

*Universidad Tecnológica Nacional*  
*Facultad Regional Villa María*

*Ingeniería Mecánica - Materiales Metálicos*

*Trabajo Práctico 2-02*

*Grupo DEL RÍO:*

- *Abregú, Iván.*
- *Antico, Rodrigo.*
- *Brussa, Julián.*
- *Cabral, Franco.*
- *Cárdenas, Felipe.*
- *Cardozo, Martín.*
- *Córdoba, Nathan.*
- *Cucco, Ramiro.*
- *del Río, Juan.*
- *Guerini, Nazareno.*
- *Medina, Ivo.*
- *Ortiz, Gastón.*
- *Picos, Elías.*
- *Quinteros, Lautaro.*

*Docentes:*

- *Dr. Lucioni, Eldo José.*
- *Ing. Victorio Vallaro, Juan Manuel.*

# Índice

<b>1. Cálculo de fluencia y dureza con ecuación de Hall-Petch.</b>	<b>4</b>
1.1. Datos principales. . . . .	4
1.2. Cálculo de la fluencia. . . . .	5
1.3. Cálculo de la dureza. . . . .	6
1.4. Conclusión. . . . .	7
<b>2. Soldabilidad de los materiales.</b>	<b>7</b>
2.1. AWS. . . . .	8
2.2. IIW. . . . .	8
2.3. Soldabilidad de los materiales por el método AWS. . . . .	8
2.3.1. Material 1. . . . .	8
2.3.2. Material 2. . . . .	8
2.3.3. Material 3. . . . .	9
2.4. Soldabilidad de los materiales por el método IIW. . . . .	9
2.4.1. Material 1. . . . .	9
2.4.2. Material 2. . . . .	9
2.4.3. Material 3. . . . .	9
2.5. Conclusión. . . . .	9
2.6. Parametro critico del metal (Pcm). . . . .	10
<b>3. Cálculo de dureza Brinell.</b>	<b>10</b>
3.1. Modelos empíricos: . . . . .	10
<b>4. Deslizamiento de bordes de grano y de dislocaciones.</b>	<b>11</b>

## Resumen

### TEMAS TRATADOS EN EL PROBLEMA.

- Tamaño de grano.
- Micrografía.
- Relación resistencia-dureza.
- Relación resistencia-tamaño de grano.
- Carbono Equivalente (CE) y Parámetro Crítico del Material (PCM).
- Soldabilidad.
- Deslizamiento de dislocaciones y de grano.

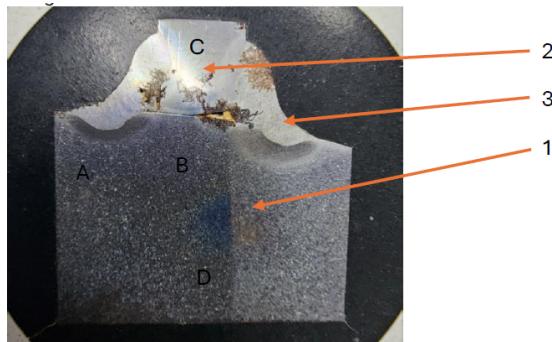
### REQUERIMIENTOS:

- Tomar imágenes metalográficas de la probeta en el laboratorio de materiales de la facultad en los puntos indicados para cada equipo (la probeta se entregara pulida con alúmina, cada equipo debe decidir el reactivo para el ataque y el tiempo de ataque.)
- Obtener el valor de resistencia para la muestra usando el modelo físico matemático de Hall-Petch (ORIENTACIÓN 001).
- Obtener el valor de dureza para la muestra usando la extensión del modelo físico matemático de Hall-Petch (ORIENTACIÓN 001).

- Determinar la soldabilidad de cada uno de los materiales empleando las expresiones de la American Welding Society (AWS) y del Instituto Internacional de Soldadura (IIW). (ORIENTACIÓN 002).
- Analizar la soldabilidad de los materiales y las diferencias que se ven en la macrografía provista. (ORIENTACION 3).
- ¿Para qué se usa el parámetro crítico del metal ( $P_{cm}$ ) adoptado por la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura? ¿Cuál es su expresión? (No es necesario que efectúe el cálculo).
- Calcular la resistencia a la tracción a partir de los modelos empíricos que relacionan resistencia con dureza. (ORIENTACIÓN 4).
- Analizar la presencia del fenómeno de deslizamiento de dislocación versus el fenómeno de deslizamiento de borde de grano. (ORIENTACIÓN 5).

