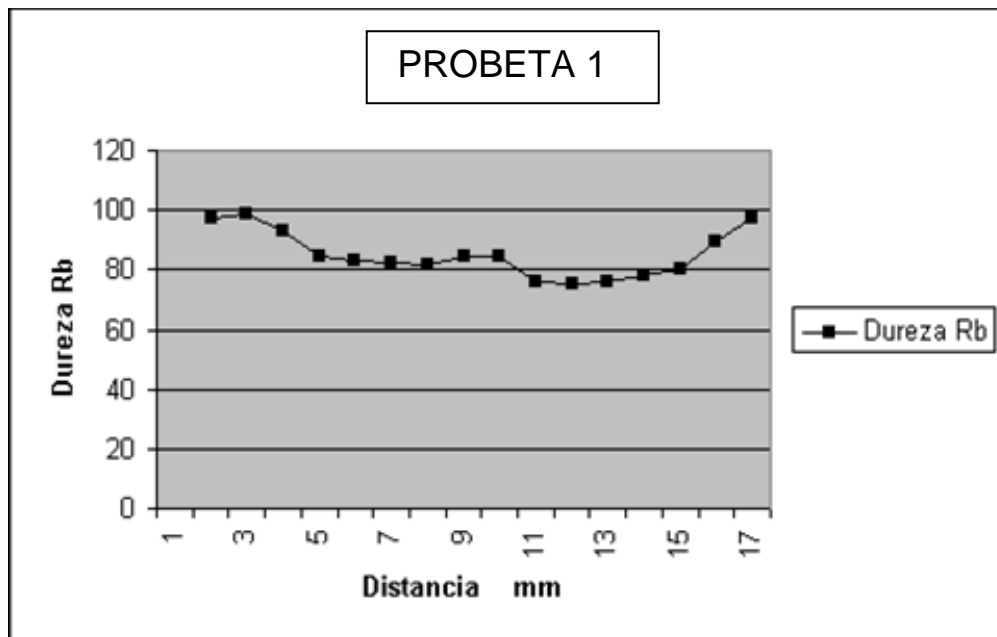
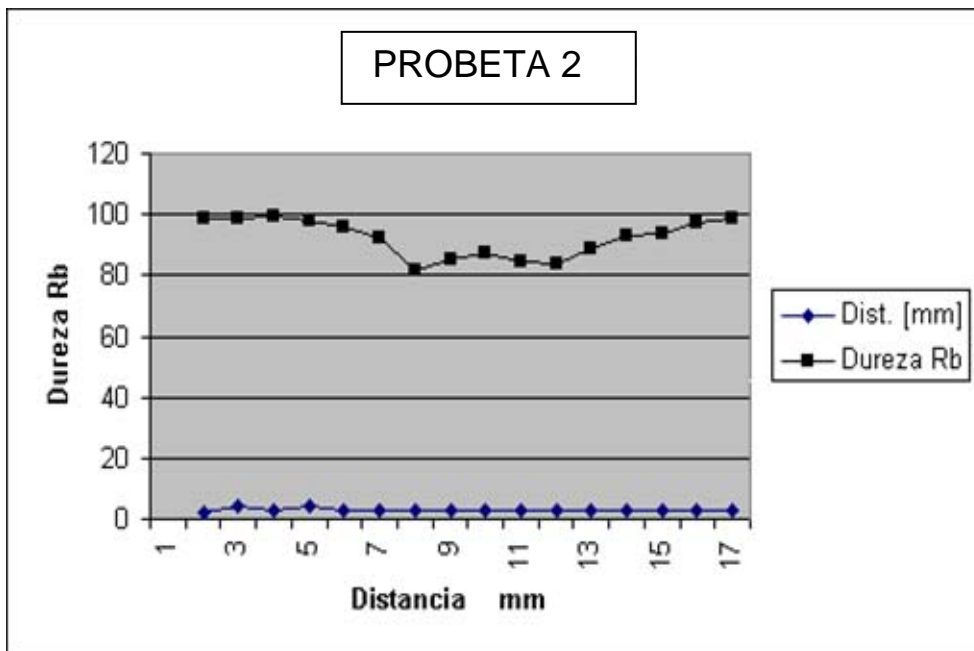


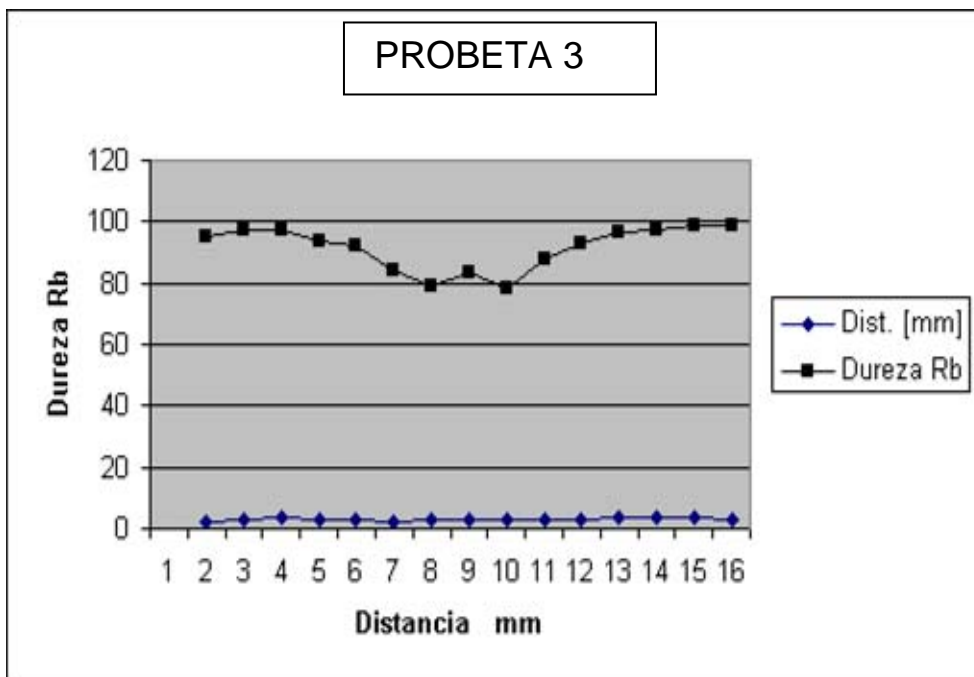
FIGURA 1-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 1.

LECT. P. 2	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	2	99
2	4	99
3	3	99.5
4	4	98
5	3	96
6	3	92.5
7	3	82
8	3	85
9	3	87
10	3	84.5
11	3	84
12	3	89
13	3	93
14	3	93.5
15	3	97.5
16	3	99



**FIGURA 2-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 2.**

LECT. P. 3	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	2	95
2	3	97
3	4	97
4	3	93.5
5	3	92
6	2	84
7	3	79
8	3	83.5
9	3	78
10	3	87.5
11	3	93
12	4	96.5
13	4	97.5
14	4	99
15	3	99



**FIGURA 3-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 3.**

LECT. P. 4	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	4	99.5
2	3	97.5
3	3	95.5
4	3	91
5	3	93
6	3	82
7	3	81.5
8	3	85
9	3	83.5
10	3	84.5
11	3	91.5
12	3	95
13	3	95
14	3	94
15	4	99.5
16	3	90.5

