

# Estabilidad de la fase austenítica, variación de la dureza en los aceros al manganeso afectados por el calor y sometidos a impactos

Austenite phase stability, change in strength steels manganese in the heat affected and subject to impacts

**Juan Carlos Heredia\***

RECIBIDO: 10/10/2011 - APROBADO: 20/06/2012

---

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evalúa la influencia del calor en la estabilidad de la fase austenítica de los aceros al manganeso tipo Hadfield, con 12% manganeso. El análisis metalográfico y las pruebas de dureza se desarrolla en probetas de acero fundido ASTM A128 Grado E-1, en estado de temple (austenizado), y con diferentes temperaturas de calentamiento, desde 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C y 500 °C. Los resultados nos permitirán comprobar y establecer las máximas temperaturas en que la matriz austenítica es estable y mantenga sus excelentes propiedades mecánicas.

**Palabras clave:** Fase, Austenita, Temple, Aceros Hadfield, Metalografía, Manganeso

## ABSTRACT

This work evaluates the influence of heat on the stability of the austenite phase of Hadfield type manganese steel containing 12% Mn. Metallographic analysis and hardness testing are carried out in molten steel ASTM A128 Grade E-1 in a state of Temple (austenitized), at different heating temperatures like 100, 200, 300, 400 and 500 ° C. The results will allow us to verify and establish the maximum temperature for the austenitic matrix stability keeping also its excellent mechanical properties..

**Keywords:** Phase, austenite, Temple, Hadfield Steels, Metallography, Manganese.

---

\* Control de Calidad y Análisis de Fallas, Fundación Callao S.A. E-mail: jcheredia@funcal.com.pe

## I. INTRODUCCIÓN

El acero austenítico al manganeso fue desarrollado y patentado por Robert Hadfield, en Sheffield, Inglaterra, en 1883. La primera pieza de esta aleación se fabricó en los Estados Unidos de Norteamérica, y su producción industrial se inició ininterrumpidamente en 1906, específicamente en la “American Brake Shoes Foundry Company” (Samanez, 2006).

Estos aceros se caracterizan por su alta resistencia a la tracción, compresión, elevada tenacidad, elevada resistencia al desgaste, elevada resistencia al impacto y alta capacidad de endurecimiento por deformación en frío. Es considerado para condiciones de operación donde los componentes estén sometidos a severos impactos, abrasión, esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión.

Es una aleación no magnética que sustenta sus características mecánicas en su composición química, adecuado tratamiento térmico y estructura austenítica. Se obtiene generalmente por procesos de fundición, en hornos eléctricos de inducción.

Este acero es metaestable con solución sólida de carbono, silicio y manganeso en hierro gamma ( $\gamma$ ), por lo cual, la completa homogenización de la microestructura, y la disolución completa de complejos carburos, con diversa morfología, dependerá de la velocidad y efectividad del temple en agua con agitación. El tratamiento térmico se realiza en una temperatura que exceda en 50 °C la línea Ac<sub>m</sub> (Figura N.º 1), a 1050 °C, y el tiempo de estabilizado dependerá de los espesores del componente, parámetro muy sensible en esta aleación. La baja conductividad y la alta expansión térmica, en formas combinadas, producen excesivas gradientes térmicas y, por lo tanto, tensiones residuales que deben ser consideradas en los ciclos de tratamiento térmico.

### Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas promedio:

- Resistencia a la tracción: 120,000 - 130,000 psi
- Límite elástico: 55,000 - 60,000 psi
- Elongación: 35 - 45%
- Reducción de área: 30% - 40% (Samanez, 2006)

### 1.1 Elementos aleantes

Los elementos de aleación más frecuentes en los aceros Hadfield son el cromo, molibdeno y níquel.

**Carbono.-** Las mejores propiedades mecánicas se obtienen con un carbono entre 1.1%-1.3%. Con un contenido mayor, se promueve precipitados de carburos en los límites de grano. Con un contenido menor a 1.1%, se mejora la ductilidad, pero se reduce la resistencia a la abrasión. Con relación al tratamiento térmico, al incrementar el carbono, se debe de incrementar la temperatura de temple.

**Silicio.-** Entre 1 -2%, incrementa el límite elástico. Si se supera este rango, la resistencia a la tracción disminuye notablemente. Cuando su contenido es menor a 0.1%, disminuye la fluidez del metal durante la colada en moldes. Reduce la solubilidad del carbono en la austenita.