#### DATOS:

- Cada equipo debe seleccionar un punto e informar su decisión por correo, no pueden existir dos equipos con el mismo punto A, B, C, D.
- Imagen:



- Composición química material 1:

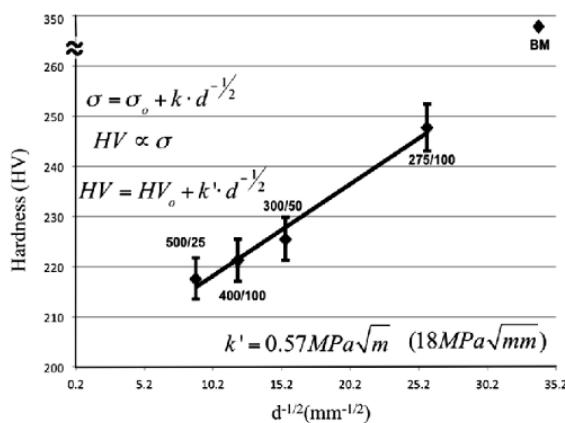
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %
0,455	0,231	0,745	0,005	0,003	0,041	0,007	0,037

- Composición del material 2: acero IRAM 1020.
- Composición del material aporte, web: [esab-ok-autrod-12-51/](http://esab-ok-autrod-12-51/)
- $HV_0$  = obtenerla con el durómetro en la zona no tratada.
- $\sigma_0$  = obtenerlo de la hoja técnica del acero que corresponda por hoja técnica.
- $d$  = medirla con el microscopio.
- modelo físico matemático:
  - $\sigma_y$  = usar el modelo de Hall Petch.
  - $HV_0$  = usar el dato medido en alguno de los durómetros del laboratorio.

#### ORIENTACIONES:

#### ORIENTACIÓN 001: Emplear la técnica del paper de referencia:

- Artículo científico: Baker, B.; Menon, E.; Mcnelley, T.; Brewer, L.; El-Dasher, B.; Farmer, Joseph, C.; Torres, S.; Mahoney, M.; Sanderson, S. (2014). Processing-Microstructure Relationships in Friction Stir Welding of MA956 Oxide Dispersion Strengthened Steel. *Metallurgical and Materials Transactions E*. 1. 1-13. DOI: [10.1007/s40553-014-0033-6](https://doi.org/10.1007/s40553-014-0033-6). Sitio Web: [researchgate](https://www.researchgate.net/publication/263705000).
- Último párrafo de la Sección IV + la Figura 14:  
Cuando los datos de dureza actuales se trazan frente a la raíz cuadrada inversa del tamaño de grano del material de la zona de agitación, se observa una gráfica relativamente lineal para cuatro de las condiciones de FSW (Figura 14). Esta relación lineal sugiere la relación Hall-Petch que describe la conexión entre el tamaño del grano y el límite elástico en materiales cristalinos. Por el contrario, la dureza del material base es mucho mayor y no cae en esta línea de regresión lineal. Se reconoce que la dureza es una medida de la resistencia al flujo plástico de un material y, por lo tanto, es una función tanto del límite elástico como del endurecimiento por deformación. Un trabajo reciente de Baker et al. Ha realizado experimentos reales de tracción uniaxial en material extraído de la zona de agitación. El límite elástico a temperatura ambiente del material de la zona de agitación sigue, de hecho, una relación de Hall-Petch. La principal diferencia en el límite elástico a baja temperatura entre el material base y el material de la zona de agitación; por lo tanto, se debe al engrosamiento de las partículas de itrio-óxido de aluminio en el material con la correspondiente pérdida en la fuerza de dispersión. Esta pérdida de fortalecimiento por dispersión es la razón por la que el valor de dureza del material base no cae en la línea Hall-Petch de la Figura 14. Se pueden encontrar más detalles sobre la evolución de estos óxidos y su impacto en el comportamiento a tracción del material de soldadura en otros trabajos recientes. Por Baker.



#### ORIENTACIÓN 002: Información de referencia.

- Contenido de Carbono Equivalente. Sitio Web: [academia-lab](https://www.academia-lab.com).