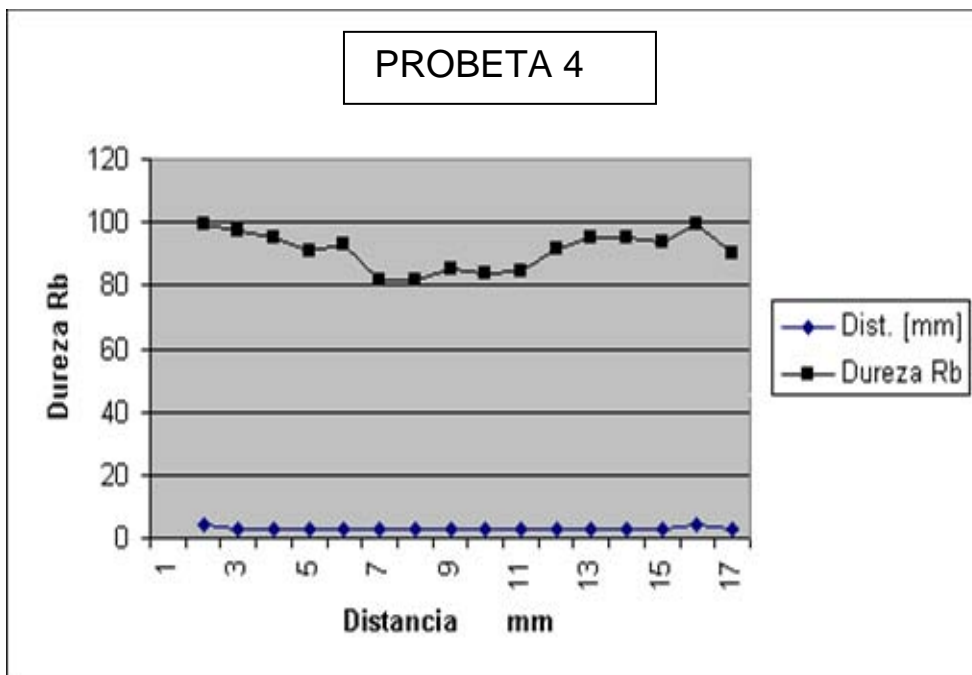
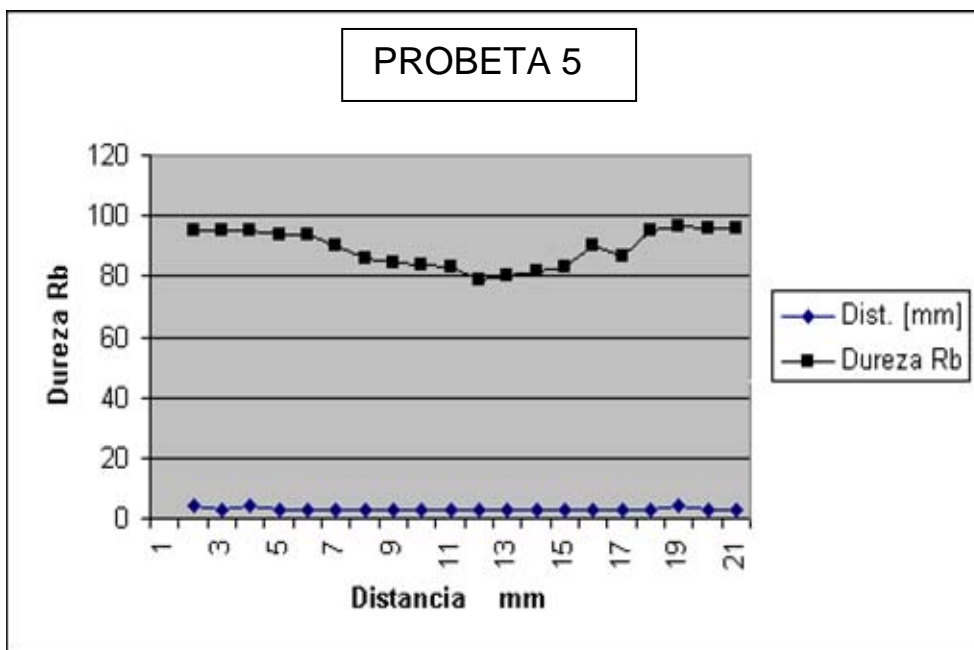


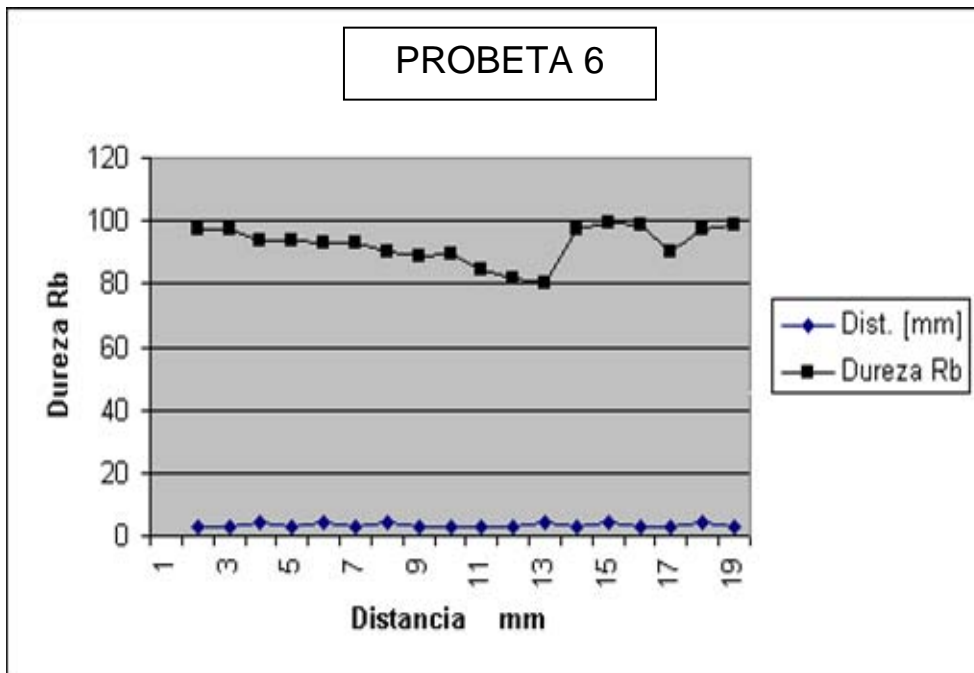
FIGURA 4-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 4.

LECT. P. 5	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	4	95
2	3	95.5
3	4	95
4	3	94
5	3	93.5
6	3	90
7	3	86
8	3	84.5
9	3	84
10	3	83
11	3	79
12	3	80
13	3	81.5
14	3	83
15	3	90
16	3	86.5
17	3	95.5
18	4	96.5
19	3	96
20	3	96



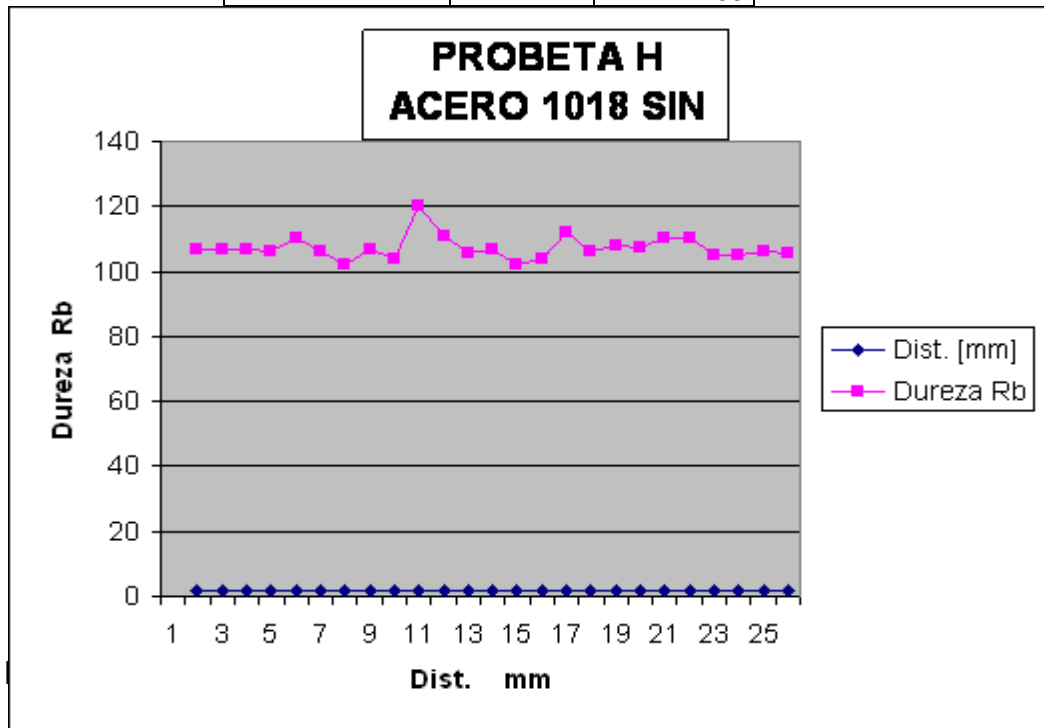
**FIGURA 5-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 5.**

LECT. P. 6	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	3	97
2	3	97
3	4	93.5
4	3	93.5
5	4	93
6	3	93
7	4	90.5
8	3	88.5
9	3	89.5
10	3	84.5
11	3	82
12	4	80
13	3	97
14	4	99.5
15	3	99
16	3	90
17	4	97
18	3	99