**Manganeso.-** Promueve y estabiliza la austenita.

**Cromo.-** Incrementa moderadamente el límite elástico. Cuando el contenido está alrededor de 2.5%, reduce la ductilidad con el incremento de carburos frágiles en la austenita. Con un alto contenido de carbono, se generan carburos insolubles.

**Molibdeno.-** Entre 0.5-2%, mejora la tenacidad, disminuye la formación de fisuras en caliente e incrementa el límite elástico. Retarda la precipitación de carburos frágiles durante el tratamiento térmico y en los casos de incremento de la temperatura por efecto de reparaciones con soldadura. Incrementa la capacidad de endurecimiento por deformación en frío. Uniformiza el tamaño de grano en piezas fundidas.

**Níquel.-** Entre 2-4%, tiene un efecto estabilizador de la austenita. Permanece en solución sólida. Evita la formación de láminas de carburos en un rango de temperaturas entre 300 a 500 °C. Se incrementa la ductilidad y el límite elástico disminuye.

Las impurezas a controlar son el fósforo y el azufre.

**Fósforo.-** Con un contenido mayor a 0.77%, la plasticidad a alta temperatura se reduce, y es sensible a las rajaduras en caliente. El alto contenido de fósforo contribuye a generar segregaciones, propiciando zonas frágiles.

**Azufre.-** No tiene efecto negativo en las propiedades del metal. El exceso de manganeso lo neutraliza, y lo mantiene como inclusiones, rodeada de MnS.

En combinación con el carbono, cromo y hierro, el manganeso puede formar distintos carburos, como; Mn<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Mn<sub>5</sub>C<sub>2</sub>, Mn<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Mn<sub>15</sub>C<sub>5</sub>, (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Para el acero Hadfield estándar, se presentan (Fe, Mn)<sub>3</sub>C, y típicamente, Mn<sub>3</sub>C.

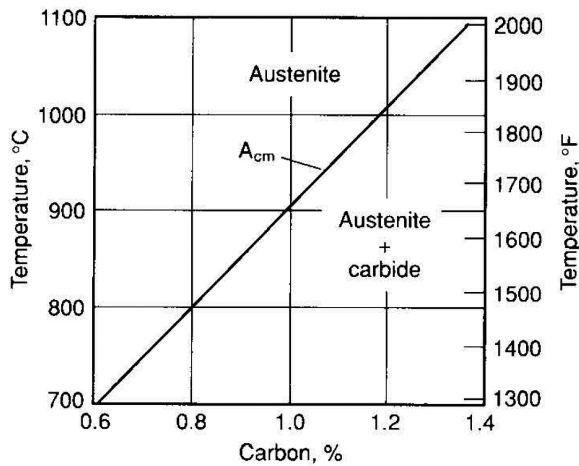


Figura N.º 1. Solubilidad del carbono (0.6-1.4% C) en un acero Hadfield con 13% Mn.

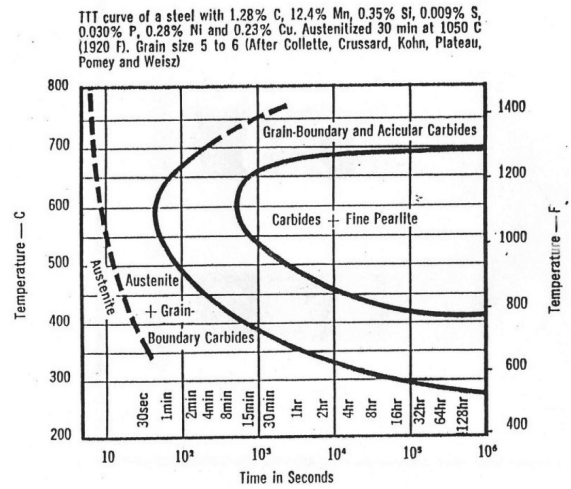


Figura N.º 2. Curvas de transformación isotérmica para un acero al manganeso tipo Hadfield.

**II. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Para el presente trabajo la metodología utilizada fue experimental. Se diseñó el procedimiento para simular las condiciones más reales de trabajo de este material, y es el siguiente:

Fundir las probetas indicadas en la aleación requerida, tratarlas térmicamente según los ciclos establecidos, realizar el análisis metalográfico en cada una de ellas, someterlas a sucesivos impactos y verificar la dureza final en cada muestra.

