

11161

2

201

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

" SOLDADURA DE UN ACERO HADFIELD "

**T E S I S**

PRESENTADA:

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA**

POR

**HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA**

1994

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





## **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 está 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.

## **H. JURADO ASIGNADO.**

**ate**

**Vocal**

**Dr. Alejandro F. Romero López.**

**M. en C. Raúl Lucido De La Parra.**

**Secretario**

**M. en C. Juan Leonardo Hernández De Anda.**

**Primer Suplente**

**M. en C. Alfonso Ramos Anastasio.**

**Segundo Suplente**

**M. en C. Jesus Cruz Guzmán.**

**SITIO DONDE SE DESARROLLARA EL TEMA:**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN,  
CENTRO DE ASIMILACION TECNOLOGICA.**

**SUSTENTANTE:**

**Hector Enrique Curiel Reyna.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**M. en C. Juan Leonardo Hernández De Anda.**

*1994*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ESTE TRABAJO SE LO DEDICO A:**

**MI ESPOSA :**

**Q.F.B. Irma Razo Marañón.**

**MIS HIJAS:**

**Brenda y Yajaira Curiel Razo**

**A LA MEMORIA DE MI MADRE:**

**Profra. Dolores Reyna de Curiel.**

**MI PADRE:**

**Ing. Emilio Curiel Cueto.**

**A MI FAMILIA EN GENERAL.**

**A MIS AMIGOS.**

# INDICE

	hoja nº.
<b>Indice.....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>Generalidades.....</b>	<b>5</b>
<b>Composición química y sus efectos en las propiedades del acero Hadfield.....</b>	<b>8</b>
<b>Tratamiento térmico del acero de alto Manganeso.....</b>	<b>16</b>
<b>Calentamiento en los aceros al Manganeso.....</b>	<b>18</b>
<b>Estructuras metalúrgicas.....</b>	<b>24</b>
<b>Propiedades de los aceros al alto Manganeso.....</b>	<b>26</b>
<b>Parte experimental.....</b>	<b>31</b>
<b>Método experimental.....</b>	<b>32</b>
<b>Diseño de experimentos.....</b>	<b>37</b>
<b>Caracterización de la falla.....</b>	<b>38</b>
<b>Afectación de la temperatura.....</b>	<b>40</b>
<b>Velocidad de enfriamiento.....</b>	<b>42</b>
<b>Procedimiento de soldadura.....</b>	<b>45</b>
<b>Resultados obtenidos.....</b>	<b>47</b>
<b>Caracterización de la falla.....</b>	<b>48</b>

<b>Efecto de la temperatura sobre la estructura del acero Hadfield.....</b>	<b>60</b>
<b>Velocidad de enfriamiento.....</b>	<b>71</b>
<b>Procedimiento de soldadura.....</b>	<b>83</b>
<b>Discusión de resultados.....</b>	<b>87</b>
<b>Caracterización de la falla.....</b>	<b>88</b>
<b>Afectación de la temperatura.....</b>	<b>90</b>
<b>Velocidad de enfriamiento.....</b>	<b>91</b>
<b>Procedimiento de soldadura.....</b>	<b>93</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>94</b>
<b>Caracterización de la falla.....</b>	<b>95</b>
<b>Afectación de la temperatura.....</b>	<b>96</b>
<b>Velocidad de enfriamiento.....</b>	<b>97</b>
<b>Procedimiento de soldadura.....</b>	<b>98</b>
<b>Investigaciones futuras.....</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>101</b>

## INTRODUCCION.

Los aceros con alto Manganeso y alto Carbono llamados también Hadfield, en honor de su descubridor, son usados en aquellos servicios donde se requiere que el material tenga resistencia al alto impacto con abrasión o alto impacto con fricción metal-metal, como ejemplos industriales de estos usos tenemos: Industria minera en sus molinos, quebradoras, martillos de molienda, industria de ferrocarriles en los cambios de vías, industria de movimientos de tierras en los dientes de cargadores frontales, etc.

Estos usos se deben a las propiedades metalúrgicas del acero, por su alto contenido de Carbono y Manganeso que estabilizan a la austenita por medio de un enfriamiento rápido. Esta condición de estabilización es de forma meta-estable, ya que con una cantidad de energía, sea mecánica o térmica, se precipitan carburos en zonas preferenciales, obteniéndose de esta forma una modificación muy marcada en las propiedades mecánicas del acero Hadfield.

Cuando el material tiene una deformación muy, alta el porcentaje de carburos de Manganeso aumenta hasta el límite de la fragilización del acero, que producirá la fractura del material. Esta ruptura no sólo está presente por el trabajo mecánico continuo del servicio normal, sino también por un fenómeno térmico, como el que se produce en un proceso de soldadura. La desestabilización de la austenita provocada por la temperatura, produce la formación de carburos en lugares específicos de la estructura del acero que formará grietas en el material.

**Debido al servicio extremo de estos materiales, de alto Manganeso, las fracturas son reparadas por soldadura en forma frecuente y normal, pero los resultados son poco alentadores por las rupturas catastróficas que en ellos suceden.**

**En general, los procedimientos de soldadura para unir o recuperar aceros de alto Manganeso, alto Carbono, tiene grandes discrepancias que van desde los fabricantes de soldadura hasta las informaciones científicas.**

**El procedimiento que nosotros proponemos se fundamenta en las propiedades metalúrgicas más estables del acero, para evitar la ruptura del mismo por el efecto térmico y de esta forma obtener resultados más satisfactorios en el servicio que tiene que brindar.**

**En este trabajo, no hemos considerado otros factores que pueden afectar el comportamiento de estos materiales en las reparaciones por soldadura como son aleantes, estructuras previas, calidad de electrodos y tipos de electrodos.**

## GENERALIDADES.

**Los aceros austeníticos al Manganeso, también llamados aceros Hadfield , son aleaciones extremadamente tenaces y no magnéticas; en las cuales su mecanismo de endurecimiento por transformación ha sido suprimido por el alto contenido de Manganeso y un rápido enfriamiento desde alta temperatura. Se caracterizan por su alta resistencia, ductibilidad y su excelente resistencia al desgaste.** 2,10,21.

**En forma de fundición o conformado mecánico, son requeridos en varias industrias por su resistencia a la abrasión y alto impacto o a la fricción metal-metal.** • 2,21,11.

**El rango de composición a la cual los aceros al manganeso retienen una estructura austenítica a baja temperatura es amplia, sin embargo, los contenidos de Carbono y Manganeso no son los adecuados para grandes secciones de piezas para conservar la estructura de austenita, el efecto de masa en la pieza es rápidamente producido después del enfriamiento, por los microconstituyentes que se presentan, que son productos de la transformación de la austenita.** 1,3,26,27.

Existen varios tipos de acero Hadfield, que se basan en los porcentajes de carbono y manganeso, pero con la adición de elementos de aleación como: Cromo, Níquel, Molibdeno, Vanadio, Titanio y Bismuto. Son aceros modificados para productos que requieren la fabricación de piezas con tamaños de sección grande, aumento de solubilidad de las estructuras de la austenita, etc.<sup>11,28,29.</sup>

Estos aceros Hadfield o alto Manganeso se norman en A.S.T.M. A-128 (tabla I).

TABLA 1.- RANGOS DE COMPOSICION DE LOS ACEROS FUNDIDOS AUSTENITICOS DE ALTO MANGANESO.

ASTM  
A128

C O M P O S I C I O N

grado	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si(máx)	P(máx)
A.....	1.05-1.35	11.0 min	...	...	...	1.00	0.07
B-1.....	0.9-1.05	11.5-14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-2.....	1.05-1.2	11.5-14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-3.....	1.12-1.28	11.5-14.0	...	...	...	1.00	0.07
B-4.....	1.2-1.35	11.5-14.0	...	...	...	1.00	0.07
C.....	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5	...	...	1.00	0.07
D.....	0.7-1.3	11.5-14.0	...	...	3.0-4.0	1.00	0.07
E-1.....	0.7-1.3	11.5-14.0	...	0.9-1.2	...	1.00	0.07
E-2.....	1.05-1.45	11.5-14.0	...	1.8-2.1	...	1.00	0.07
F.....	1.05-1.35	6.0-8.0	...	0.9-1.2	...	1.00	0.07

## **COMPOSICION QUIMICA Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO HADFIELD.**

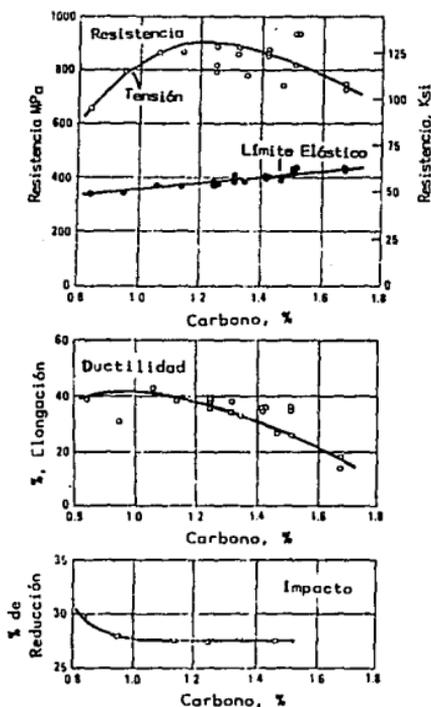
**Aceros fundidos.-** La mayoría de las fundiciones, su composición nominal contiene 1.2% de Carbono y de 12% a 13% de Manganeso como elementos fundamentales. La producción industrial usa entre 1.00% al 1.40% de Carbono y de 10% a 14% de Manganeso según la norma A.S.T.M. teniendo generalmente el punto medio de esta composición química; en los límites inferiores decrece la resistencia a la tensión.<sup>14,21.</sup>

**El Carbono tiene efecto en el límite elástico,** porque al disminuir también decrece el límite elástico, este efecto se enmascara por el tamaño de cristal, sin embargo, el porcentaje óptimo es de 1.15%.

**Los niveles elevados de Carbono (figura. 1) causan problemas en el tratamiento térmico del acero.** Los contenidos bajos de Carbono ayudan a eliminar el efecto de fragilización por precipitación de carburos, por abajo del límite de enfriamiento.<sup>9,10,11.</sup>

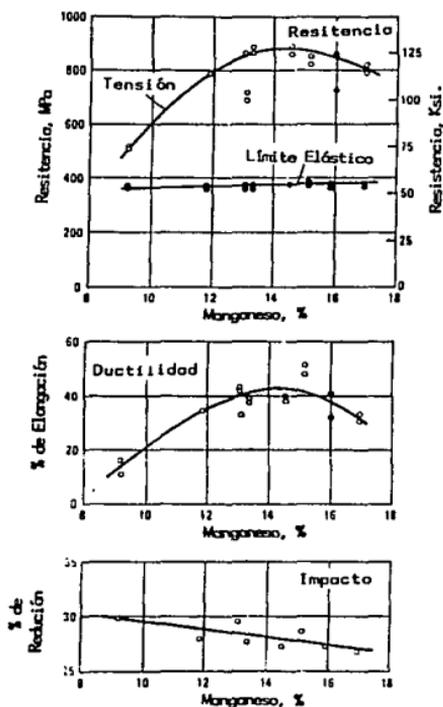
**El Manganeso con límites de 10% a 14%, no tiene un efecto significativo en el límite elástico,** pero sí beneficia la resistencia a la tensión y la ductibilidad (figura. 2), con menos del 10% de Manganeso, la resistencia mecánica decrece rápidamente y la falla puede ser en la mitad de tiempo normal de uso; por abajo del 8% de Manganeso, el acero tiende a endurecerse al aire por la formación de estructuras de transformación metalúrgica.<sup>11,14,21.</sup>

Fig. 1.- Cambio de las propiedades Mecánicas con el contenido de Carbono en un acero Austenítico con 15 % de Manganeso.



Los datos son de un acero fundido, que fue templado desde 1100°C en agua.

Fig. 2.- Cambio de las propiedades Mecánicas con el contenido de Manganeso, en un acero - Austenítico con 1.15 % de Carbono.



Los datos son de un acero fundido que fue templado desde 1100 °C en agua.