**FIGURA 6-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 6.**

LECT. P. H.	Dist. [mm]	Dureza Rb
1	2	107
2	2	107
3	2	107
4	2	106
5	2	110
6	2	106
7	2	102
8	2	107
9	2	104
10	2	120
11	2	111
12	2	105.5
13	2	107
14	2	102
15	2	104
16	2	112
17	2	106
18	2	108
19	2	107.5
20	2	110.5
21	2	110.5
22	2	105



**GRAFICA DE DUREZA ROCKWELL B PARA PROBETA SOLDADA  
ALUMINIO T6061 CON ACERO 1018.**



Material	Distancia [mm]	Dureza [RB]	Material	Distancia [mm]	Dureza [RB]
Acero	3	88.1	Aluminio	81	16.4
Acero	6	90.3	Aluminio	84	21.5
Acero	9	89.9	Aluminio	87	23.4
Acero	12	91.8	Aluminio	90	25.4
Acero	15	91.7	Aluminio	93	27.1
Acero	18	92.3	Aluminio	96	39.2
Acero	21	93.1	Aluminio	99	40.7
Acero	24	92.2	Aluminio	102	44.4
Acero	27	91	Aluminio	105	48.4
Acero	30	91.9	Aluminio	108	44.4
Acero	33	91.3	Aluminio	111	48.4
Acero	36	94	Aluminio	114	47.3
Acero	39	96.3	Aluminio	117	47.3
Acero	42	94.3	Aluminio	120	46.6
Acero	45	91	Aluminio	123	48.2
Acero	48	94.4	Aluminio	126	48.9
Acero	51	92.6	Aluminio	129	55.2
Acero	54	90.9	Aluminio	132	53.1
Acero	57	84.7	Aluminio	135	54.6
Acero	60	83.8	Aluminio	138	52.2
Acero	63	80.3	Aluminio	141	53.9
Acero	66	81.3	Aluminio	144	55.6
Acero	69	79.8	Aluminio	147	55.5
Acero	72	81.7	Aluminio	150	54.8
Acero	75	80.4	Aluminio	153	54.1
Unión	78	40.3	Aluminio	156	54.5
			Aluminio	159	54.5

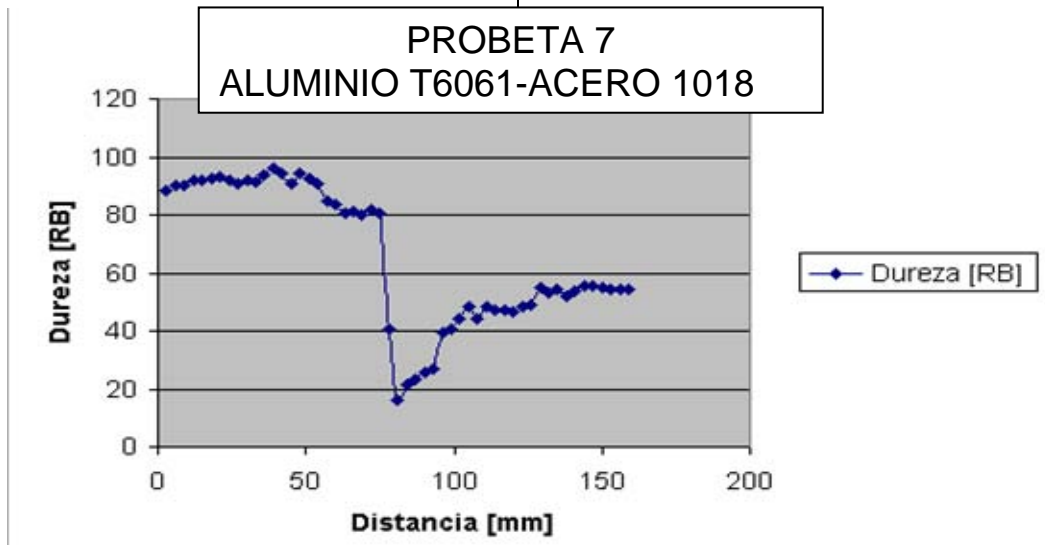


FIGURA 8-A TABLA DE DUREZA ROCKWELL B PROBETA 7.

# APENDICE B

## GRAFICAS DE ENSAYO DE TRACCION PARA LAS PROBETAS SOLDADAS ACERO 1018 CON ACERO 1018.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile Instron Corporation  
Operator name: Adolfo Altamirano M. Series IX Automated Materials Testing System 1.04  
Test Date: 03 Aug 2005  
Sample Identification: PROBETA6 Sample Type: ASTM  
Interface Type: 4200 Series  
Machine Parameters of test:  
Sample Rate (pts/sec): 10.00 Humidity (%): 50  
Crosshead Speed (mm/min): 5.000 Temperature (deg. C): 20

Dimensions:  
Spec. 1  
Diameter (mm) 9.0000  
Spec gauge len (mm) 54.000  
Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

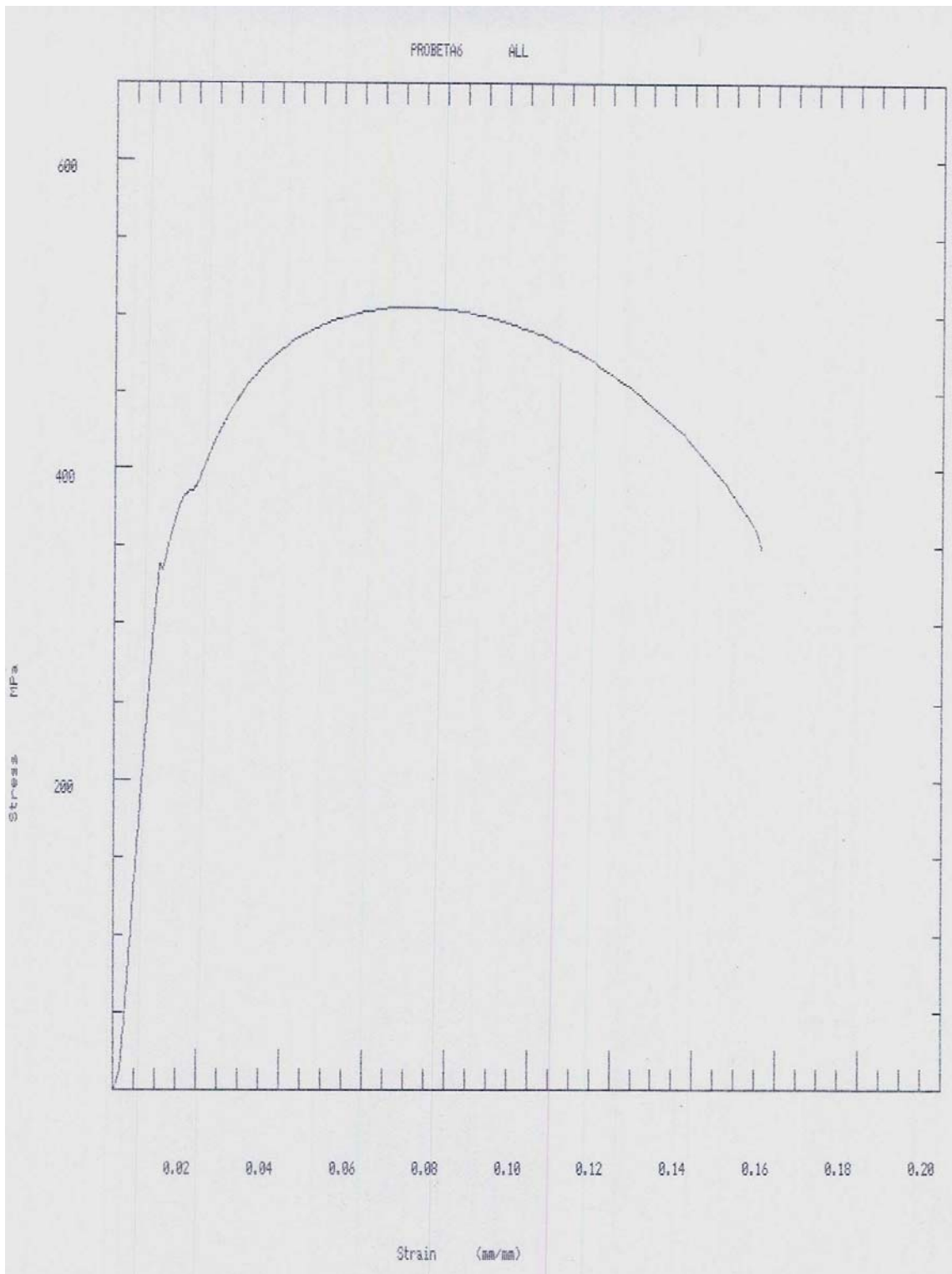
Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displacement at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displacement at 0.2% Yield (mm)
1	4.020	7.444	32.13	505.2	8.440	15.63	21.67	340.7	.6753
Mean:	4.020	7.444	32.13	505.2	8.440	15.63	21.67	340.7	.6753

Standard Deviation: -----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.251	22.00	345.9	37980.	7.729	235.1
Mean:	1.251	22.00	345.9	37980.	7.729	235.1

Standard Deviation: -----

FIGURA 1-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 1.