Se obtienen las seis probetas necesarias para la investigación, mediante proceso de fundición, según la norma ASTM A128 Grado E-1 para la aleación (Tabla N.º 1) y la norma ASTM A781 para el diseño de la probeta (Figura N.º 3).

Tabla N.º 1. Requerimiento químico

Grade <sup>A</sup>	Composition, %						
	Carbon	Manganese	Chromium	Molybdenum	Nickel	Silicon	Phosphorus
A <sup>B</sup>	1.05-1.35	11.0 min	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-1	0.9 -1.05	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-2	1.05-1.2	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-3	1.12-1.28	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-4	1.2 -1.35	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5	...	...	1.00 max	0.07 max
D	0.7 -1.3	11.5-14.0	...	...	3.0-4.0	1.00 max	0.07 max
E-1	0.7 -1.3	11.5-14.0	...	0.9-1.2	...	1.00 max	0.07 max
E-2	1.05-1.45	11.5-14.0	...	1.8-2.1	...	1.00 max	0.07 max
F (J91340)	1.05-1.35	6.0-8.0	...	0.9-1.2	...	1.00 max	0.07 max



Figura N.º 3. Una vez obtenidas las probetas, las caracterizamos.

## 2.1. Composición química

La muestra se analiza con el espectrómetro de emisión óptica ARL Metals Analyzer, obteniendo el siguiente resultado:

Tabla N.º 2. Resultados del espectrómetro de emisión óptica

27/03/2012 2:09:18 PM Muestra: ING.J.C. · 1

Programa: FEMNST Tarea: FEMNST

Nº	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Sn	Al	FE%	N
1>	1.150	0.384	0.0020	0.0249	12.842	0.069	0.192	0.864	!0.000	0.058	0.006	0.047	84.35	0.0123
2>	1.135	0.377	0.0016	0.0229	12.737	0.069	0.189	0.836	!0.000	0.058	0.006	0.047	84.51	0.0139
Med	1.143	0.380	0.0018	0.0239	12.789	0.069	0.190	0.850	!0.000	0.058	0.006	0.047	84.43	0.0131
Ed	0.010	0.005	0.0003	0.0014	0.075	0.000	0.002	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.11	0.0011
Ed%	0.895	1.259	19.1067	5.9642	0.585	0.112	1.015	2.327	0.000	0.375	0.547	0.692	0.13	8.6193

## 2.2. Tratamiento térmico

Las probetas (todas) son tratadas térmicamente a una temperatura de austenización de 1050 °C durante dos horas, y luego enfriadas rápidamente hasta temperatura ambiente en agua agitada, la cual tiene una temperatura no mayor a 22 °C.

Luego, numeramos cada una de ellas, del uno al seis.

A continuación, sometemos a etapas de calentamiento a las probetas, desde la N.º 2, hasta la N.º 6, con intervalos de 100 °C, de manera independiente, según la lista:

## 2.3. Probetas

N.º 1. T. T. Temple (Austenizado)

N.º 2. T. T. Temple + Calentamiento 100 °C x 2 horas

N.º 3. T. T. Temple + Calentamiento 200 °C x 2 horas

N.º 4. T. T. Temple + Calentamiento 300 °C x 2 horas

N.º 5. T. T. Temple + Calentamiento 400 °C x 2 horas

N.º 6. T. T. Temple + Calentamiento 500 °C x 2 horas



Figura N.º 4. 1100 °C, 2 horas enfrías en agua agitada, Tº calentamiento enfrías al medio ambiente.