**La composición química no permite cualquier transformación a la austenita cuando las aleaciones son templadas en agua desde por arriba de Acm. Esto significa que pierden ductibilidad en secciones gruesas el material, el efecto se debe a la precipitación de carburos intercrystalinos en los bordes de cristal (figura. 3).** <sup>3,11,21,32,33,34.</sup>

**El efecto del porcentaje de Carbono y Manganeso sobre la temperatura Ms. de una austenita totalmente homogénea se observa en la figura 4.**

**El comportamiento de un acero Hadfield depende básicamente del contenido presente de Carbono y Manganeso.** <sup>10,35,36.</sup>

**El silicio se agrega en la fabricación de fundiciones con un porcentaje menor de uno; los porcentajes hasta 1% son para elevar el límite elástico y reducir la ductilidad del acero.**

**El Silicio y Fósforo son dos elementos nocivos por arriba 2.2% y 0.07% respectivamente; el primero decrece la resistencia a la tensión y el segundo da fragilidad en caliente.** <sup>14.</sup>

**El Fósforo reduce la soldabilidad del acero cuando está presente, el máximo es de 0.05% para evitar su ruptura.** <sup>11,21.</sup>

Fig. 3.- Solubilidad del Carbono en un acero con 13% de Manganeso.

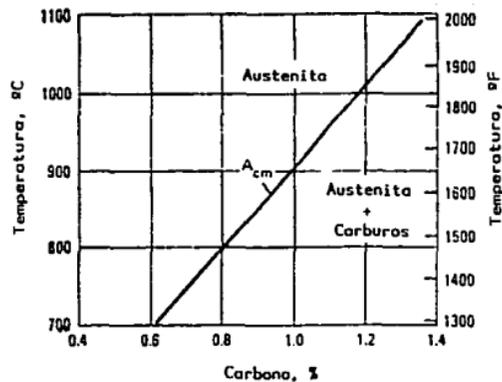
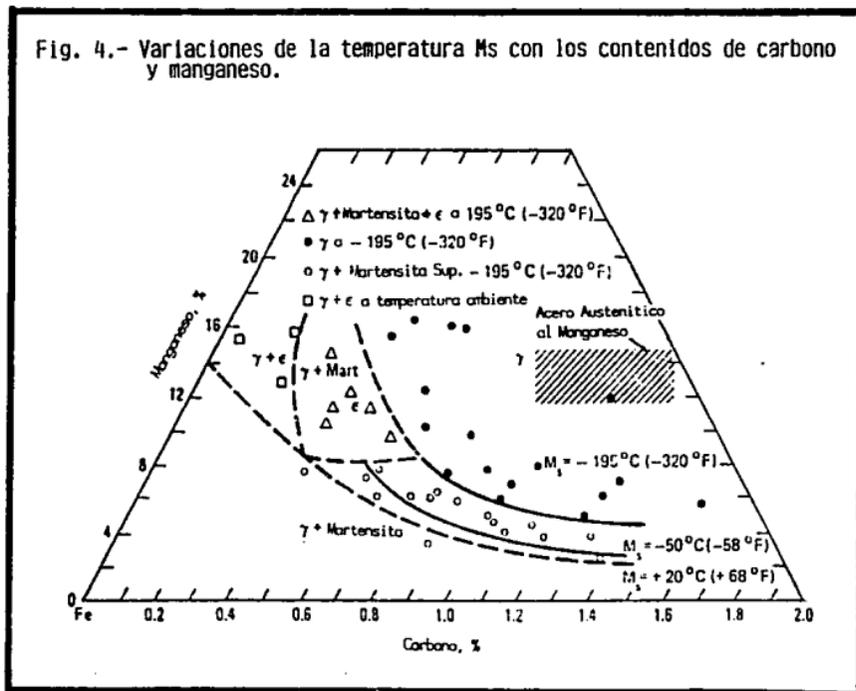


Fig. 4.- Variaciones de la temperatura Ms con los contenidos de carbono y manganeso.

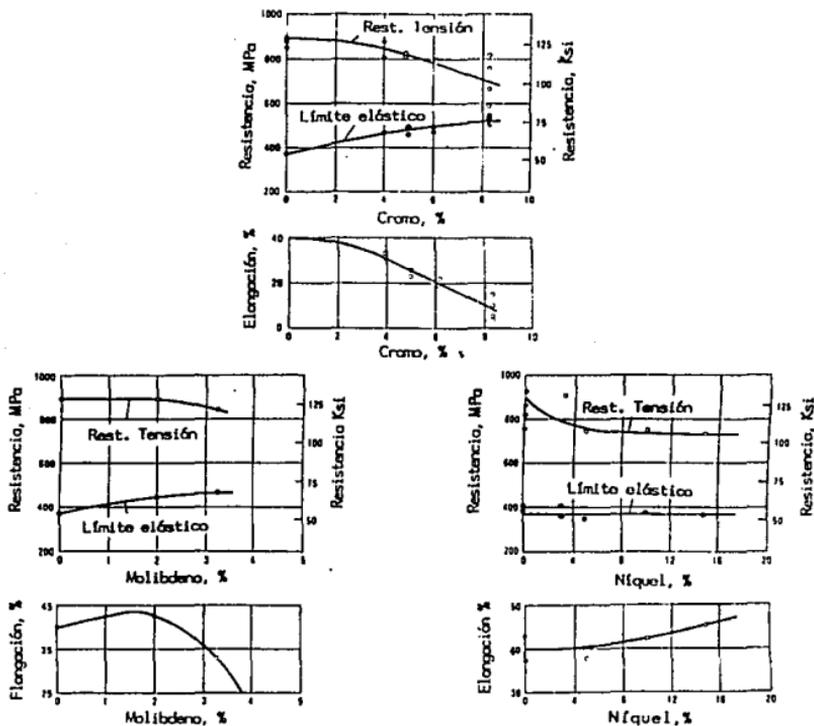


**Los elementos de aleaciones tales como; Cromo, Molibdeno y Níquel también modifican el límite elástico, resistencia a la tensión y ductilidad selectivamente (figura 5).**

**Níquel.- Aumenta considerablemente la estabilización de la austenita por efecto austenitizante de la estructura del hierro.**

**Cromo.- Este es un elemento que depende del porcentaje de Carbono presente en el acero, con contenidos bajos no tiene efecto en la estabilización de la austenita, pero si en las propiedades mecánicas. A mayor concentración se verá favorecida la formación de martensita y de carburos intercrystalinos.** <sup>11,21,36,37.</sup>

Fig. 5.- Efecto en las propiedades mecánicas de un acero de alto manganeso con los contenidos de NIQUEL, MOLIBDENO y CROMO.



Acero fundido, tratado a  $1100^{\circ}\text{C}$  y templado en agua.

## **TRATAMIENTO TERMICO DEL ACERO DE ALTO MANGANESO.**

**Las características de un acero al alto Manganeso en resistencia y tenacidad después del temple en agua, se debe a la homogenización de la estructura austenítica, sin embargo, pueden aparecer carburos que dependiendo de su continuidad y localización, imparten fragilidad en el material.** <sup>1,3,6,29,30,39.</sup>

**La figura 3 nos muestra el resultado de la relación entre la temperatura de calentamiento y la concentración de Carbono, para obtener las estructuras de un acero de alto manganeso. Para alcanzar la máxima resistencia, las temperaturas de austenitización deben de ser por arriba de  $A_{cm}$  y de esta forma el acero pueda ser totalmente austenítico y el Carbono completamente solubilizado en la estructura de la austenita.**

**Los rangos de temperatura comunes usados para austenitización completa son de  $990^{\circ}\text{C}$  a  $1100^{\circ}\text{C}$ , el tiempo de permanencia no es crítico pero se puede establecer entre 30 a 45 minutos por pulgada de sección.** <sup>11,29,39.</sup>

**Sin embargo, el temple de un acero de alto Manganeso si presenta dificultades en piezas robustas, ya que para extraer la temperatura de ellas es tardado, produciendo precipitación de carburos que pueden causar fracturas internas en el material.<sup>8,9</sup>**

**El aumento del porciento de Carbono favorece la precipitación de carburos intercrystalinos y aciculares. Sin embargo, en las curvas de temperatura-tiempo-transformación de los aceros austeníticos de alto Manganeso, que tengan una composición química similar, al modificar uno de ellos con 2% de Molibdeno, y al compararlos entre si. El 2% de Molibdeno tiende a retrasar considerablemente. El período de incubación de carburos intercrystalinos; la transformación perlítica, y la precipitación de carburos aciculares transcristalinos .**

**Para prevenir la fragilización del acero al alto Manganeso no se debe hacer después del temple, revenido o relevado de esfuerzos.<sup>9,14,39.</sup>**

**También estos aceros tienen un elevado riesgo de decarburización por el porcentaje de carbono presente y su elevada temperatura de austenitización; cuando sucede el fenómeno de decarburización, la transformación de la austenita a otros componentes, principalmente a martensita, generan esfuerzos entre las zonas y el riesgo de formación de fracturas entre ellas es elevada.**

## **CALENTAMIENTO EN LOS ACEROS AL MANGANESO.**

**Cuando se calienta un acero de alto Manganeso por arriba de 318°C, su fragilización se verá aumentada por la transformación de la austenita metaestable a carburos de Manganeso que se precipitan a borde de cristal, la precipitación se ve favorecida entre más alta sea la temperatura del sobrecalentamiento y que no sobrepase  $A_{cm}$ . <sup>11,14,39,40.</sup>**

**Las propiedades mecánicas de los aceros con 13% de Manganeso entre 45°C y 205°C, los hacen excelentes para múltiples aplicaciones, no se recomienda en aplicaciones de desgaste para altas temperaturas por su estructura inestable entre 260°C y 870°C. En altas temperaturas carecen de resistencia mecánica y ductilidad. La resistencia a la tensión, límite elástico y elongación entre -195°C y 98°C para aceros conformados mecánicamente con 1.4% Carbono, 12.5% Manganeso y 0.12% Silicio se muestran en la tabla II.**

**Los aceros fundidos a -73°C conservan el 85% de sus propiedades de resistencia al impacto (tabla III), dando un factor de seguridad mayor que los aceros ferríticos, en servicios que demanden alto impacto con abrasión, fricción metal-metal a baja temperatura. <sup>11,25,29.</sup>**

**Asociada a la fragilización de alta temperatura, por el sobrecalentamiento por arriba de 300°C, existen cambios también en las propiedades físicas por las transformaciones metalúrgicas existentes.**

TABLA II.- PROPIEDADES MECANICAS DE UN ACERO CON 1.4 %C - 12 %Mn  
A VARIAS TEMPERATURAS.

TEMPERATURA °C	RESISTENCIA A LA TENSION lb/in <sup>2</sup>	LIMITE ELASTICO lb/in <sup>2</sup>	ELONGACION %	DUREZA H.V.
98	151,000	63,000	56	518
91	163,000	58,000	68	...
23	151,000	67,000	48	524
23	158,000	43,000	62	...
22	151,000	53,000	47	...
- 30	150,000	70,000	36	470
- 97	147,000	62,000	25	...
-110	138,000	76,000	25	438
-150	137,000	101,000	12	317
-195	137,000	124,000	4	251
-200	136,000	117,000	4	...

TABLA III.- RESISTENCIA AL IMPACTO (CHARPY "V").

COMPOSICION, %				PRUEBA DE IMPACTO			
C	Mn	SI	NI	A 240C (75 OF)		A -730C (-100 OF)	
				J	ft.lb	J	ft.lb
1.03	12.9	0.52	...	128	94.5	71	52.5
1.18	13.0	0.50	...	144	106.0	79	58.5
1.19	14.6	0.50	...	141	104.0	79	58.5
0.84	12.5	0.48	3.46	136	100.0	108	80.0
1.17	12.7	0.53	3.56	142	104.5	119	88.0

**Tanto la composición química y temperatura influyen en los cambios de conductividad y expansión térmica (tabla IV).**

**La expansión térmica es una característica de los aceros al Manganeso como la que presentan los aceros austeníticos inoxidables Cromo-Níquel. El cambio en longitud es de 1.5 veces mayor que los aceros ferríticos.**

**Su coeficiente de expansión térmica lineal es de 18 mm/m°C (figura 6). Las transformaciones de la austenita a otras estructuras, como carburos y perlita modifican el coeficiente de expansión térmica en 360°C y 760°C.**

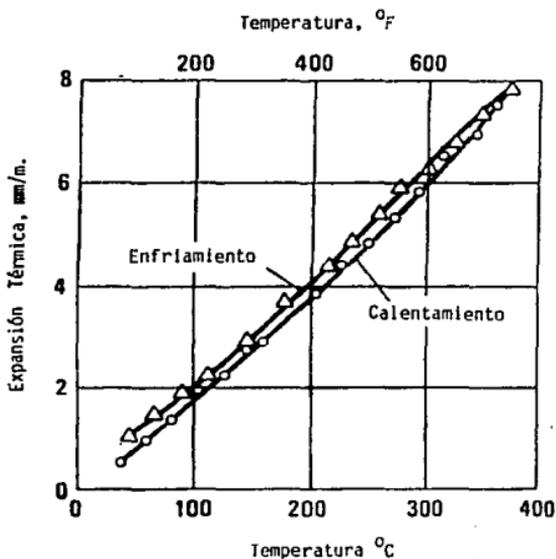
TABLA IV.- EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ACERO CON 13 %Mn.