**FIGURA 2-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 1.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile

Instron Corporation

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Test Date: 03 Aug 2005

Sample Identification: PROBET10

Sample Type: ASTM

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00

Humidity (%): 50

Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Temperature (deg. C): 21

Dimensions:

Spec. 1

Diameter (mm) 9.0000

Spec gauge len (mm) 54.000

Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

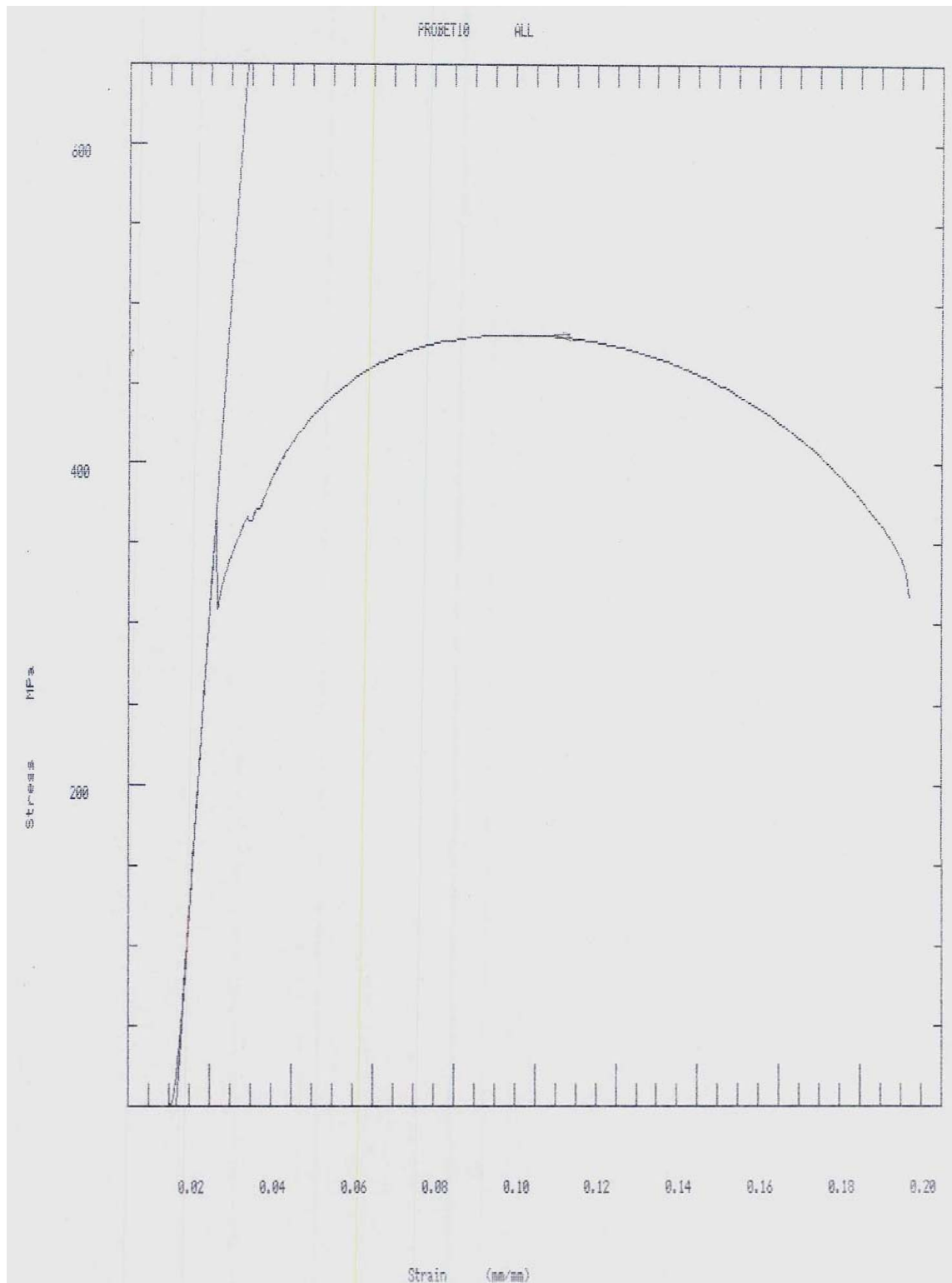
Specimen Number	Displcmnt at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcmnt at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcmnt at 0.2% Yield (mm)
1	5.200	9.630	30.60	481.1	10.38	19.22	19.69	309.6	1.190
Mean:	5.200	9.630	30.60	481.1	10.38	19.22	19.69	309.6	1.190

Standard Deviation: -----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	2.204	19.81	311.5	38130.	6.889	262.9
Mean:	2.204	19.81	311.5	38130.	6.889	262.9

Standard Deviation: -----

**FIGURA 3-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 2.**



**FIGURA 4-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 2.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile

Instron Corporation

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Test Date: 03 Aug 2005

Sample Identification: PROBETAS3

Sample Type: ASTM

Interface Type: 4200 Series

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00

Humidity (%): 50

Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Temperature (deg. C): 21

Dimensions:

Spec. 1

Diameter (mm) 9.0000

Spec gauge len (mm) 54.000

Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

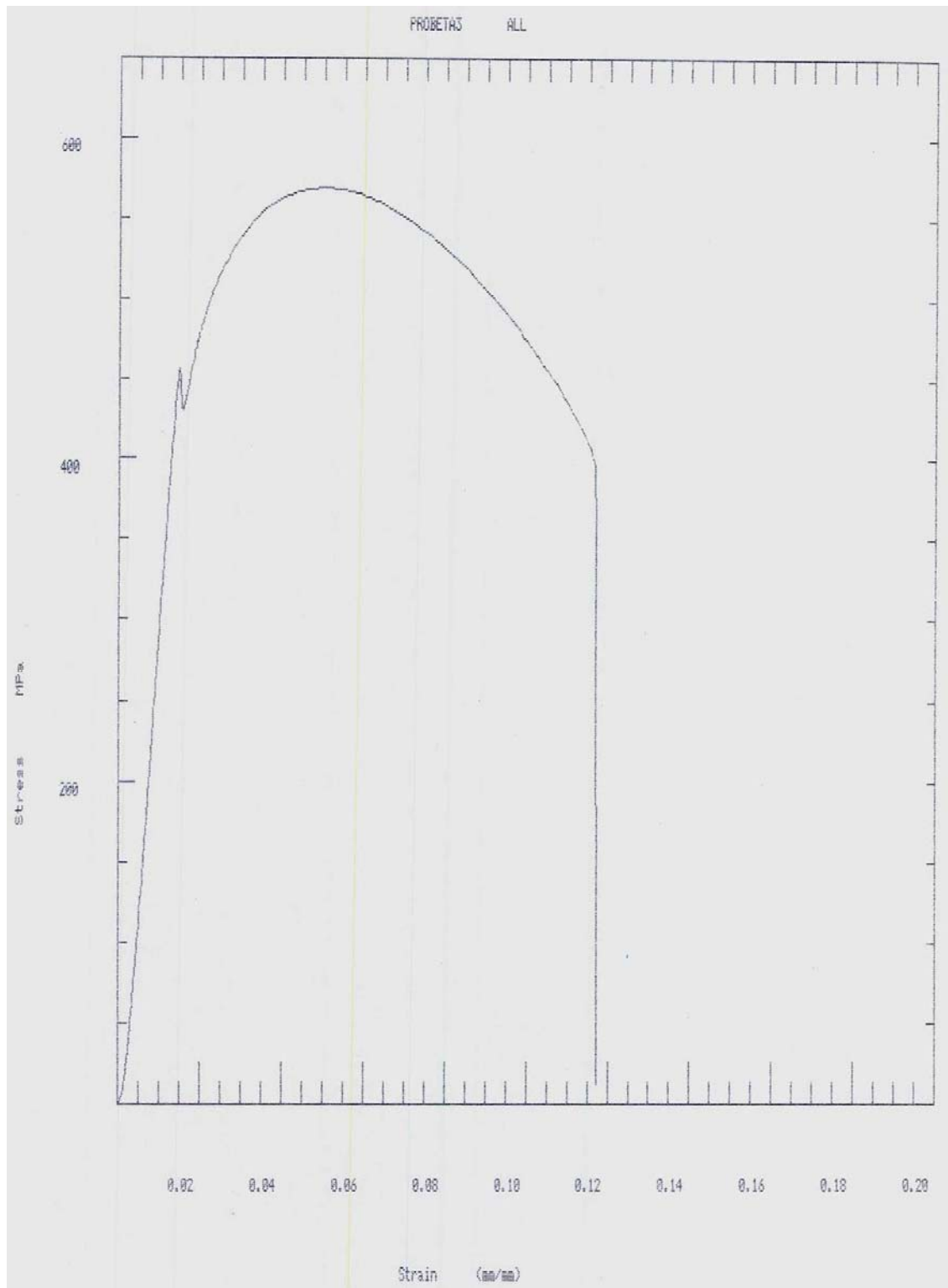
Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	2.820	5.222	36.20	569.2	6.320	11.70	22.73	357.4	.8483
Means:	2.820	5.222	36.20	569.2	6.320	11.70	22.73	357.4	.8483