#### ORIENTACIÓN 003: Información de referencia:

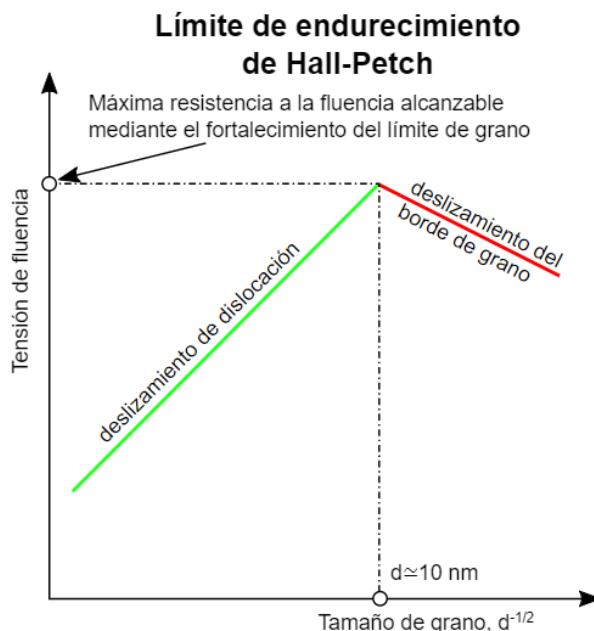
- Anexo IV. Guía de métodos alternativos para determinar el precalentamiento en la soldadura de aceros estructurales. Sitio Web: [contenidos.inpres](https://www.contenidos.inpres.com).

#### ORIENTACIÓN 004: Información de referencia:

- Emplear el modelo de referencia mencionado en el artículo científico: Sáenz, P. (1989) «Cálculo para determinar la resistencia a la tracción de algunos materiales conociendo la dureza brinell y lo inverso», Informador Técnico, 39, pp. 16-19. Sitio Web: [revistas.sena](#) (pp. 16-19).

#### ORIENTACIÓN 005: Información de referencia:

- Endurecimiento del borde de grano. Sitio Web: [wikipedia.org](#) [Figura 1: El endurecimiento de Hall-Petch está limitado por el tamaño de las luxaciones. Una vez que el tamaño de grano alcanza aproximadamente 10 nanómetros, los bordes del grano comienzan a deslizarse.].



## 1. Cálculo de fluencia y dureza con ecuación de Hall-Petch.

En este trabajo se estudia una muestra de una pieza la cual fue soldada sin precalentamiento por lo que se cree que la estructura de los materiales de la misma se vió afectada por el calor de la soldadura por lo que se le hizo una metalografía para analizar la microestructura de la misma, más específicamente la parte del acero IRAM 1020 y ver que cambios hubo en el mismo.

### 1.1. Datos principales.

Primero contamos con las imágenes de la pieza seleccionada, las cuales se observan en la Figura 1. En base a esto podemos obtener el diámetro promedio de los granos. Para ello empleamos «ChatGPT 4.0» acompañado de un código en Python para saber cuántos granos hay en la imagen, el resultado son 613 granos como se puede ver ejecutando el código adjunto. Luego procedemos a esta herramienta nuevamente para saber cual es el diámetro promedio de 116,84  $\mu\text{m}$ .