TEMPERATURA °C	CALOR ESPECÍFICO MEDIO J/Kg-K	COEFICIENTE MEDIO DE EXPANSION TERMICA DESDE 0 °C $\mu\text{m/m-K}$	RESISTENCIA ELECTRICA $\Omega\cdot\text{m}$	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m-K
0	494	...	6.65	13.2
50	510	...	7.11	14.0
100	527	18.01	7.57	14.9
150	553	...	8.02	15.7
200	573	19.37	8.47	16.5
250	590	...	8.89	17.4
300	603	20.71	9.31	18.0
350	607	...	9.69	18.6
350 a 650	(a)	(a)	(a)	(a)
700	...	20.49	11.53	21.8
750	...	...	11.80	21.8
800	...	21.86	12.11	22.2
950	...	...	12.40	22.4

NOTA.- La composición del acero es de: 1.22%C, 13.0%Mn, 0.22%Si, 0.03%P, 0.01%S, 0.07%Ni, 0.03%Cr, 0.07%Cu, 0.004%Al.

(a).- Dependerán los valores del tiempo y temperatura, sobre la cantidad de transformación de la Austenita.

Fig. 6 .- Expansión térmica de un acero con 13% de manganeso.



Composición del acero: 1.18% C, 13% Mn, 0.5% Si tratado térmicamente a 1100°C por 2 horas y templado en agua.

## **ESTRUCTURAS METALURGICAS.**

**La estructura cristalina fundamental de los aceros Hadfield o alto Manganeso es el cúbico de caras centradas, esta estructura se presenta por efecto austenitizante del Manganeso, a la concentración del 13%, para presentar la estructura gama del hierro.**

**La presencia de estructuras como carburos, perlita o martensita dependerán de la velocidad de enfriamiento, masa de la pieza y composición química.**

**Los aceros de Manganeso se consideran como materiales frágiles (tabla V), pero con la adición de elementos de aleación o contenidos de Carbono del 1.1% aproximado, sus propiedades se mejoran significativamente. En la aplicación de soldaduras, tanto en material base como el de aporte tiene los mismos comportamientos por el efecto del calentamiento.** <sup>11,21,23,24,26,27.</sup>

**El manejo de la composición química es para evitar la formación de carburos y las transformaciones de la austenita, para evitar o reducir la probabilidad de fractura del acero austenítico, en la solidificación o por el efecto del enfriamiento cuando se calienta.**

TABLA V.- PROPIEDADES MECANICAS DE ACEROS AL MANGANESO FUNDIDOS.

C	COMPOSICION, %			LIMITE ELASTICO Ksi	RESISTENCIA A LA TENSION Ksi	ELONGACION %	REDUCCION DE AREA %	RESISTENCIA AL IMPACTO J Ft-lb	DUREZA HB
	Mn	Si	OTRO						
<b>ACEROS AL CARBONO.</b>									
0.85	11.2	0.57	...	...	64	14.5	...	...	...
0.95	13.0	0.51	...	...	61	14.0	...	...	...
1.11	12.7	0.54	...	52	65	4.0	...	...	...
1.27	11.7	0.56	...	...	52	2.0	...	...	...
1.28	12.5	0.94	...	...	48	1.0	...	3.4	2.5
1.36	20.2	0.60	...	...	62	1.0	...	...	283
<b>ACEROS AL MANGANESO, 1Mo.</b>									
0.61	11.8	0.17	1.10 Mo	46	103	27.5	23	...	163
0.75	13.9	0.58	0.90 Mo	49	107	39.5	30	...	183
0.83	11.6	0.38	0.96 Mo	50	101	30.0	29	...	163
0.89	14.1	0.54	1.00 Mo	52	100	29.5	22	...	196
1.16	13.6	0.60	1.10 Mo	58	81	13.0	15	...	185
0.93	13.6	0.67	0.96 Mo	53	74	11.0	16	72	53
0.99	12.6	0.60	0.87 Mo	...	67	6.0	...	...	...
0.98	12.6	0.60	0.87 Mo	...	63	4.0	...	...	...
0.95	12.6	0.60	0.87 Mo	50	56	4.0	4	...	...
1.30	13.1	0.78	0.99 Mo	...	63	2.0	...	8	6
1.33	19.8	0.60	0.99 Mo	...	73	2.5	...	...	231
<b>ACEROS AL MANGANESO, 2Mo.</b>									
0.52	14.3	1.47	2.40 Mo	54	87	15.5	13	...	220
0.70	13.6	0.43	2.00 Mo	52	114	41.0	29	...	180
0.75	14.1	0.99	2.00 Mo	53	108	34.5	27	...	183
0.91	14.1	0.60	2.00 Mo	57	102	27.5	21	...	196
1.24	14.1	0.64	3.00 Mo	64	87	7.5	10	...	235
1.40	12.5	0.62	2.10 Mo	61	80	3.5	5	...	228
1.34	12.0	0.43	2.20 Mo	60	63	3.5	7	...	235
<b>ACEROS AL MANGANESO, 3.5Ni.</b>									
0.75	13.0	0.95	3.65 Ni	43	95	36.0	26	...	150
0.80	13.5	0.53	3.61 Ni	...	77	26.0	...	...	...
0.91	13.3	0.53	3.38 Ni	...	74	24.0	...	...	...
<b>ACEROS 6Mn-1Mo.</b>									
0.90	5.8	0.37	1.46 Mo	47	49	2.0	...	9	7
1.00	6.0	0.43	1.03 Mo	48	53	2.0	3	...	195
0.89	6.3	0.60	1.20 Mo	...	48	1.0	...	...	...
1.27	5.1	0.42	1.07 Mo	53	58	1.0	1	3	2

## **PROPIEDADES DE LOS ACEROS AL ALTO MANGANESO.**

**Propiedades físicas.-** Las propiedades físicas de un acero al Manganeso son compiladas en los siguientes datos ( tabla VI ). <sup>11,15,16,32,33.</sup>

El coeficiente de expansión es semejante a los materiales austeníticos, y las propiedades físicas se ven alteradas por efecto de la temperatura y tiempo, posiblemente por la presencia de otras estructuras que imparten fragilidad al material.

**Propiedades magnéticas.-** El material es no-magnético por su estructura austenítica, pero su inestabilidad de austenita cuando sufre una transformación por efecto térmico o mecánico a estructuras como martensita, perlita o carburos, el magnetismo será detectable en proporción a la austenita transformada. <sup>11,16,17,21.</sup>

**Propiedades mecánicas.-** La resistencia a la tensión se ve favorecida por el endurecimiento por trabajo, propiedad significativa de los aceros al alto Manganeso, el límite elástico también se modifica en función a la deformación (tabla VII). Estas dos propiedades se ven influenciadas a tres parámetros que son: composición química, tratamiento térmico y tamaño de cristal austenítico.

TABLA VI.- PROPIEDADES MECANICAS DE ACEROS TIPO AUSTENITICOS AL  
MANGANESO.

TIPO	C	COMPOSICION QUIMICA, %					Mo	R.T. Ksi	L.E. Ksi	ELONG. %	R.A. %	DUREZA HB
		Mn	Si	Cr	Ni							
C-Mn	1,0-1,4	11-14	0,2-1,0	...	...	...	100-145	50-57	30-65	30-45	185-210	
	1,11	12,7	0,54	...	...	...	65	52	4	...	...	
							90	52	25	35		
							66	47	18	25		
	1,1-1,4	11-14	0,2-0,6	...	...	...	131-158	43-67	40-63	35-50	170-200	
C-Mn-Cr	1,1-1,2	12-13	0,5	1,8-2,1	...	...	96-147	58-68	27-59	26-38	205-215	
							82	53	31	29		
							81	56	20	19		
C-Mn-Ni	0,6-0,9	12-14	0,5-0,9	...	3,4-3,6	...	90-132	42-49	40-88		150-180	
	0,8-0,9	13-15	0,9-1,3	...	2,8-4,0	...	134-146	46-56	74-87	45	180	
C-Mn-Mo	0,7-1,0	12-14	0,4-0,6	...	...	1,0	106-137	50-59	37-67	30-39	179-207	
							80-133	42-55	37-61	26-60		
	1,15	12-14	0,5	...	...	1,0	120-144	56-74	45-53	31-37	232-207	
	0,72	13				1,0	145-147	51-54	63-72	43-49	187	

TABLA VII.- PROPIEDADES MECANICAS EN UN ACERO AUSTENITICO CON 13% MANGANESO, QUE FUE CALENTADO A 425 °C POR 48 HORAS.

C	Mn	Si	Ni	Mo	*TAMARO DE GRANO	TEMPLADO		CALENTAMIENTO	
						RESISTENCIA A LA TENSION Psi	ELONG. %	RESISTENCIA A LA TENSION Psi	ELONG. %
1.31	12.9	0.33	...	...	G.B.	111,250	35.5	96,250	1.0
					G.F.	134,500	42.5	96,250	1.0
1.20	13.0	0.50	...	...	G.B.	110,000	49.0	98,750	3.5
					G.F.	129,400	48.0	99,500	2.0
1.03	12.9	0.52	...	...	G.B.	108,750	39.5	93,750	11.0
					G.F.	131,750	46.0	109,500	12.5
1.17	12.7	0.53	3.56	...	G.B.	112,500	48.0	88,000	3.5
					G.F.	115,250	48.0	99,000	4.5
1.15	12.8	0.51	...	0.98	G.B.	130,000	48.5	107,000	19.0
					G.F.	138,000	49.0	108,250	23.0

\* G.B. = GRANO BASTO.

G.F. = GRANO FINO.

**En los aceros al Manganeso entre mayor sea se sección, la ductilidad y su resistencia a la tensión disminuyen, excepto cuando por un control evitamos la presencia de un cristal basto de austenita en la solidificación.<sup>3,11,21.</sup>**

**Propiedades de impacto. - Los aceros al alto Manganeso son resistentes al alto impacto, estos datos dependen de la calidad del tratamiento térmico y tamaño de la pieza. En general a bajas temperaturas las propiedades al impacto se conservan excelentes ( tabla VIII ).**

TABLA VIII.- PRUEBA DE IMPACTO PARA SOLDADURAS DE ACEROS AL ALTO MANGANESO.

TEMPERATURA DE PRUEBA °C	VALORES ft-lb
25	118
- 17	96
- 60	80
-100	55

## **PARTE EXPERIMENTAL.**

**La presente investigación va dirigida a la falla que se presenta por soldadura en los aceros de alto Manganeso y alto carbono que son conocidos como Hadfield, cuando son reparados o reconstruidos y posteriormente sometidos a sus condiciones de trabajo normal, que son extremas por sus mismas propiedades tanto mecánicas, químicas y metalúrgicas.**

**El desprendimiento de la soldadura aplicada o la presencia de grietas en el material base son comunes o frecuentes, las cuales causan deterioro de los equipos, así como altos costos económicos.**

## METODO EXPERIMENTAL.

Para determinar la o las causas de falla, y corrección de las mismas, se plantearon los siguientes incisos:

- 1).- Caracterización de la falla (tipo).
- 2).- Localización de la zona de incidencia de la falla.
- 3).- Inicio de la falla.
- 4).- Causas de la falla.
- 5).- Variables que evitan la falla.
- 6).- Procedimiento de soldadura que evite la falla.

Para el inicio de ésta investigación se tomó como muestra base un acero Hadfield, que estuviera bajo la norma de A.S.T.M. A-128-84.