Standard Deviation:

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.571	27.50	432.4	37120.	12.07	192.4
Means:	1.571	27.50	432.4	37120.	12.07	192.4

Standard Deviation:

**FIGURA 5-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 3.**



**FIGURA 6-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 3.**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: Adolfo Altamirano M.	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 03 Aug 2005
Sample Identification: PROBETAS	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 10.00	Humidity (%): 50
Crosshead Speed (mm/min): 5.000	Temperature (deg. C): 21

Dimensions: Spec. 1

Diameter (mm)	9.0000
Spec gauge len (mm)	54.000
Grip distance (mm)	45.000

Out of 1 specimens. 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	3.440	6.370	31.45	494.5	6.680	12.37	.2778	4.368	.6601
Mean:	3.440	6.370	31.45	494.5	6.680	12.37	.2778	4.368	.6601

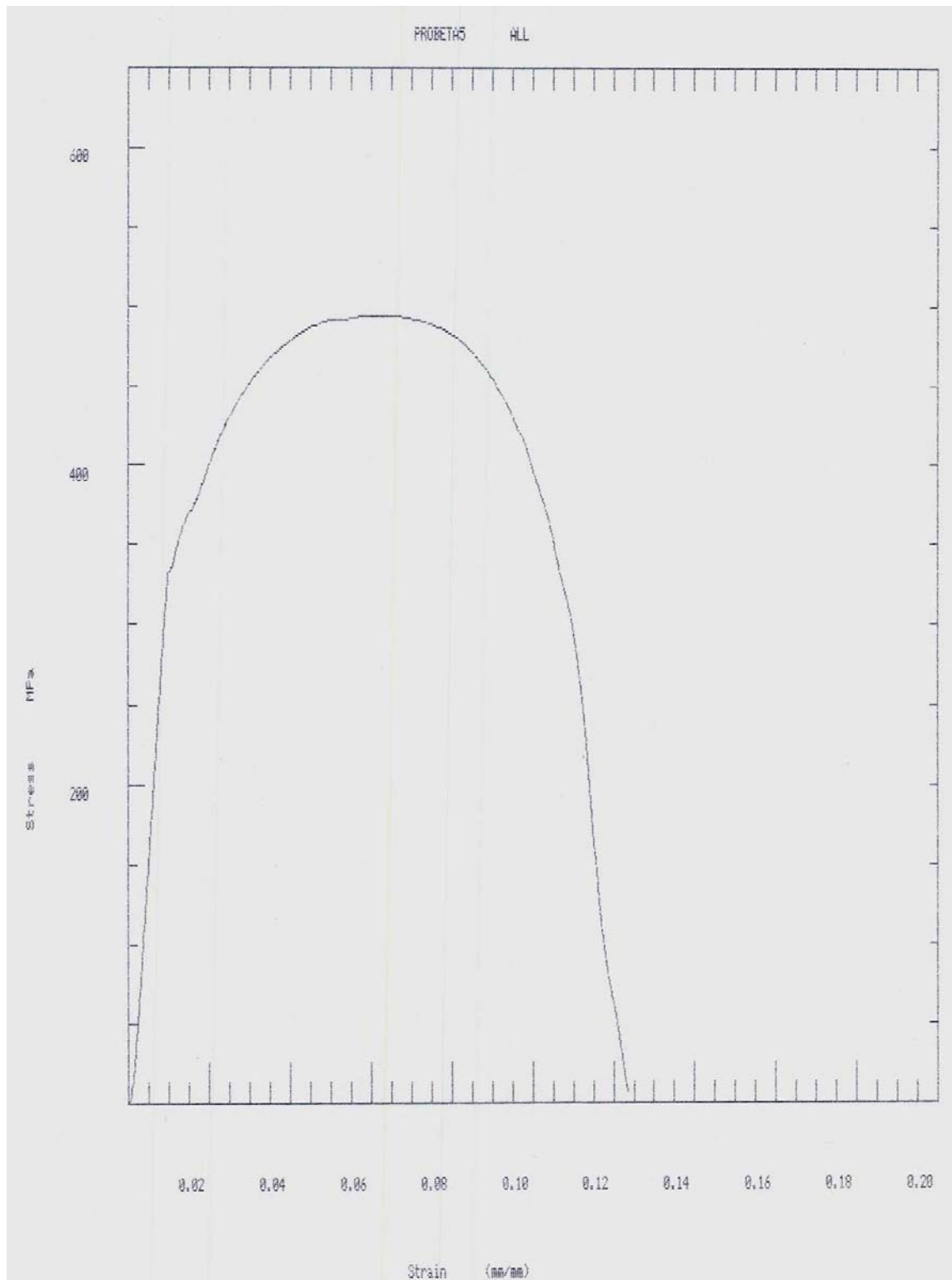
Standard Deviation: -----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.222	22.33	351.1	38760.	7.960	165.4
Mean:	1.222	22.33	351.1	38760.	7.960	165.4

Standard Deviation: -----

**FIGURA 7-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 4.**





**FIGURA 8-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 4.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: Adolfo Altamirano M.	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 03 Aug 2005
Sample Identification: PROBETA2	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 10.00	Humidity (%): 50
Crosshead Speed (mm/min): 5.000	Temperature (deg. C): 21

Dimensions:

Spec. 1

Diameter (mm) 9.0000

Spec gauge len (mm) 54.000

Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

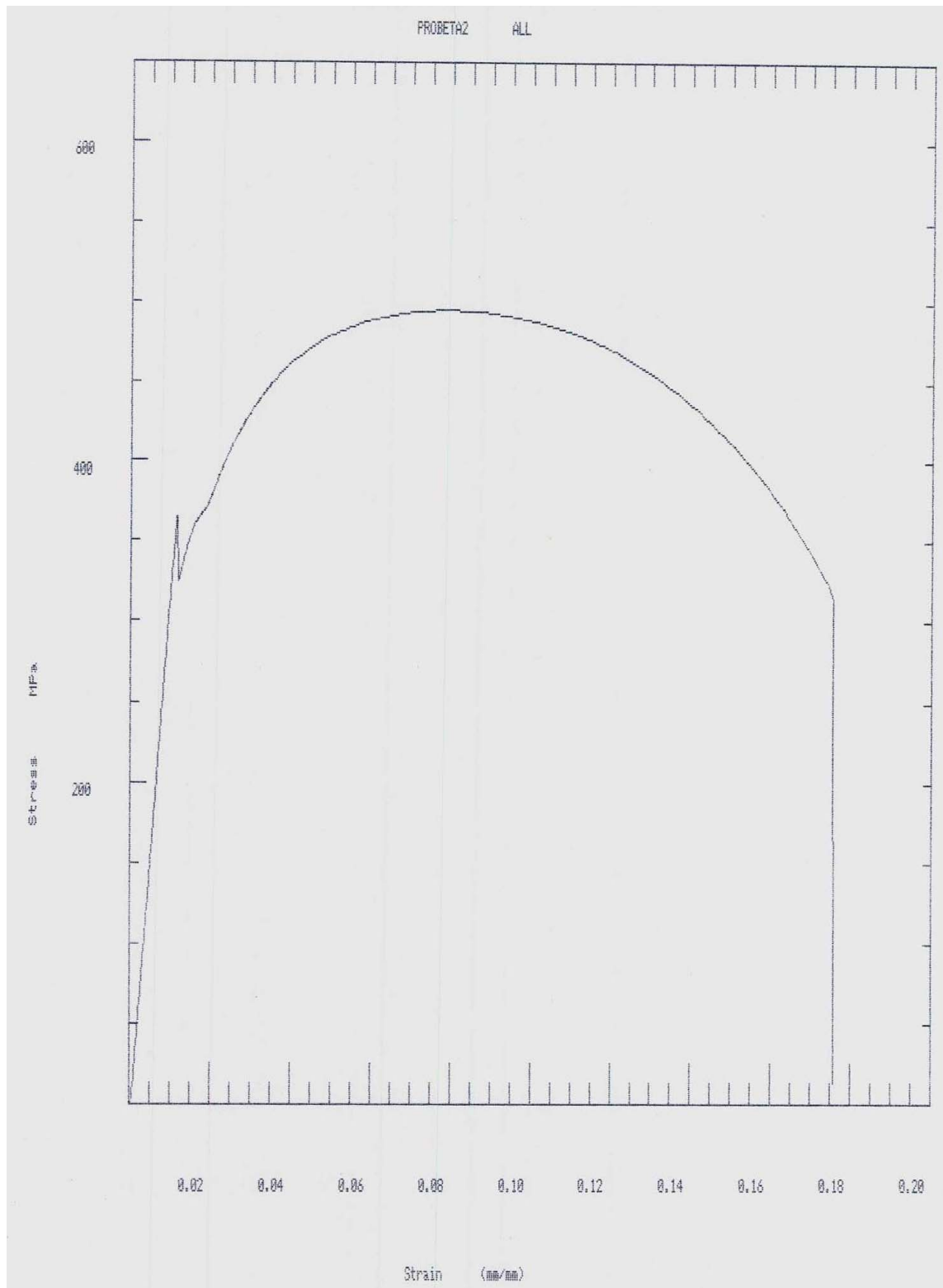
Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	4.410	8.167	31.47	494.8	9.480	17.56	20.08	315.7	.6564
Mean:	4.410	8.167	31.47	494.8	9.480	17.56	20.08	315.7	.6564

Standard Deviation: -----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.216	20.84	327.7	34480.	7.766	258.5
Mean:	1.216	20.84	327.7	34480.	7.766	258.5

Standard Deviation: -----

**FIGURA 9-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 5.**



**FIGURA 10-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 5.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile  
 Operator name: Adolfo Altamirano M.  
 Sample Identification: PROBETA4  
 Interface Type: 4200 Series  
 Machine Parameters of test:  
 Sample Rate (pts/sec): 10.00  
 Crosshead Speed (mm/min): 5.000  
 Intron Corporation  
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04  
 Test Date: 03 Aug 2005  
 Sample Type: ASTM  
 Humidity (%): 50  
 Temperature (deg. C): 21

Dimensions:  
 Spec. 1  
 Diameter (mm) 9.0000  
 Spec gauge len (mm) 54.000  
 Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcmnt at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcmnt at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcmnt at 0.2% Yield (mm)
1	4.050	7.500	32.68	513.8	8.850	16.39	20.82	327.4	.7228
Mean:	4.050	7.500	32.68	513.8	8.850	16.39	20.82	327.4	.7228

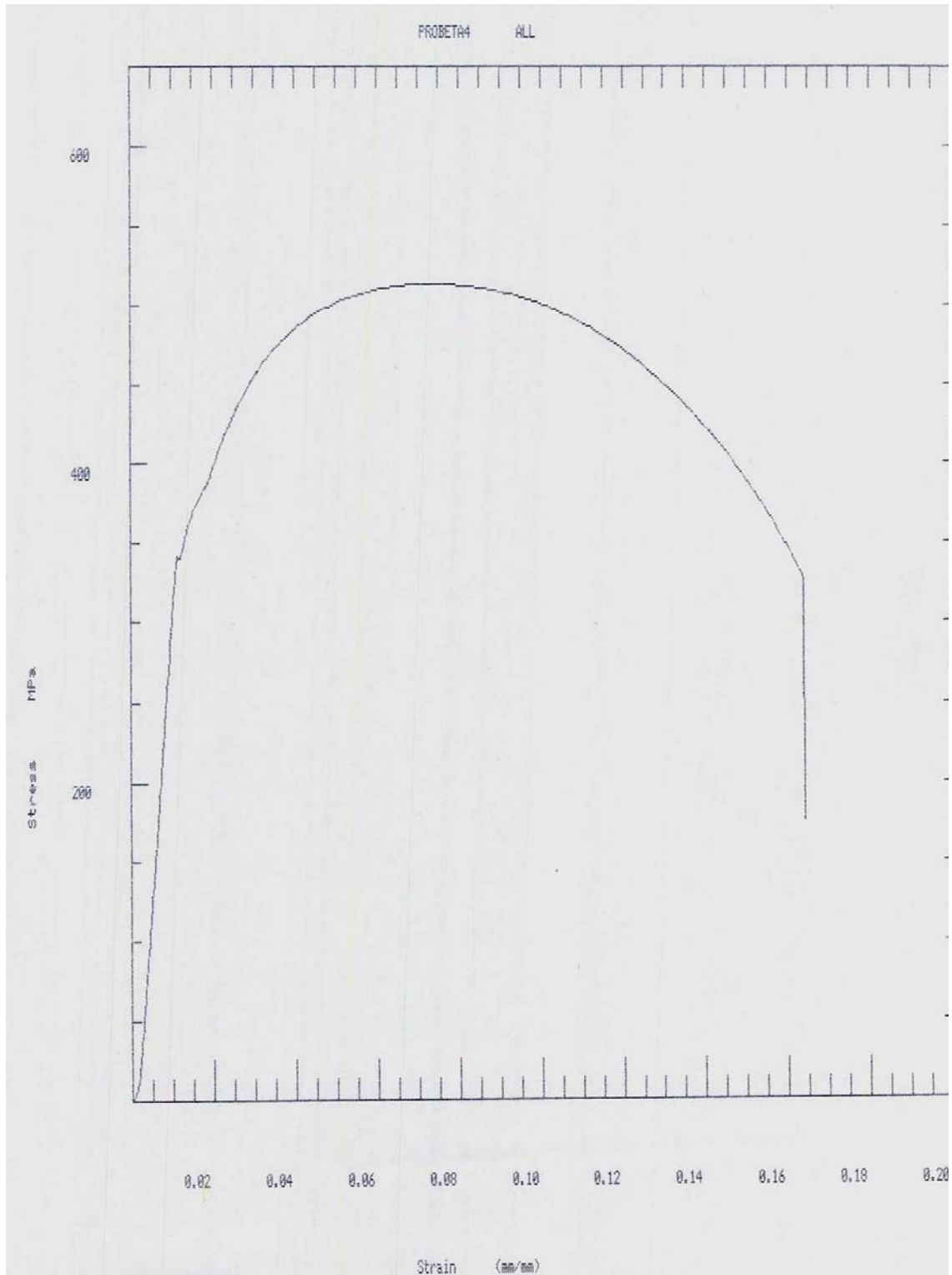
Standard Deviation: -----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.339	22.61	355.4	37310.	8.382	248.0
Mean:	1.339	22.61	355.4	37310.	8.382	248.0

Standard Deviation: -----

FIGURA 11-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 6.

**GRAFICA DE ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA DE ACERO 1018 SIN SOLDAR.**



**FIGURA 12-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 6.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile

Instron Corporation  
Series IX Automated Materials Testing System 1.04  
Test Date: 03 Aug 2005

Operator name: Adolfo Altamirano M.