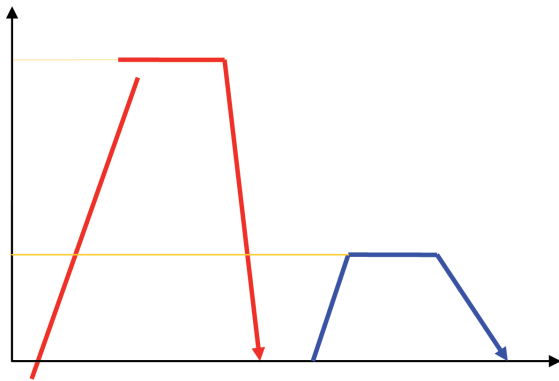
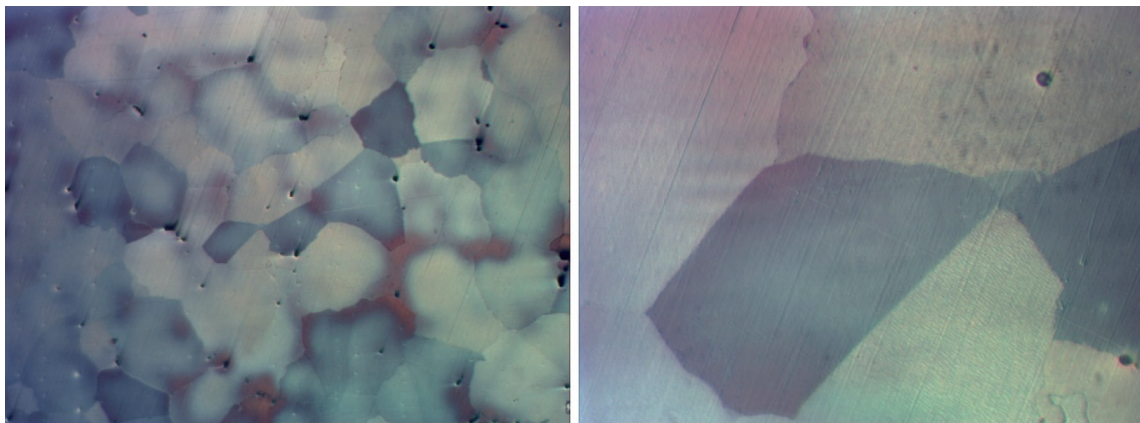


Figura N.º 5. Ciclos de tratamiento térmico de temple, y calentamiento a diferentes temperaturas.

#### 2.4. Ensayo metalográfico

Obtenemos las muestras para el análisis, según ASTM E3-01, de cada una de las seis probetas tratadas térmicamente. Se preparan y atacan con nital al 3%, para su observación con el microscopio óptico “Metallurgical Microscope L2003/L2030”, y se estudian a 100 y 600 aumentos, obteniendo las siguientes fotomicrografías (ver fig. 6,7,8,9,10 y 11).

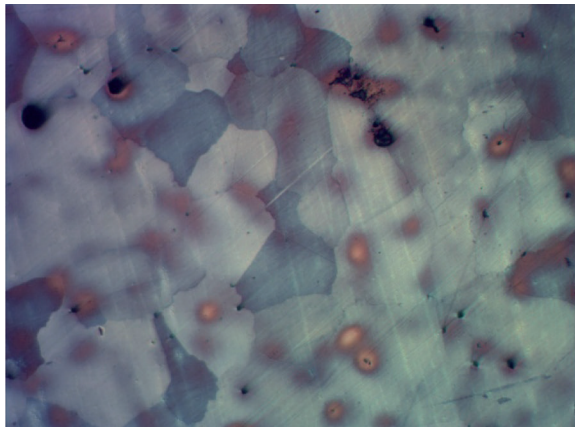


100X

600X

Figura N.º 6. Muestra N.º 1 T. T. Temple (austenizado).