	ACERO MUESTRA	A.S.T.M. A 128.
	% ELEMENTO	% ELEMENTO
CARBONO	1.16	0.9 - 1.4
MANGANESO	12.00	11.0 - 14.0
SILICIO	0.46	1.00 máx.
FOSFORO	0.04	0.07 máx.
AZUFRE	0.03	0.04 máx.
CROMO	0.10	
MOLIBDENO	0.10	
NIQUEL	0.15	

**En la toma de las muestras para cada ensayo experimental, se les dió una condición inicial metalúrgica, la cual fué realizada de la siguiente forma:**

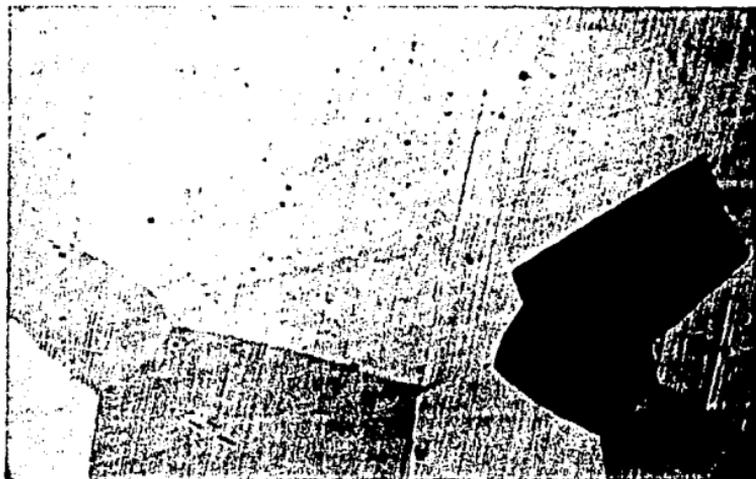
**a).- Tratamiento térmico de homogenización a 1100°C, con una hora de permanencia, empacada con grafito para evitar la decarburización.**

**b).- Temple al agua a temperatura ambiente.**

**La estructura inicial que se obtiene se muestra en la fotografía 1.**

**Dependiendo del tipo de experimento planteado hubo necesidad de determinar las constantes y variables a controlar, como son:**

- Amperaje de aplicación.**
- Voltaje de aplicación.**
- Tiempos de permanencia.**
- Temperaturas de permanencia.**
- Velocidades de avance.**
- Velocidades de enfriamiento.**



**Fotografía 1.- Estructura austenítica que se obtuvo por  
tratamiento térmico de solubilidad a 1100°C.  
Tomada a 600X**

Una vez hecho el experimento planteado, las muestras resultantes se prepararon de la siguiente forma:

- Corte de la muestra.
- Montaje en bakelita.
- Desbaste en lijas de agua.
- Pulido con Alumina.
- Ataque con reactivos químicos específicos.
- Observación al microscopio metalográfico.
- Toma de fotografías.
- Toma de durezas.

Los equipos que se usaron en esta investigación fueron:

- Máquina de soldar para G.T.A.W.
- Máquina de soldar para S.M.A.W.
- Equipo automático para la aplicación de la soldadura.
- Horno de mufla de 1100°C.
- Horno tubular de 1500°C.
- Diferentes medios de enfriamiento.
- Equipo de metalografía.
- Microscopios metalográficos.

- **Durometro universal.**
- **Cortadora de disco.**
- **Electrodos revestidos para aceros de alto Manganeso.**

**Las técnicas de la metodología fueron las siguientes:**

- **METALOGRAFIA.**
- **MICROSCOPIA OPTICA.**
- **TOMA DE DUREZAS.**

## **DISEÑO DE EXPERIMENTOS.**

### **PRUEBAS PRELIMINARES:**

Estos ensayos fueron hechos, buscando el comportamiento del material a ciertas temperaturas de homogenización a 900° C, 950° C, 1000° C y 1100° C, con diferentes tiempos de permanencia de 30, 60 y 90 minutos. A estas muestras se les aplicó un cordón de soldadura sin aporte para determinar las zonas de afectación de la temperatura y comportamiento de las estructuras previas. De estas pruebas se planteó la parte experimental de esta investigación.

## **CARACTERIZACION DE LA FALLA.**

**El primer experimento tuvo, como objetivo confirmar el tipo de falla y zona de incidencia. Dicho experimento consistió en:**

**Preparar siete muestras que fueron tratadas como se menciona en la metodología, de unas dimensiones de 30 mm.X 20 mm.X 15mm. A las cuales se les hizo las siguientes aplicaciones.**

**MUESTRA 1.- Material solubilizado a 1100°C por una hora de permanencia, empacado en carbono y posteriormente se le aplicó un cordón de soldadura sin aporte, y se le enfrió bruscamente en agua a temperatura ambiente.**

**MUESTRA 2.- Se preparó en forma semejante a la muestra 1, y se le aplicó un cordón de soldadura sin aporte y la extracción de calor después de la aplicación, se hizo con unas placas disipadoras de cobre, por contacto.**

**MUESTRA 3.- Se preparó en forma semejante a la muestra 1 y se le aplicó un cordón de soldadura sin aporte, y su extracción del calor se hizo al aire tranquilo o sin movimiento.**

**MUESTRA 4.- Se preparó semejante a la muestra 1, y se le aplicó dos cordones de soldadura sin aporte, el segundo sobre el primero; el calor se extrajo con placas disipadoras de cobre, por medio de contacto.**

**MUESTRA 5.-** Se preparó en forma semejante a la muestra 1, y se le aplicó un cordón de soldadura con material de aporte tipo Hadfield, y la extracción de calor se hizo con las placas de cobre como extractores.

**MUESTRA 6.-** Se preparó en forma semejante a la muestra 1, y se le aplicó un tratamiento térmico de 5 horas de permanencia a 600°C, y después se le aplicó un cordón de soldadura sin aporte, la extracción del calor se hizo con las placas de cobre.

**MUESTRA 7.-** Se preparó en forma semejante a la muestra 1, posteriormente se deforma en un 30% de reducción de área, y se le aplicó un cordón de soldadura sin aporte, para la extracción de calor se hizo con las placas de cobre por contacto.

Una vez realizados los experimentos, a todas las muestras se les hizo un estudio metalográfico, en el corte perpendicular al eje de la aplicación de soldadura, y también se realizó un mapeo de durezas desde el centro del cordón hasta el metal base, en la escala de Vickers con 2 kilos de carga. A las durezas obtenidas en cada subzona, se les promedió.

## **AFECCION DE LA TEMPERATURA.**

**El segundo experimento planteado, fué con el objetivo de observar como afecta la temperatura a la estructura metalúrgica del acero Hadfield.**

**La temperatura de homogenización de estos aceros de acuerdo a la literatura y a los experimentos preliminares es de 1100°C o mayores, sin embargo, el comportamiento de la estructura a temperaturas menores, a un tiempo determinado es el que se experimentará, ya que en los enfriamientos pasará por dichas temperaturas que son las que más influyen en sus propiedades físicas y mecánicas.**

**Se prepararon 8 muestras de aproximadamente 15mm X 15mm X 15mm, que se homogenizarón conforme a la metodología y se llevaron a un calentamiento a diferentes temperaturas de:**

300°C

400°C

500°C

600°C

700°C

800°C

900°C

1000°C

**durante 5 horas de permanencia, empacadas con grafito y posteriormente fueron enfriadas bruscamente en agua a temperatura ambiente.**

**A cada una de las probetas se les preparó para su estudio metalográfico y toma de durezas con Vickers con 2 kg. de carga.**

## VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.

El tercer experimento planteado fue con el objetivo de observar como se modifica la estructura metalúrgica del acero Hadfield, por medio de la velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) a través de diferentes medios de enfriamiento con severidad diferente.

Se prepararon 7 muestras de 12.5mm de diámetro y 12.5mm de longitud con un orificio central de 6.25mm de diámetro, donde se incertará un termopar. Todas las muestras se prepararon con el tratamiento de homogenización como se indicó en la metodología.

Un vez homogenizadas se calentarán cada una de ellas individualmente a  $1100^{\circ}\text{C}$  y se mantuvo a esta temperatura por 20 min. en una atmósfera de  $\text{CO}_2$  y posteriormente se enfriaron de la siguiente forma:

- Horno a  $300^{\circ}\text{C}$  por un tiempo de 10 minutos y posteriormente se enfrió en agua.
- Aire tranquilo, aire sin movimiento.
- Aire con movimiento.
- Aceite de temple a ( $150^{\circ}\text{C}$ )
- Agua a temperatura ( $92^{\circ}\text{C}$ )
- Aceite a temperatura ambiente ( $17^{\circ}\text{C}$ )
- Agua a temperatura ambiente ( $17^{\circ}\text{C}$ )

**El termopar que se uso fué de fierro constantan (55% Cu - 45%Ni), con punto de fusión de 1220°C, el termopar se conectó a un multímetro para medir milivolts.**

**TEMPERATURAS DE TERMOPAR.**

<b>m.v</b>	<b>Temperatura en °C</b>
5.3	100
10.8	200
16.3	300
21.8	400
27.4	500
33.1	600
39.1	700
44.8	800
50.5	900
56.2	1000
62.1	1100

Las muestras obtenidas se cortarán y se prepararon para su estudio metalográfico y mapeo de durezas en escala Vickers 2.

## PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.

El cuarto experimento planteado fué con el objeto de obtener el procedimiento de soldadura para este tipo de acero de alto Manganeso de estructura austenítica.

Se prepararon 2 muestras con la metodología de homogenización y se les aplicó dos cordones de soldadura.

La primera muestra se enfrió a 0°C y se aplicó un primer cordón de soldadura, después se midió la temperatura del cordón, con su consecuente medición de temperatura final.

La segunda muestra se enfrió a -20°C y se aplicaron ambos cordones como la probeta anterior y el mismo procedimiento.

La soldadura que se aplicó en ambas probetas es una soldadura según la norma AWS 5.13-80 tipo E-FeMn-A. Cuyo requerimiento químico es el siguiente:

	E-FeMn-a % Elemento	Electrodo Aplicado % Elemento
CARBONO	0.5 - 0.9	0.7
MANGANESO	11.0 - 16.0	13.0
NIQUEL	2.75 - 6.0	4.0

<b>CROMO</b>	<b>0.50</b>	<b>0.1</b>
<b>SILICIO</b>	<b>1.30</b>	<b>1.1</b>
<b>FOSFORO</b>	<b>0.03 Máx.</b>	<b>0.03</b>
<b>AZUFRE</b>	<b>0.04 Máx.</b>	<b>0.03</b>

**Las muestras obtenidas se prepararon metalográficamente para su estudio.**

## **RESULTADOS OBTENIDOS.**

**De las pruebas preliminares, fueron las que nos dieron el punto de inicio de las condiciones más uniformes de las cuales teníamos que partir para cada uno de los experimentos a realizar, estos resultados fueron:**

**Temperatura de austenitización para una homogenización de la estructura, es de 1,100°C.**

**El tiempo de calentamiento dependía de la masa a calentar, pero el tiempo de permanencia ideal fué de una hora.**

**por el tipo de material, el medio de enfriamiento más rápido fué el agua a temperatura ambiente.**

## **CARACTERIZACION DE LA FALLA.**

**El primer experimento nos mostró con la metalografía, que la discontinuidad revelada es:**

- **Una fisura a micro fisuras.**
- **localización sobre metal base, cerca de la línea de fusión**

**La metalografía de las siete muestras se describen, sus resultados en la Tabla IX.**

**Las fotografías de las muestras 1, 5, 6 y 3 nos ilustran la presencia de las fisuras en el metal base cercanas a la línea de fusión. (fotografías 2,3,4,y 5)**

**El ensayo de dureza muestra las diferentes durezas de las siete muestras, en las tres zonas en especial que son:**

- **Soldadura con y sin aporte.**
- **Zona afectada por el calor.**
- **Metal base.**

**Estos resultados se gráficaron y se muestran en la figura 7, así como la tabla la tabla X también muestra las durezas promedio de cada sub-zona de zona afectada por el calor de cada una de ellas.**

TABLE IX.

SUB-ZONAS DE LA Z.A.C.	MUESTRAS ENFRIAMIENTO EN AGUA	ENFRIAMIENTO EN COBRE	ENFRIAMIENTO EN AIRE TRANQUILLO	DOS CORDONES APLICADOS	MATERIAL DE APORTE	RECOCIDA A 600 °C	DEFORMADA EN FRIO 30 %
HIPERCRTICA SUPERIOR.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.	Carburos Inter-cristalinos rodeando a la Austenita.
HIPERCRTICA INFERIOR.	Microfisuras entre Cristales. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales y C. aciculares trans-cristalinos. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales con C. esféricas. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales. Carburos Inter-cristalinos que rodean a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales, C. esféricas trans-cristalinos. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.	Microfisuras entre Cristales con C. esféricas. Carburos Inter-cristalinos que rodean parcialmente a la Austenita.
ZONA DE REVENTIDO.	Escasos carburos inter-cristalinos	Escasos carburos inter-cristalinos	Carburos esféricos en planos preferenciales. Escasos Carburos inter-cristalinos	Escasos carburos inter-cristalinos	Escasos carburos inter-cristalinos	Carburos esféricos en planos preferenciales. Disolución parcial de carburos aciculares en los planos preferenciales.	Carburos Aciculares trans-cristalinos. Parcial desdoblamiento de líneas de deformación. Carburos acicular y esféricos, trans-cristalinos.
METAL BASE.	Cristales de Austenita.	Cristales de Austenita.	Cristales de Austenita.	Cristales de Austenita.	Cristales de Austenita.	Carburos Aciculares en abundancia trans-cristalinos.	Lineas de deslizamiento con carburos esféricos trans-cristalinos.