Sample Identification: PBAMATER  
Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00  
Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Humidity (%): 50  
Temperature (deg. C): 20

Dimensions:

Spec. 1

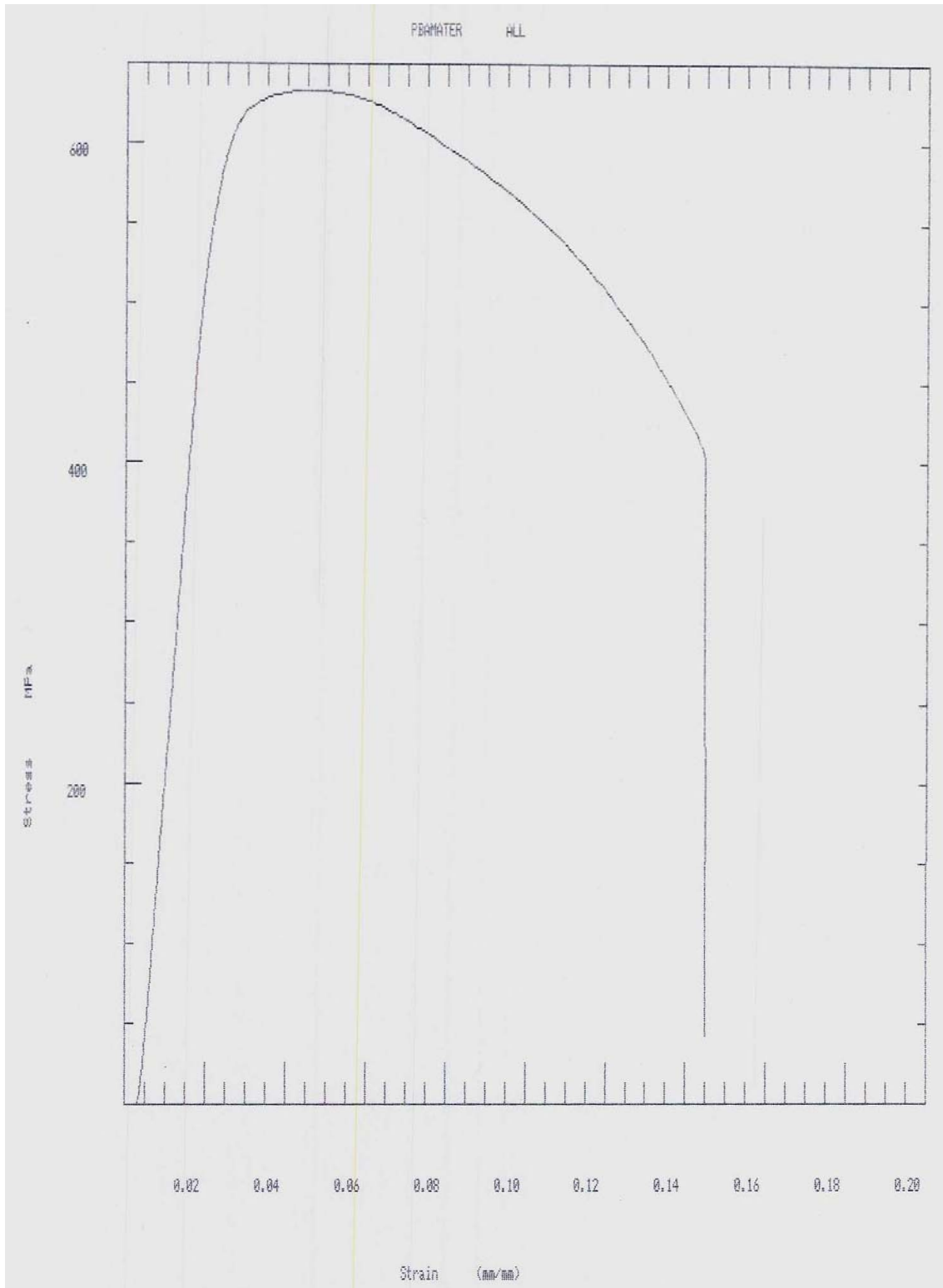
Diameter (mm) 9.0000  
Spec gauge len (mm) 54.000  
Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	2.510	4.648	40.27	633.2	7.810	14.46	25.71	404.2	1.231
Mean:	2.510	4.648	40.27	633.2	7.810	14.46	25.71	404.2	1.231
Standard Deviation:	-----								

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	2.280	36.12	567.9	33590.	20.25	257.9
Mean:	2.280	36.12	567.9	33590.	20.25	257.9
Standard Deviation:	-----					

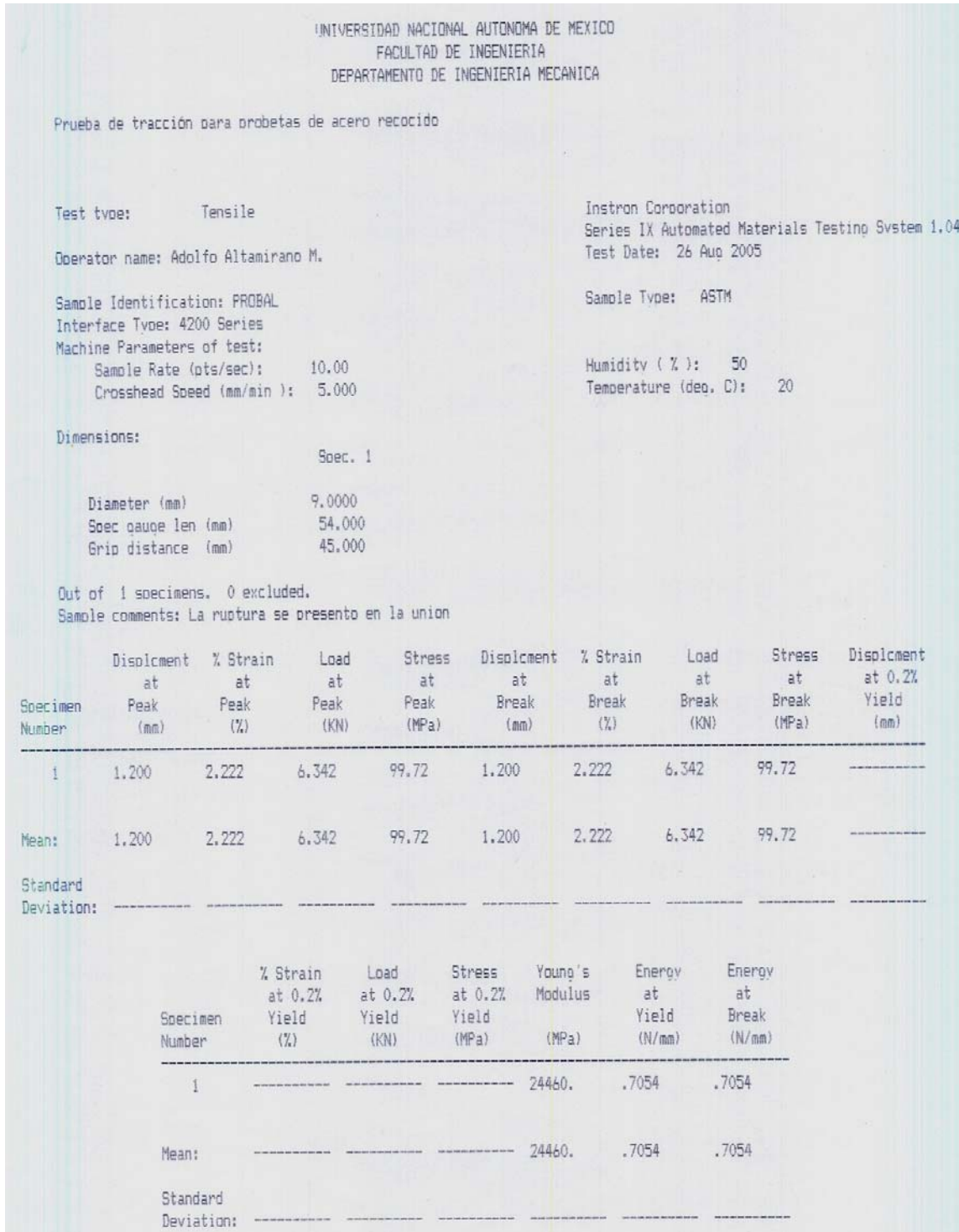
**FIGURA 13-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA H.**