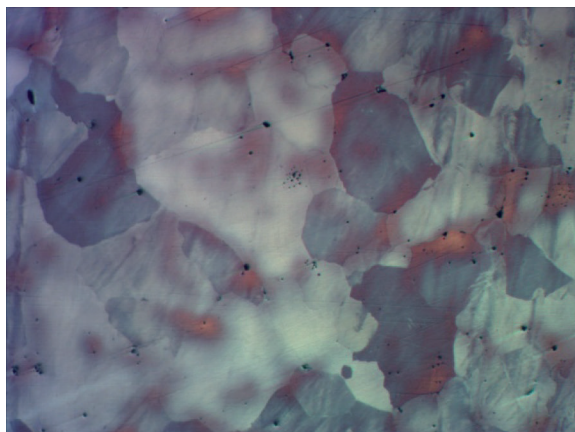


100X



600X

**Figura N.º 7.** Muestra N.º 2. T. T. Temple + Calentamiento 100 °C x 2 horas.

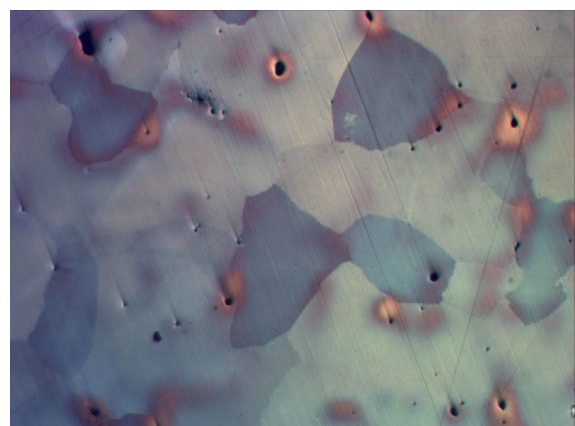


100X

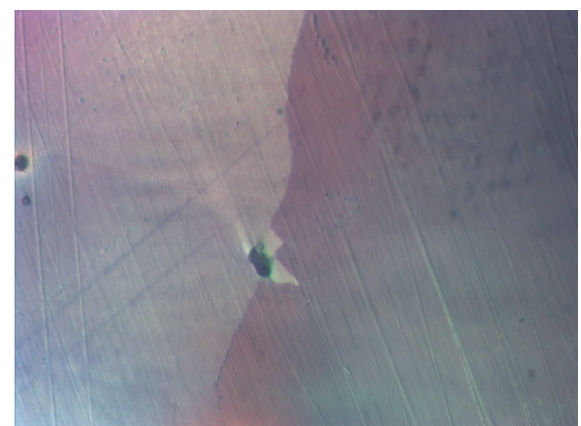


600X

**Figura N.º 8.** Muestra N.º 3 T. T. Temple + Calentamiento 200 °C x 2 horas.

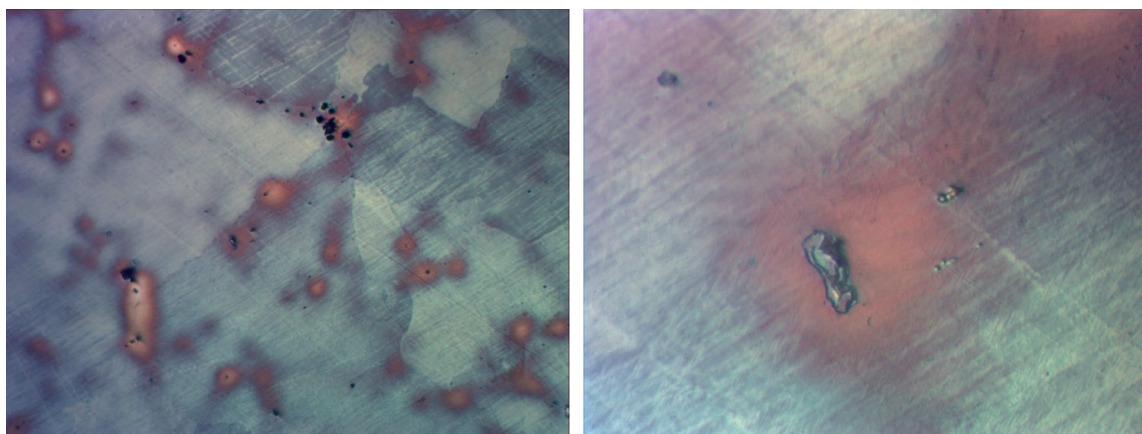


100X



600X

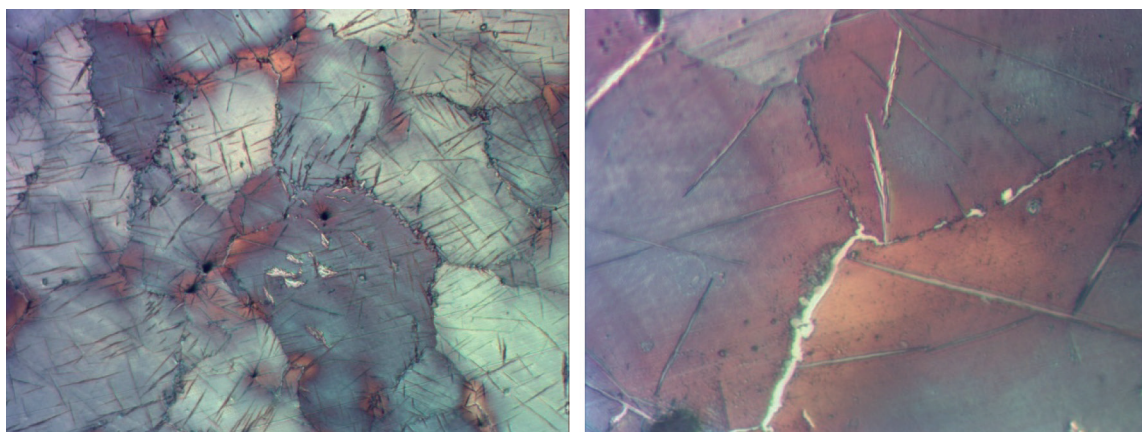
**Figura N.º 9.** Muestra N.º 4 T. T. Temple + Calentamiento 300 °C x 2 horas.