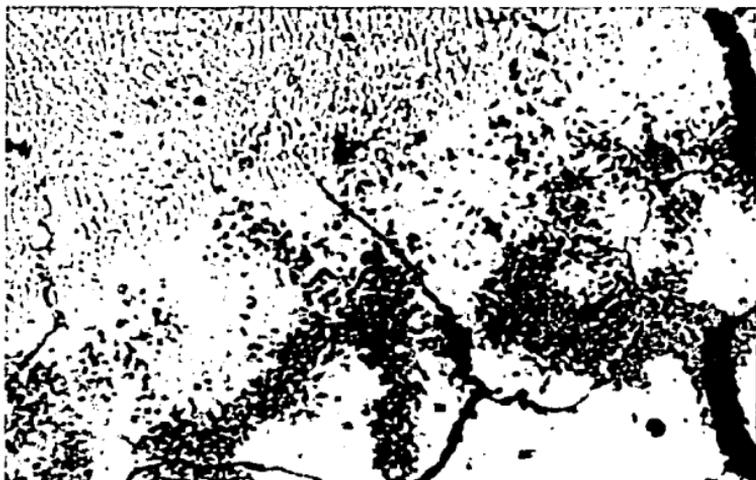
**Fotografía 2.- Zona afectada por el calor de la muestra  
enfriada en agua, después de ser soldada,  
presenta fisuras cerca de la línea de fusión.  
Tomada a 100X.**



**Fotografía 3.- Zona afectada por el calor de la muestra soldada con aporte, presenta fisuras intercrystalinas cerca de la línea de fusión. Tomada a 100X.**



**Fotografía 4.- Zona afectada por el calor de la muestra tratada a 600 °C, presenta fisuras intercrystalinas en metal base y zona de fusión. Tomada a 100X.**



**Fotografía 5.- Zona afectada por el calor de la muestra  
enfriada en aire tranquilo, presenta  
microfisuras cercanas a la línea de fusión  
intercristalinas. Tomada a 800X.**

FIGURA 7.- GRAFICA DE LA DUREZA PROMEDIO DE LA CARACTERIZACION DE LA FALLA. 54

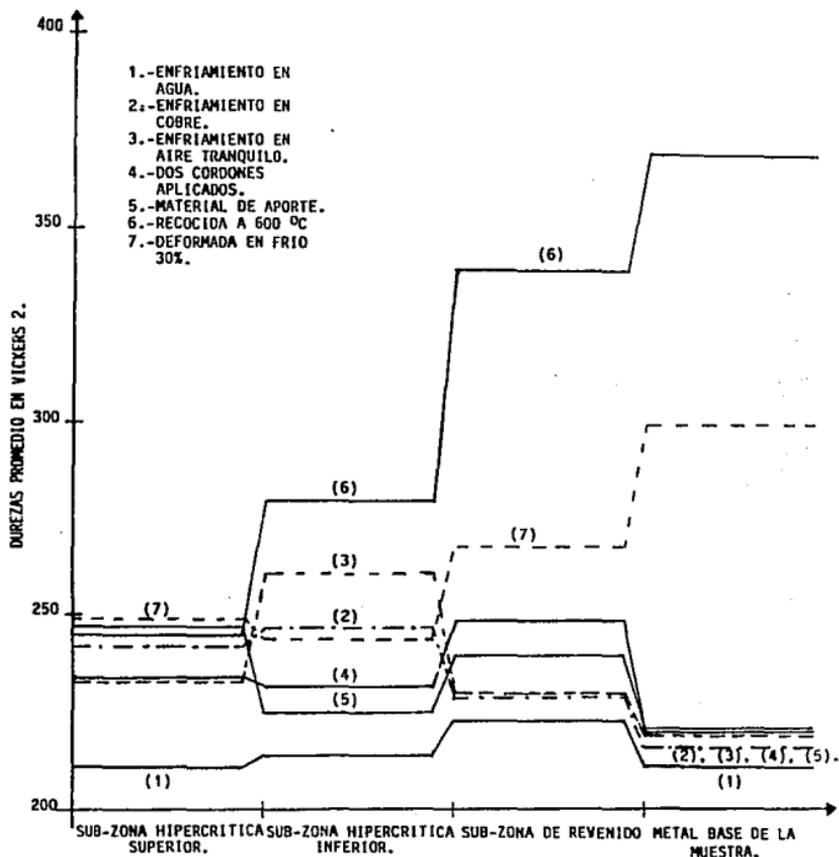


TABLA X .- DUREZAS PROMEDIO DE LAS DIFERENTES ZONAS DE LAS MUESTRAS SOLDADAS.

MUESTRAS SUB-ZONAS DE LA Z.A.C.	ENFRIAMIENTO EN AGUA	ENFRIAMIENTO EN COBRE	ENFRIAMIENTO EN AIRE TRANQUILO	DOS CORDONES APLICADOS	MATERIAL DE APORTE	RECOCIDA A 600 °C	DEFORMADA EN FRIO 30 %
HIPERCritica SUPERIOR.	211.0	242.3	233.2	234.3	247.0	241.3	247.0
HIPERCritica INFERIOR.	214.4	246.8	260.8	232.0	225.3	279.6	244.2
ZONA DE REVENIDO.	223.3	227.8	229.2	248.8	239.9	339.5	268.8
METAL BASE.	210.9	216.4	218.6	219.6	220.4	369.8	300.3
METAL BASE DE ORIGEN.	196.8	196.8	196.8	196.8	196.8	377.6	312.3

**En las microfisuras observadas a 1500 aumentos en las zonas de localización de dichas fracturas se encontró:**

**Fotografía n° 6: Fisura de la muestra 1 donde nos muestra, carburos transcristalinos y en la fisura carburos intercristalinos.**

**Fotografía n° 7: Fisura en la muestra 5 donde se observa la presencia de carburos intercristalinos, con escasos carburos transcristalinos.**

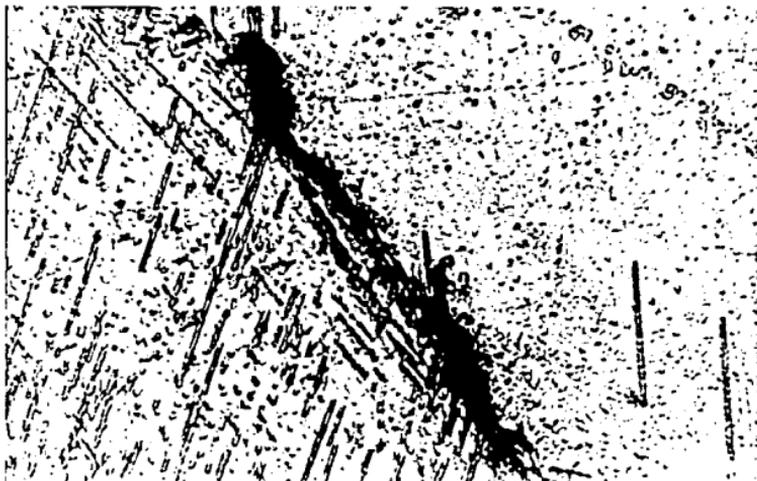
**Fotografía n° 8: Fisura en la muestra 3 donde se localizan carburos transcristalinos y carburos intercristalinos dentro de la fisura.**



**Fotografía 6.-** Microfisura con carburos intercristalinos fragmentados, carburos transcristalinos en planos preferenciales, de la muestra enfriada en agua. Tomada a 1500X.



**Fotografía 7.- Microfisura con carburos intercristalinos fracturados y carburos transcristalinos de la muestra con material de aporte. Tomada a 500X.**



**Fotografía 8.- Microfisura con carburos intercrystalinos fracturados y carburos transcristalinos en planos preferenciales. Muestra enfriada al aire. Tomada a 1500X.**

## **EFEECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ESTRUCTURA DEL ACERO HADFIELD.**

**Las ocho probetas ensayadas en condiciones iniciales semejantes, presentan cambios estructurales metalúrgicos de forma siguiente:**

**Probeta de 300°C.- Estructura austenítica como matriz y carburos no-continuos intercrystalinos y en pequeña cantidad.( fotografía n° 9 )**

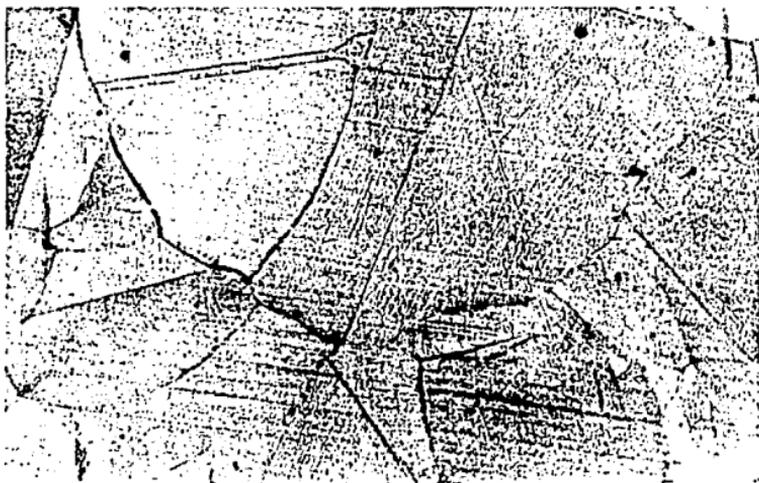
**Probeta de 400°C.- Matriz de austenita, carburos intercrystalinos continuos y carburos intracrystalinos aciculares.( fotografía n° 10 )**

**Probeta de 500°C.- Matriz austenítica, con gran cantidad de carburos aciculares intracrystalinos y carburos intercrystalinos continuos.(fotografía n° 11)**

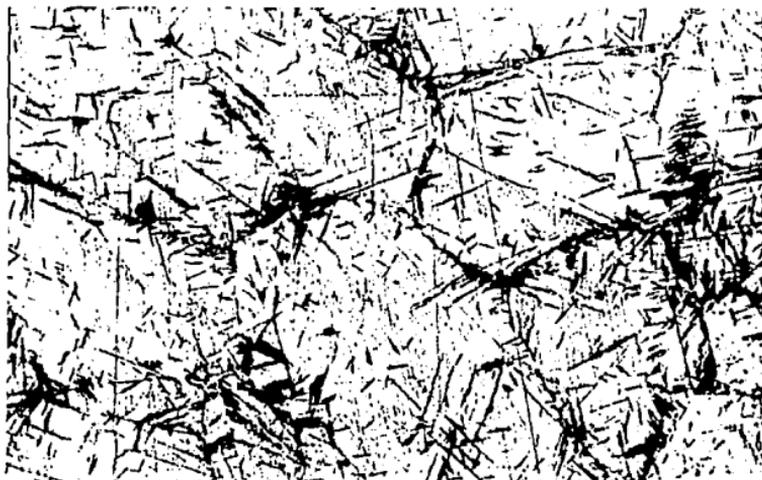
**Probeta de 600°C.- Carburos de austenita, carburos intercrystalinos y carburos aciculares en menor cantidad.( fotografía n° 12 )**

**Probeta de 700°C.- Matriz de austenita, rodeada de carburos intercrystalinos y carburos aciculares intracrystalinos.( fotografía n° 13 )**

**Probeta de 800°C.- Matriz de austenita, carburos intercrystalinos y carburos aciculares en menor cantidad.(fotografía n° 14)**