**FIGURA 14-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA H**

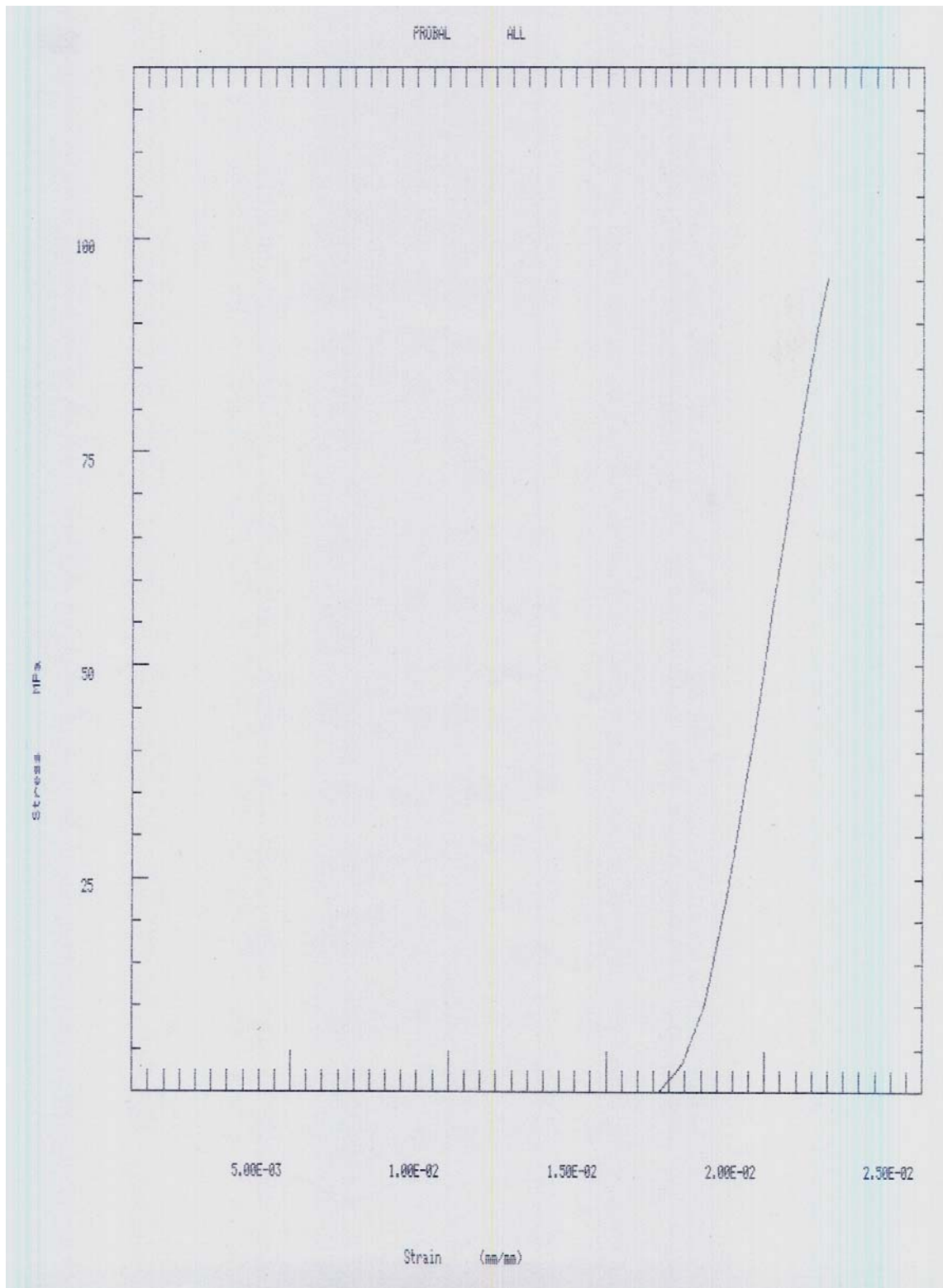


## GRAFICAS DE ENSAYO DE TRACCION PARA LAS PROBETAS SOLDADAS ALUMINIO T 6061 CON ACERO 1018.



**FIGURA 15-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 7.**





**FIGURA 16-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 7.**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: Adolfo Altamirano M.	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 26 Aug 2005
Sample Identification: PROBAL2	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 10.00	Humidity (%): 50
Crosshead Speed (mm/min): 5.000	Temperature (deg. C): 20

Dimensions: Spec. 1

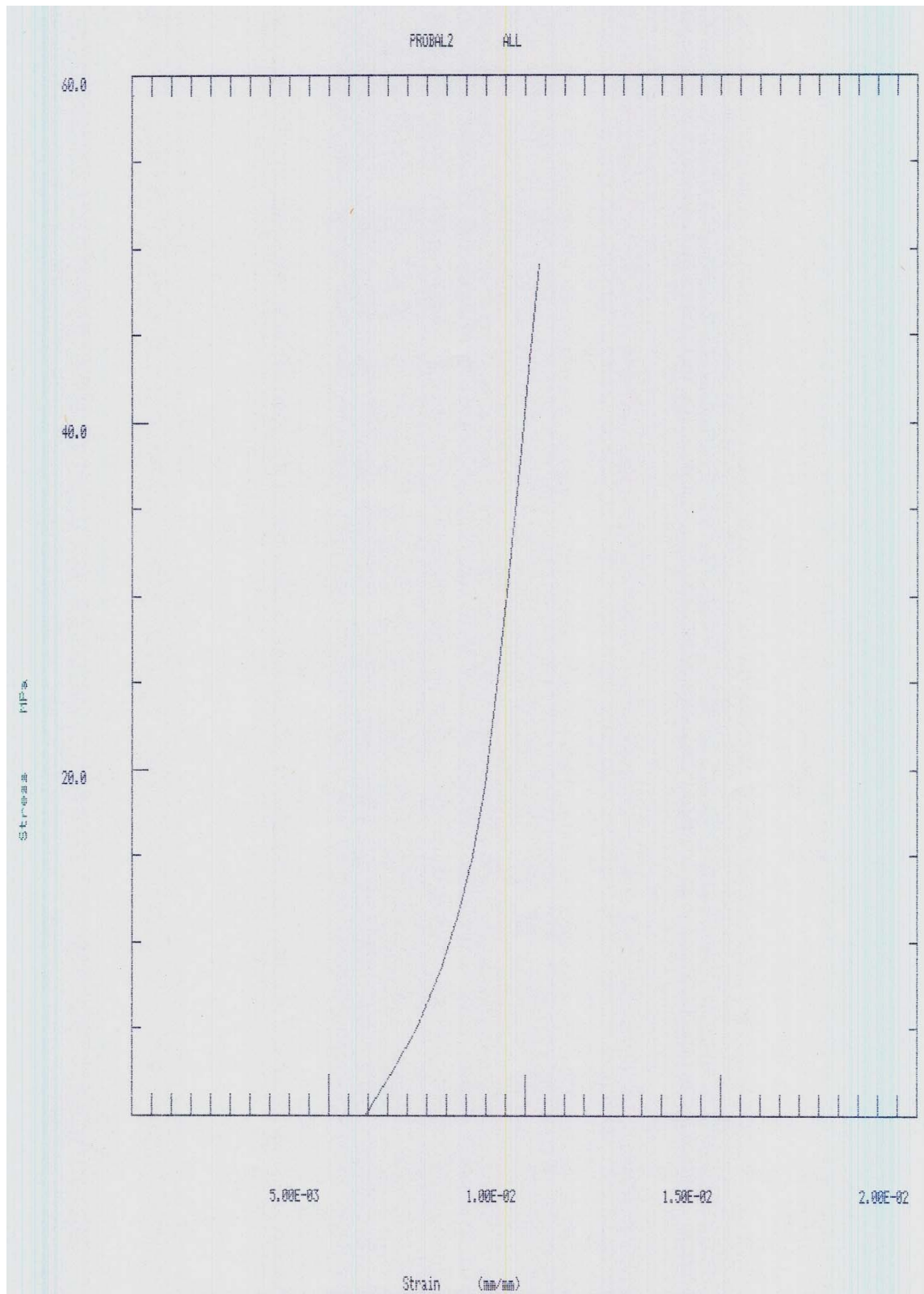
Diameter (mm)	9.0000
Spec gauge len (mm)	54.000
Grip distance (mm)	45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	1.030	1.907	3.121	49.07	1.030	1.907	3.121	49.07	-----
Mean:	1.030	1.907	3.121	49.07	1.030	1.907	3.121	49.07	-----
Standard Deviation:	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	-----	-----	-----	23120.	.2293	.2293
Mean:	-----	-----	-----	23120.	.2293	.2293
Standard Deviation:	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**FIGURA 17-B.- DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 8.**



**FIGURA 18-B.- GRAFICA DEL ENSAYO DE TRACCION PARA LA PROBETA 8.**