100X

600X

Figura N.º 10. Muestra N.º 5 T. T. Temple + Calentamiento 400 °C x 2 horas.



100X

600X

Figura N.º 11. Muestra N.º 6. T. T. Temple + Calentamiento 500 °C x 2 horas.

## 2.5. Correlación: dureza y número de impactos en probetas

Las seis probetas con diferentes ciclos de tratamiento térmico son sometidas a una deformación plástica de la superficie, por medio de impactos realizados con una bola de molino de  $\varnothing$  5 pulgadas, con un peso de 7 kg, y una dureza de 58 HRC, desde una altura de 100 cm.

Inicialmente registramos la dureza superficial de todas las muestras sin impacto (0). Posteriormente aplicamos secuencias de 20 impactos, hasta completar un número de 100. En cada etapa, registramos la dureza de la superficie deformada, las cuales se presentan la Tabla N.º 3 y la Figura 12.

El ensayo de dureza lo realizamos con un durómetro portátil Equotip Proceq Tipo D.

Tabla N.º 3. Dureza HB

CORRELACIÓN DUREZA / N° IMPACTOS EN PROBETAS							
PROBETA N°	NÚMERO DE IMPACTOS - PROMEDIO DE 5 TOMAS						DUREZA
	0	20	40	60	80	100	
1	170	300	350	484	510	522	HB
2	178	350	434	488	512	518	
3	163	372	458	480	500	524	
4	156	386	456	478	518	526	
5	158	400	486	460	522	524	
6	160	420	480	495	520	522	

### Dureza HB

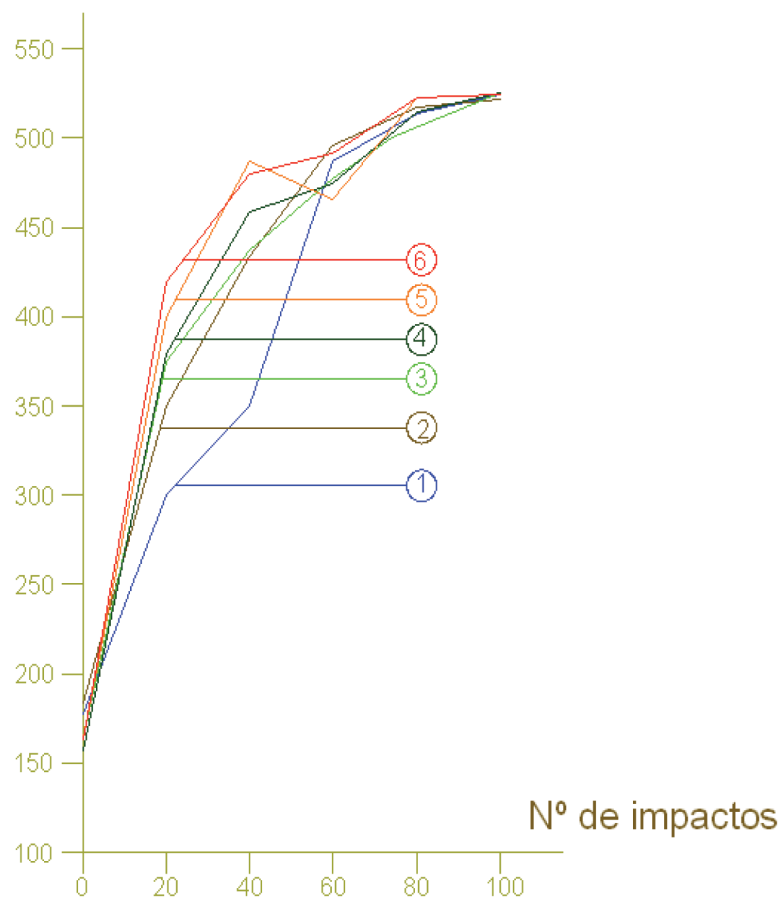


Figura N.º 12. Número de impactos.