**Fotografía 9.- Microfotografía de la muestra tratada a 300°C.  
Tomada a 800X.**



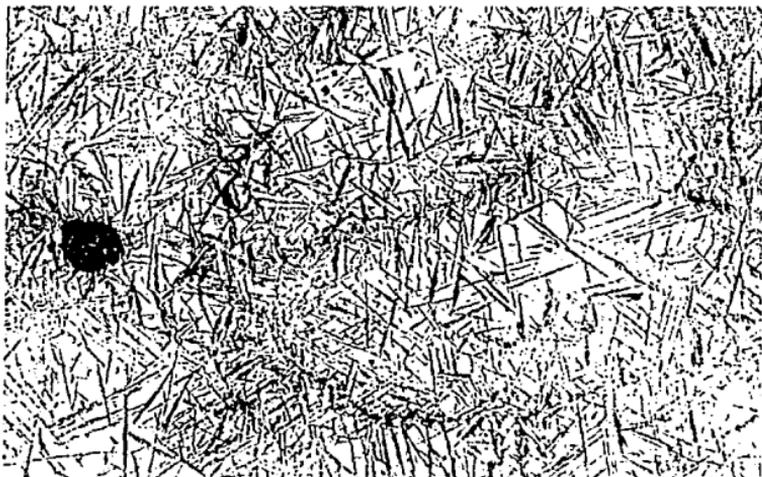
**Fotografía 10.- Microfotografía de la muestra tratada a 400°C. Tomada a 800X.**



**Fotografía 11.- Microfotografía de la muestra tratada a 500°C. Tomada a 800X.**



**Fotografía 12.- Microfotografía de la muestra tratada a 600°C. Tomada a 800X.**



**Fotografía 13.- Microfotografía de la muestra tratada a 700° C. Tomada a 800X.**



**Fotografía 14.- Microfotografía de la muestra tratada a 800°C. Tomada a 800X.**

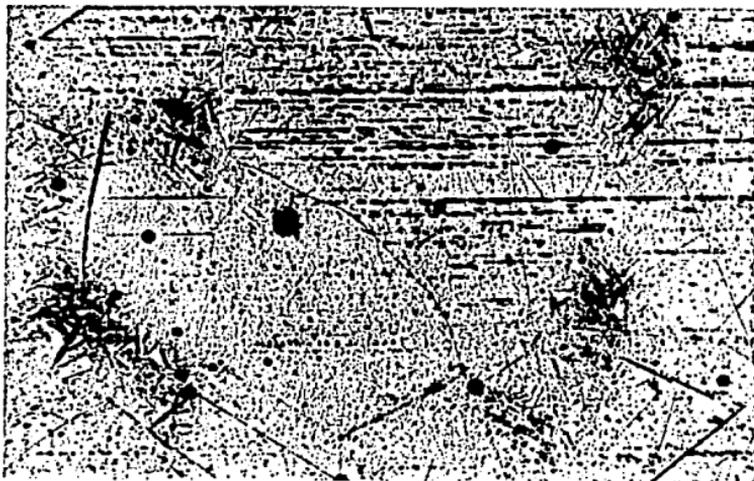
**Probeta de 900°C.- Matriz de austenita, con carburos intercrystalinos no-continuos.( fotografía n° 15 )**

**Probeta de 1000°C.- Matriz de austenita, con algunos carburos pequeños intercrystalinos.( fotografía n° 16 )**

**Los ensayos de dureza presentaron los siguientes resultados:**

<b>Probeta.</b>	<b>Dureza promedio. de 30 lecturas.</b>
<b>300°C</b>	<b>213 Vickers-2.</b>
<b>400°C</b>	<b>264 Vickers-2.</b>
<b>500°C</b>	<b>452 Vickers-2.</b>
<b>600°C</b>	<b>426 Vickers-2.</b>
<b>700°C</b>	<b>338 Vickers-2.</b>
<b>800°C</b>	<b>317 Vickers-2.</b>
<b>900°C</b>	<b>207 Vickers-2.</b>
<b>1000°C</b>	<b>195 Vickers-2.</b>

**Los cuales se gráficaron y se presentan en la figura 8.**

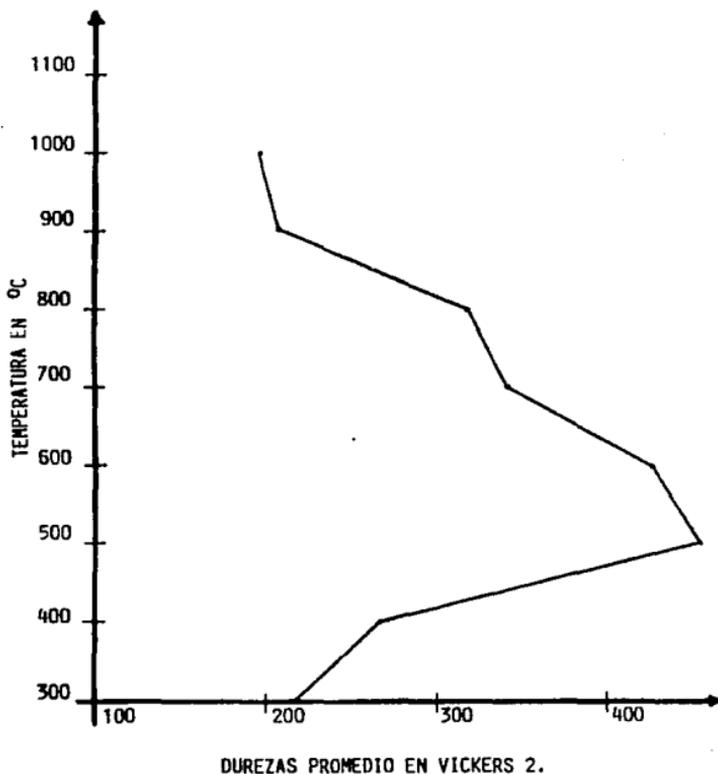


**Fotografía 15.- Microfotografía de la muestra tratada a 900°C. Tomada a 800X.**



**Fotografía 16.- Microfotografía de la muestra tratada a 1000°C. Tomada a 800X.**

FIGURA 8.- GRAFICA DE DUREZAS PROMEDIO, DE LAS ESTRUCTURAS OBTENIDAS POR EFECTO DE LA TEMPERATURA.



## **VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.**

**Las siete probetas ensayadas, en condiciones iniciales iguales, presentan cambios estructurales a las diferentes velocidades de enfriamiento.**

**Los resultados se muestran en la tabla XI; las estructuras que se consideran fundamentalmente son los carburos intercristalinos e intracristalinos, así como las fisuras presentes.**

**La fotografía n° 17.- Es de la muestra enfriada dentro del horno a 300°C.**

**La fotografía n° 18.- Es de la muestra enfriada en aire tranquilo.**

**La fotografía n° 19.- Es de la muestra enfriada en aire en movimiento.**

**La fotografía n° 20.- Es de la muestra enfriada en aceite a 150°C.**

**La fotografía n° 21.- Es de la muestra enfriada en agua a 92°C.**

**La fotografía n° 22.- Es de la muestra enfriada en aceite a 17°C.**

**La fotografía n° 23.- Es de la muestra enfriada en agua a 17°C.**

**Estas velocidades que se obtienen con el termopar y las lecturas en mV se gráfican en la figura 9.**

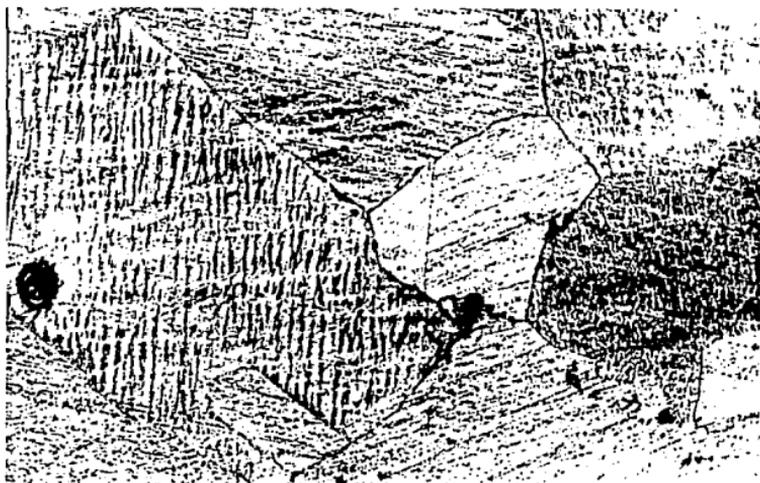
T A B L A X I .

CARACTERISTICAS	CARBURO	CARBURO	CARBURO	FISURA Y
MUESTRA	INTERCRISTALINO	INTERCRISTALINO ESFERICO	TRANSCRISTALINO ACICULAR	MICROFISURA
ENFRIADA EN HORNO A 300 °C.	Rodeando a los cris- tales de Austenita continuamente.		Abundantes y de di- ferentes tamaños.	Intercristali- nos.
ENFRIADA EN AIRE TRANQUILO.	Rodeando a los cris- tales de Austenita continuamente.	Escasos.	Existen.	Intercristali- nos.
ENFRIADA EN AIRE EN MOVIMIENTO.	Rodeando a los cris- tales de Austenita parcialmente.	Grandes e Irregulares.	Escasos, asociados a las irregularida- des.	Intercristali- nos.
ENFRIADA EN ACEITE A 150 °C	No-continuos.	Irregulares y Escasos.		Intercristali- nos.
ENFRIADA EN AGUA A 92 °C	Escasos.	Irregulares y Escasos		Intercristali- nos.
ENFRIADA EN ACEITE A TEMPERATURA AMBIENTE (17 °C).	Escasos.			Intercristali- nos.
ENFRIADA EN AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE (17 °C)	Muy escasos y pequeños.			

NOTA.- La matriz en todos los casos es de Austenita.



**Fotografía 17.- Microfotografía de la muestra enfriada en el horno a 300° C. Tomada a 600X.**



**Fotografía 18.- Microfotografía de la muestra enfriada en  
aire tranquilo. Tomada a 600X.**



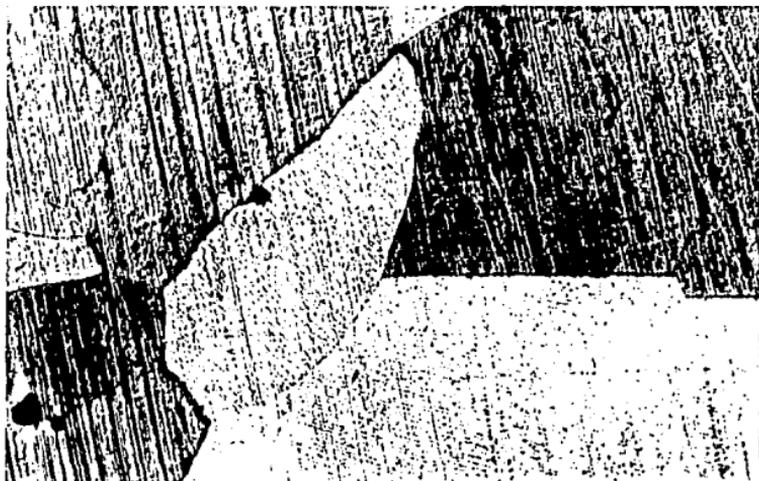
**Fotografía 19.- Microfotografía de la muestra enfriada en  
aire en movimiento. Tomada a 600X.**



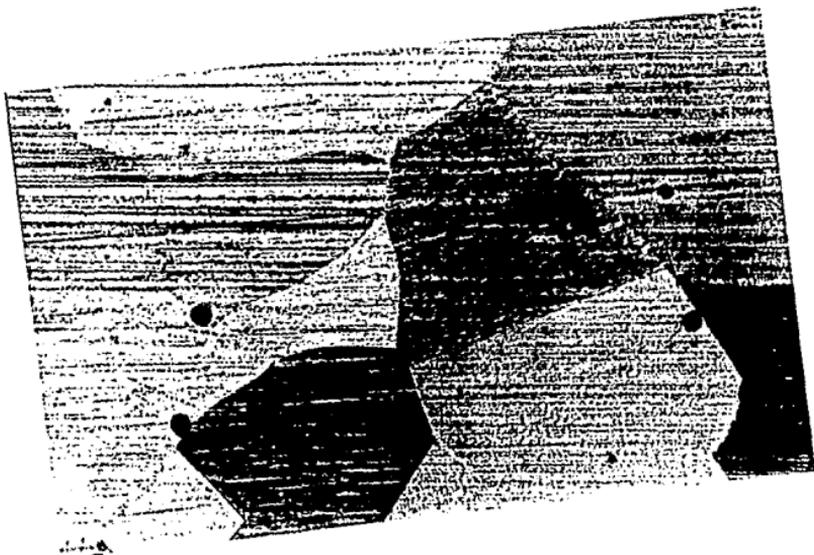
**Fotografía 20.- Microfotografía de la muestra enfriada en aceite a 150°C. Tomada a 600X.**



**Fotografía 21.- Microfotografía de la muestra enfriada en agua a 92°C. Tomada a 600X.**



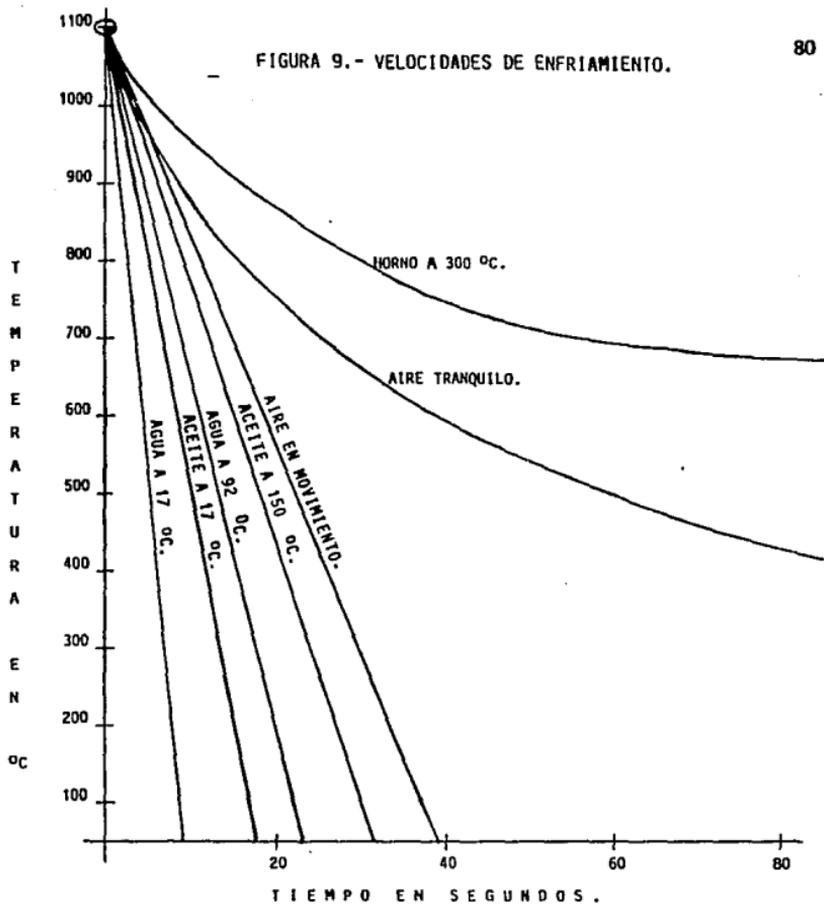
**Fotografía 22.- Microfotografía de la muestra enfriada en aceite a 17°C. Tomada a 600X.**



Fotografía 23.- Microfotografía de la muestra enfriada en agua a 17°C. Tomada a 600X.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FIGURA 9.- VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.



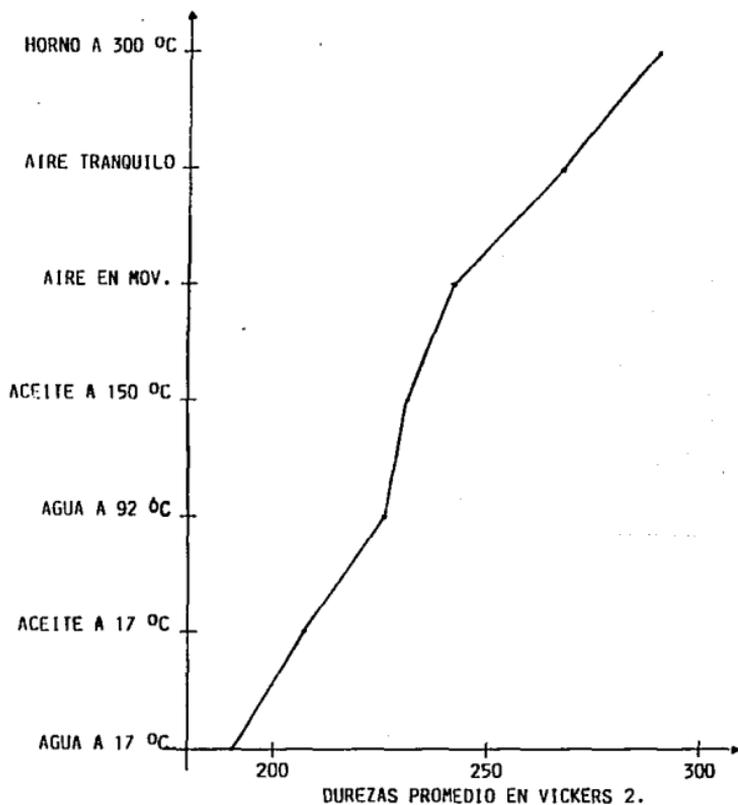
**La durezas obtenidas de las muestras, de velocidad de enfriamiento fueron las siguientes:**

	<b>Durezas promedio de 30 lecturas.</b>
<b>Horno a 300.°C</b>	<b>290 Vickers 2.</b>
<b>Aire tranquilo</b>	<b>268 Vickers 2.</b>
<b>Aire en movimiento</b>	<b>242 Vickers 2.</b>
<b>Aceite a 150°C</b>	<b>231 Vickers 2.</b>
<b>Agua a 92°C</b>	<b>226 Vickers 2.</b>
<b>Aceite a 17°C</b>	<b>207 Vickers 2.</b>
<b>Agua a 17°C</b>	<b>191 Vickers 2.</b>

**Estos resultados se gráficaron y se muestran en la figura 10.**

CONDICIONES DE ENFRIAMIENTO.

FIGURA 10.- GRAFICA DE DUREZAS PROMEDIO DE LOS MEDIO DE ENFRIAMIENTO.



## **PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.**

**En el cuarto experimento se obtuvieron los siguientes resultados: de la primera muestra, las temperaturas máximas después de la aplicación fueron:**

**Primer cordón - 125°C.**

**Segundo cordón - 136°C.**

**Del estudio metalográfico se obtuvo: cristales de austenita con carburos esféricos intracristalinos en planos preferenciales. También escasos carburos esféricos intercristalinos.( fotografía n° 24 ).**

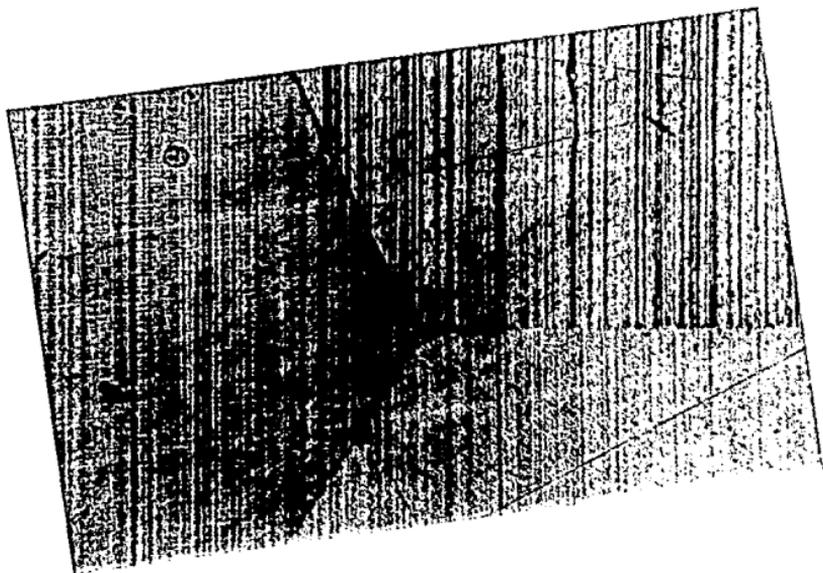
**La segunda muestra del estudio metalográfico, nos mostró bordes de cristal de austenita limpios, como los que presentan los cristales de homogenización de la fotografía I.( fotografía n° 25 ).**

**las temperaturas máximas después de la aplicación de los cordones fueron:**

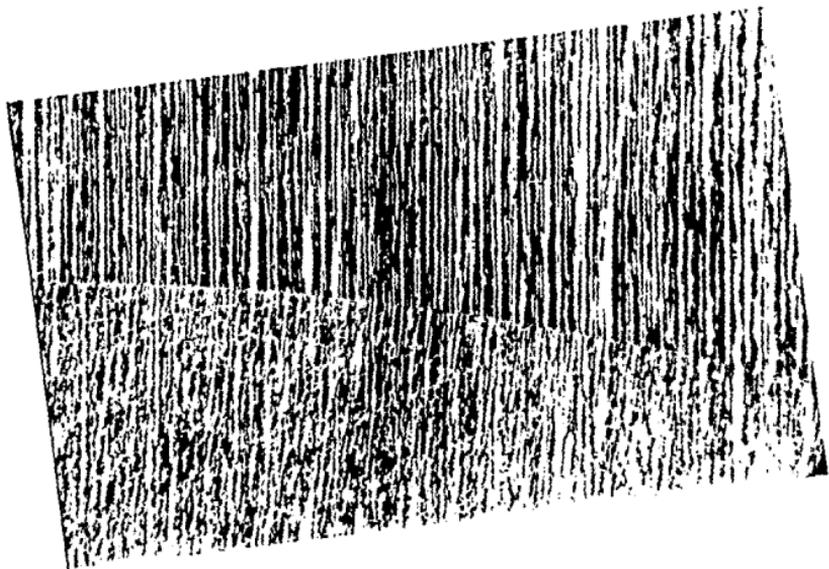
**Primer cordón - 30°C.**

**Segundo cordón - 33°C.**

**La fotografía n° 26 nos muestra el cordón de soldadura, la zona afectada por el calor y el material base ya sin fallas de fisuras en la sub-zona hipercrítica superior.**



Fotografía 24.- Microfotografía de la muestra soldada a cero grados centígrados. Cristales de austenita, con pequeños carburos esféricos intercrystalinos. Tomada a 1500X.



Fotografía 25.- Microfotografía de la muestra soldada a -20°C. Cristales de austenita, con bordes limpios de carburos Tomada a 1500X.



**Fotografía 26.- Panorámica del cordon y Z.A.C. del material soldado a -20°C. Tomada a 50X.**

## **DISCUSION DE RESULTADOS.**

**Las pruebas preliminares fueron la base para obtener la estructura fundamental de austenita de cristal basto, en estado meta-estable y cuyas condiciones se dieron favorables en:**

- 1100°C de calentamiento.**
- 1 hora de permanencia**
- Enfriamiento de temple en agua a temperatura ambiente.**

## CARACTERIZACION DE LA FALLA.

En el primer experimento para poder localizar las fisuras y microfisuras es necesario considerar que el metal base sufre un calentamiento isotérmico, en toda la zona afectada por el calor, y que existen temperaturas críticas teóricas del diagrama de equilibrio del afecto del Carbono en las estructuras de un acero Hadfield ( 21 pág. 196 ) y que cuyas temperaturas críticas  $A_{cm}$  y  $A_1$  en el material ensayado es de  $976^{\circ}\text{C}$  y  $650^{\circ}\text{C}$  respectivamente; con estas temperaturas podemos dar subdivisiones de la Z.A.C., señalaremos que las temperaturas alcanzadas por arriba de  $976^{\circ}\text{C}$  se denominará subzona hipercrítica superior, entre  $976^{\circ}\text{C}$  y  $650^{\circ}\text{C}$  hipercrítica inferior, entre  $650^{\circ}\text{C}$  y  $350^{\circ}\text{C}$  subzona de revenido, todo el material abajo de  $350^{\circ}\text{C}$  se puede considerar como metal base, ya que no presenta alteración por el efecto térmico.

En base a esta subdivisión de la afectada por el calor, podemos decir, a partir de las metalografías y la tabla VIII, que la subzona hipercrítica superior, la formación de carburos coherentes alrededor de los cristales de austenita se presentan en forma continua en todas las muestras ensayadas.

La presencia de fisuras y microfisuras en la subzona hipercrítica superior, se presentan en todas las muestras (tabla VIII y fotografías 2, 3, 4 y 5) sin embargo las microfisuras mostraron a 1500X presencia de carburos fracturados dentro de las microfisuras (fotografía 6, 7 y 8).