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Composición química

El resultado nos muestra un porcentaje de níquel (0.069%), cromo (0.19%), y la diferencia del contenido de molibdeno (-0.05%), en el acero al manganeso, es irrelevante. El adecuado tratamiento térmico realizado garantiza el completo austenizado, y la posible

formación y precipitado de carburos de cromo. [Ver Tabla N.º 2.](#)

#### 3.2. Ensayo metalográfico

La microestructura de la muestra N.º 1, referencial para todos los ensayos, muestra una matriz 100% austenítica, con un tamaño de grano entre 2 a 3, según ASTM E 112 (7).



Se resume el resultado de la evaluación metalográfica de todas las probetas, tratadas a diferentes temperaturas en la siguiente Tabla N.º 4.

Tabla N.º 4. Evaluación metalográfica

MUESTRA N°	TAMAÑO DE GRANO ASTM E 112	ESTABILIDAD DE AUSTENITA	PRECIPITADO DE CARBUROS	PRESENCIA DE FERRITA Y PERLITA
1	2 A 3	SI	NO	NO
2	2 A 3	SI	NO	NO
3	2 A 3	SI	NO	NO
4	2 A 3	SI	NO	NO
5	2 A 3	NO	GLOBULARES TRANSGRANULARES	SI
6	2 A 3	NO	ACICULARES EN LÍMITE DE GRANO Y ACICULARES TRANSGRANULARES	SI

A temperaturas superiores a 400 °C, se observan precipitados de carburos globulares en los granos austeníticos. A 500 °C, se observan carburos aciculares transgranulares, y en los límites de grano.

### 3.3. Ensayo de correlación de dureza y número de impactos

En el Tabla N.º 3 apreciamos los resultados del ensayo. Se explica en detalle tomando como referencia a las probetas N.º 1 y N.º 6, por tener las condiciones extremas de tratamiento térmico.

La N.º 1 muestra un incremento de dureza de 170 a 522 HB luego de 100 impactos.

La dureza de las muestras sin impacto decrece en 10 puntos HB entre la N.º 1 y la N.º 6.

La dureza de las muestras con 20 golpes varía en 120 puntos HB entre la N.º 1 y la N.º 6.

La dureza de la N.º 1 en los primeros 20 impactos, varía en 130 puntos HB.

La dureza de la N.º 6 en los primeros 20 impactos, varía en 260 puntos HB. Esto se debe al precipitado de carburos evidente en la metalografía.

Todas las probetas muestran un incremento de dureza en la superficie deformada, desde la N.º 1, con tratamiento térmico de temple, hasta la N.º 6, con temple, y calentamiento a 500 °C por dos horas.

## IV. CONCLUSIÓN

Los aceros al manganeso tipo Hadfield sometidos a calentamiento hasta los 500 °C mantienen sus propiedades de autoendurecimiento al ser deformados plásticamente en la superficie.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM (1993). Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. 10 th ed. Volume 1. USA: ASTM International Handbook Committee.
2. ASM Handbook (1985). Metallography and Microstructures. Volume 9. USA: ASTM International Handbook.
3. ASTM International (1998). Standard Specification for Steel castings, Austenitic Manganese USA: American Society for Testing and Materials. Designation: A128/A128M-93
4. ASTM International. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel products. USA: American Society for Testing and Materials. Designation: A370 - 03a.
5. ASTM International. Standard Specification for castings, Steel and Alloy, Common Requirements, for General Industrial Use. USA: American Society for Testing and Materials. Designation: A 781/A 781M - 04a.

6. ASTM International. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. USA: American Society for Testing and Materials. Designation: E3-01.
7. ASTM International. Standard Methods for Determining Average Grain Size. USA: American Society for Testing and Materials. Designation: E112-96.
8. Samanez V., César (2006). Acero al manganeso. Colegio de Ingenieros del Perú.