**En la subzona hipercrítica inferior, los carburos intercristalinos disminuyen su presencia y empiezan a aparecer algunos carburos intracristalinos en los planos preferenciales.**

**En un análisis de durezas se puede observar que de acuerdo a las condiciones iniciales de las muestras éste material manifiesta un gran cambio al efecto térmico y al trabajo mecánico de alto impacto ; sin embargo en la figura 7 y tabla IX nos muestran que el cambio de dureza en la zona hipercrítica superior e inferior los cambios de dureza no son muy significativos ya que las diferencias de 36 y 65 unidades no es demasiado. También es de hacerse notar que en la subzona hipercrítica inferior no se presentan fisuras o microfisuras.**

## **AFECTACION DE LA TEMPERATURA.**

**En este experimento de 8 muestras, nos muestran que el acero presenta una sensibilidad a la temperatura, sin embargo existe un rango donde el material sufre un gran cambio en su estructura que es de 400°C a 800°C.**

**La precipitación de carburos intercrystalinos y carburos transcrystalinos en planos preferenciales es de gran abundancia, que hacen que cambien las propiedades mecánicas radicalmente, esto se da de manifiesto en las fotografías 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 de los resultados.**

**Este fenómeno de cambio se ve corroborado con la gráfica de la dureza, tomadas en dichas muestras y gráficamente sus promedios.**

**Es notorio, como dependiendo de la temperatura la presencia de los carburos de manganeso empiezan a ser esféricos y pequeños, en la zona intercrystalina (300°C), hasta donde son masivos transcrystalinos (600°C), pasando por carburos continuos intercrystalinos, aciculares y escasos transcrystalinos, y abundantes y grandes transcrystalinos.**

**La matriz del acero se conserva básicamente de austenita.**

## VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

En este experimento donde se ve el efecto del tiempo con relación a la pérdida de temperatura en grados centígrados, nos mostró que la velocidad de enfriamiento influye en forma determinante en la estructura del material.

Cuando la pérdida de temperatura es lenta las estructuras de carburos y la existencia de fisuras se hacen presentes, como lo muestran las fotografías 17,18,19,20,21 y 22.

La cantidad y localización intercrystalina y transcrystalina de carburos, se ven influenciada por la velocidad de enfriamiento.

Es de notar que conforme se aumenta la velocidad de enfriamiento, la presencia de carburos transcrystalinos en planos preferenciales disminuye, sin embargo los carburos intercrystalinos siguen presentes y también disminuyen, pero son más consistentes, a pesar de altas velocidades de enfriamiento. También llama la atención la presencia de fisuras con el experimento de velocidades de enfriamiento.

En el análisis de durezas podemos constatar una función lineal entre los diferentes medios de enfriamiento cuyas velocidades son las siguientes:

Horno a 300°C	0.50 °C/seg.
Aire tranquilo	3.04 "

<b>Aire en movimiento</b>	<b>26.50</b>	<b>"</b>
<b>Aceite a 150°C</b>	<b>33.3</b>	<b>"</b>
<b>Agua a 92°C</b>	<b>44.4</b>	<b>"</b>
<b>Aceite a 17°C</b>	<b>50.0</b>	<b>"</b>
<b>Agua a 17°C</b>	<b>111.0</b>	<b>"</b>

**En la gráfica de la figura 10 se observa que conforme disminuye la velocidad de enfriamiento aumenta la dureza del material y viceversa.**

## **PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.**

**En el experimento del procedimiento de soldadura, nos mostró que en base a los anteriores experimentos, que conforme aumenta la velocidad de enfriamiento, se evita la precipitación de carburos en la zona intercrystalina de la austenita, ya que dicha precipitación en esta zona, es la más crítica para la formación de microfisuras y fisuras, en la sub-zona Hiper crítica Superior, en base a estas observaciones, lo pudimos constatar como lo muestran las fotografías 24,25 y 26.**

## CONCLUSIONES.

**En las pruebas preliminares el tipo de estructura inicial para cada uno de los experimentos posteriores, fué fundamental para observar los cambios estructurales y mecánicos de cada una de las muestras ensayadas.**

**La obtención de la estructura austenítica total sin estructuras extras, nos permitió tener un punto de referencia igual y reproducible para cada uno de los experimentos, de cada una de las muestras usadas.**

**La temperatura y el tiempo usado, fué la conclusión de la información y experimentación práctica, consultada y hecha físicamente con el equipo disponible.**

## **CARACTERIZACION DE LA FALLA.**

**El acero sufre un cambio radical en sus propiedades por el efecto térmico y mecánico, que se manifiesta en la toma de durezas, con respecto a la muestra inicial cuya dureza se encuentra entre 189-195 H.V.**

**Las fisuras y microfisuras se presentan en la zona adyacente a la línea de fusión, o sea en el metal base que no sufre fusión por el efecto del fenómeno de soldadura. En este lugar es donde la austenita sufre el mayor calentamiento por conducción del material fundido y la alta temperatura del arco de soldadura.**

**La formación de carburos de manganeso continuos y coherentes, que se precipitan alrededor de los cristales de austenita más cercanos a la línea de fusión, son los que sufren los esfuerzos generados, por la dilatación y contracción de la estructura austenítica.**

**Las fisuras formadas tienen una gran relación con los carburos intercristalinos que se forman alrededor de los cristales de austenita, y el efecto térmico que se genera con la introducción brusca de calor por el arco eléctrico del fenómeno de soldadura, así como la extracción del mismo por conducción del mismo metal y el efecto físico de la dilatación y contracción de la estructura austenítica.**

## **AFECTION DE LA TEMPERATURA.**

**Las estructuras resultantes son el efecto del tiempo de permanencia a una temperatura donde se permite la formación de los carburos en los diferentes puntos de energía, como son bordes de cristal en primer lugar y posteriormente en los planos de cristalización o preferenciales de la austenita.**

**La presencia de estos carburos es abundante entre 500°C y 600°C, en estas temperaturas es donde se localiza la mayor formación de ellos en forma masiva. Esto es más evidente con la gráfica de las durezas de dicho experimento.**

## **VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.**

**Los diferentes medios de enfriamiento que nos dan diferentes velocidades de enfriamiento, desde una temperatura de solubilidad, nos indica que existe una velocidad crítica de enfriamiento, donde vamos a evitar la formación de los carburos intercristalinos y así obtener como resultado uniones limpias entre los cristales de austenita. Esta velocidad mínima es la del agua a temperatura ambiente, esto se ve corroborado con la curva de las durezas de este experimento.**

## **PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.**

**El sobrecalentamiento a que se somete el metal base en la zona afectada por el calor, cuando se aplica la soldadura, es crítico para la formación de carburos intercrystalinos.**

**Cuando este sobrecalentamiento en la zona afectada por el calor, se evita por la extracción rápida de la temperatura, o se limita por un enfriamiento previo, la formación de carburos intercrystalinos se inhibe y por consiguiente se obtiene un estructura austenítica limpia y sana en las uniones intercrystalinas.**

**En general podemos decir que para un acero de alto manganeso, alto carbono tipo Hadfield, su falla y fractura catastrófica, así como su corrección de la misma se debe a:**

- La formación de fisuras y microfisuras que se presentan en la sub-zona hipercrítica superior de la zona afectada por el calor (Z.A.C.), del metal base. Estas se localizan cerca de la línea de fusión.**
- La formación de carburos de manganeso intercrystalinos, que cuando se hacen mas continuos y rodean más uniforme a los cristales de austenita, fragilizan más al metal.**

- Los fenómenos de dilatación y contracción de la austenita, ya que los coeficientes de los carburos y de la austenita son muy diferentes.
- Las tensiones generadas sobre los carburos por los efectos anteriores, que provocan la ruptura de ellos, que provocaran las fisuras y microfisuras intercrystalinas.
- La sensibilidad del material en el rango de temperaturas de 400°C a 600°C, donde estos materiales sufren cambios estructuras muy significativos.
- La velocidad de enfriamiento; que es fundamental para evitar la formación de los carburos intercrystalinos, por consiguiente debe de ser superior a los 111°C/seg.
- La temperatura inicial del material base, debe de ser la más baja posible, mínimo la temperatura ambiente.

Las dos últimas conclusiones son la base para desarrollar un procedimiento de soldadura.

## **INVESTIGACIONES FUTURAS.**

**Siguiendo una línea de investigación de soldadura y metalurgia sobre los aceros Hadfield, se propondrían los siguientes temas:**

- **Estructura previa del metal base.**
- **Efecto de los aleantes en el fenómeno de soldadura.**
- **Tipo de electrodos revestidos para soldar estos aceros.**
- **Calidad de los electrodos revestidos para soldar estos aceros.**
- **Tratamientos térmicos de solubilidad después de la soldadura.**

**BIBLIOGRAFIA.**

- 1.- Borik, F., W Scholz, Climax Molybdenum company, 1971.
- 2.- Tasker, J., Intermountain Minerals Symposium, 1982.
- 3.- Maratray, f., T. Norman, Climax Molybdenum Company, 1961.
- 4.- Hall R., American Society for Metals, 1966
- 5.- Gregory E., M. Bartle, The Welding Institute vol.3, 1980.
- 6.- Dodd J., Climax Molybdenum Company, 1975.
- 7.- Jackson J., Climax Molybdenum Company, 1981.
- 8.- Tomota Y., M. Strum y J. Morris, Metallurgical Transaction vol.18, p.p. 1073-1081, 1987.
- 9.- Adler P., G. Olson y W. Owen, Metallurgical Transaction A., vol.17A., p.p. 1725-1737, 1986.
- 10.- Doepken H., H. Chapin et. al., "Austenitic Manganese steel", vol. 4, p.p. 66.1-66.40, 5a. edición, American Welding Society, 1986.
- 11.- "Metal Handbook", vol. 9, p.p. 568-588, 9a. Edición, American Society For Metals, 1983.
- 12.- Borik F., W. Scholz, Journal of Materials, 1971.
- 13.- Fabert H., Symposium Materials for The Mining Industry, p.p. 163-168, 1974.
- 14.- Specification A-5.13-86, American Welding Society.
- 15.- "Guía de Aleaciones y Productos", Eutectic+Castolin, 1980.
- 16.- "Welding Cosumables", Kobe Steel, LTD. 1981.

- 17.- "Electrodos para Soldar", U.T.P. Industria Mexicana S.A. 1980.
- 18.- "Electrodos", Industrias Franco S.A. 1982.
- 19.- "Pocket Welding Guide", Hobart Brothers Company, 1980.
- 20.- "Electrodos y Soldaduras Especiales", Arc Weld, 1980.
- 21.- Welding Handbook, A.W.S., 4o. vol. 7a. Edición, p.p. 195-209, 1984.
- 22.- "Catálogo General de Productos", Champion-Hobart, 1982.
- 23.- "Fundamentals of Physical Metallurgy", John Verhoeven, John-Wiley y Son, Inc. 1989.
- 24.- "Alloying Elements in Steel", Edgar C. Bain, Harold W. Paxton, American Society for Metals, 1972.
- 25.- "Comparative Properties of Electrodes for arc Welding Austenitic Manganese Steel", H. I. Chapin, Welding Journal, 1968.
- 26.- "Manganese Steel, Hadfields". Oliver y Boyd, Welding Journal, 1966.
- 27.- "Austenitic Manganese Steel", T. E. Norman, D. V. Doane, A. Solomon, A.F.S. Transactions, 1975.
- 28.- "Austenitic Manganese Steel-Effect of Heat Treatment on Metallography and Mechanical Properties", K. J. Irvine, F. B. Pickering, Iron and Steel, 1976.

- 29.- "Tool Steel", 4a. Edición, George A. Roberts and Robert a. Cary, American Society for Metals, 1985.
- 30.- The Structures of Alloys of Iron, Hume-Rothery, Pergamon-Press, 1970.
- 31.- Howard S. Avery, Abex Corporation, 1987.
- 32.- Hirofumi Yoshimura, Yamada, Yada. Transactions I.S.I.J. vol. 16, 1988.
- 33.- Tomota, Strum and Morris, Metallurgical transactions A., vol. 18A, 1987.
- 34.- T. Kato, S. Fukui, Fujikura, Transactions Iron and Steel, vol. 16, 1986.
- 35.- T. Sasaki, K. Watanabe, K. Nonara, Transactions Iron and Steel, vol. 22, 1982.
- 36.- S. K. Wang and Morris, Metallurgical Transactions A. vol. 10A., 1979.
- 37.- Lee and Morris, Metallurgical Transactions A. vol. 10A., 1979
- 38.- "Metallography, Principles and Practice", Vander Voort, Mc. Graw-Hill, p.p. 212- 216, 1984.
- 39.- "Modern Welding Technology", Howard B. Cary, Prince-Hall, Inc., p.p. 666-671, 1981.
- 40.- K. J. Irvine, D. T. Liewellyn, F: B: Pickering, Journal of The Iron and Steel, 1971.