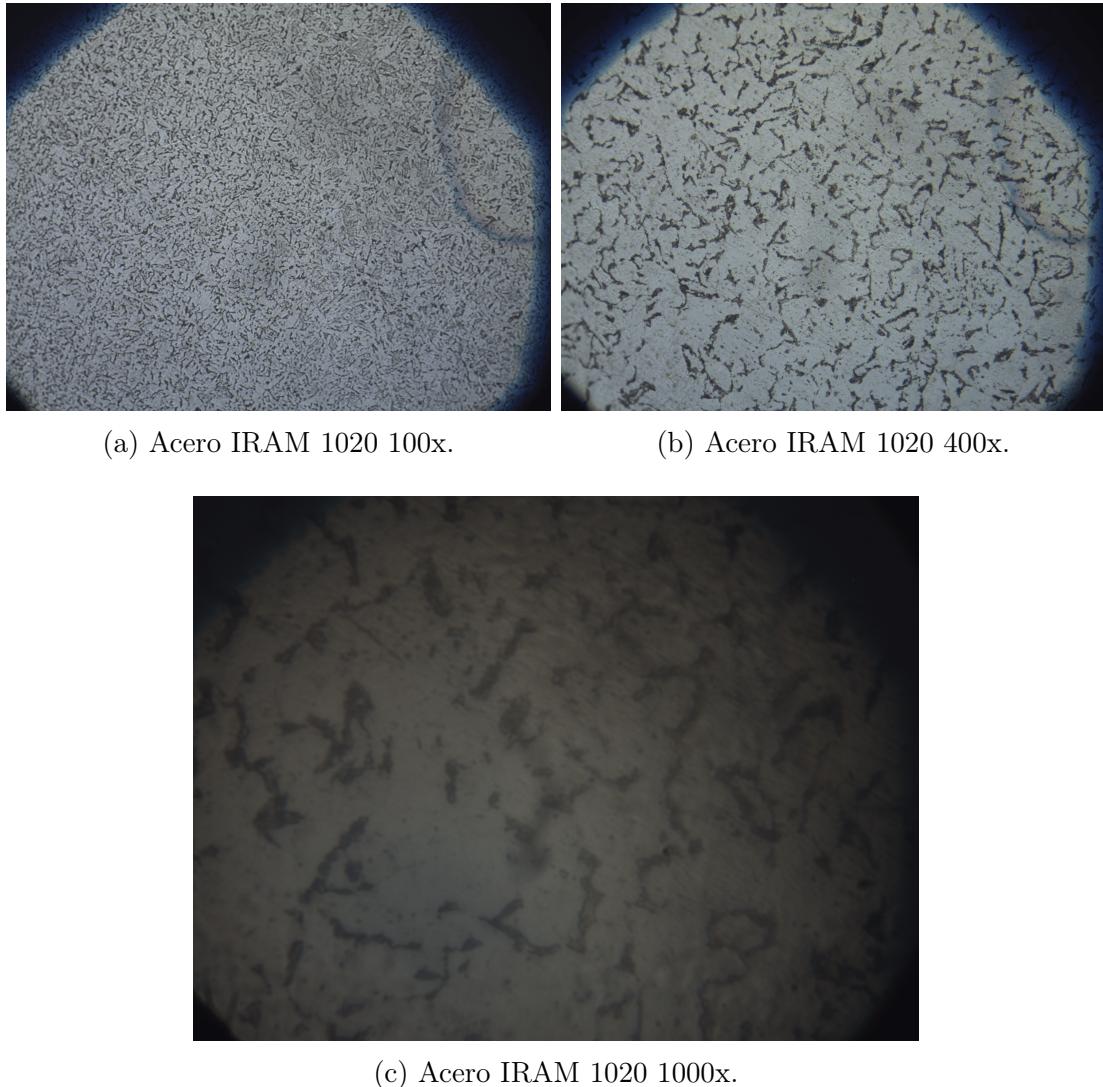


Figura 1: Micrografías hechas en el Laboratorio de Materiales.

## 1.2. Cálculo de la fluencia.

Usando la ecuación de Hall-Petch (Ecuación 1) podemos sacar la tensión de fluencia de la pieza, pero para ello necesitamos el diámetro promedio  $d$  del grano, el cuál ya tenemos; y  $k$  y  $\sigma_0$  que son constantes del material, las cuales obtenemos del libro «**Smith, W.F.; Hashemi, J. - Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales - 4ta Edición**». Donde dice que para aceros dulces, como lo sería el IRAM 1020, la  $k$  es  $740 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$  y el  $\sigma_0$  es  $70 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma$  = fluencia después del tratamiento térmico.
- $\sigma_0$  = fluencia antes del tratamiento térmico.
- $k$  = constante del material.
- $d$  = diámetro del grano.

Teniendo  $\sigma_0$  y  $k$  ponemos calcular la fluencia de la pieza analizada.

$$\sigma_y = 70 \text{ MPa} + 740 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2} (116,84 \mu\text{m})^{-1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = 138,46 \text{ MPa} \quad (3)$$

### 1.3. Cálculo de la dureza.

A la probeta analizada se le realizaron varios ensayos de dureza Vickers con el objetivo de evaluar las modificaciones en la microestructura y, en consecuencia, en la dureza ocasionadas por el efecto térmico del proceso de soldadura.

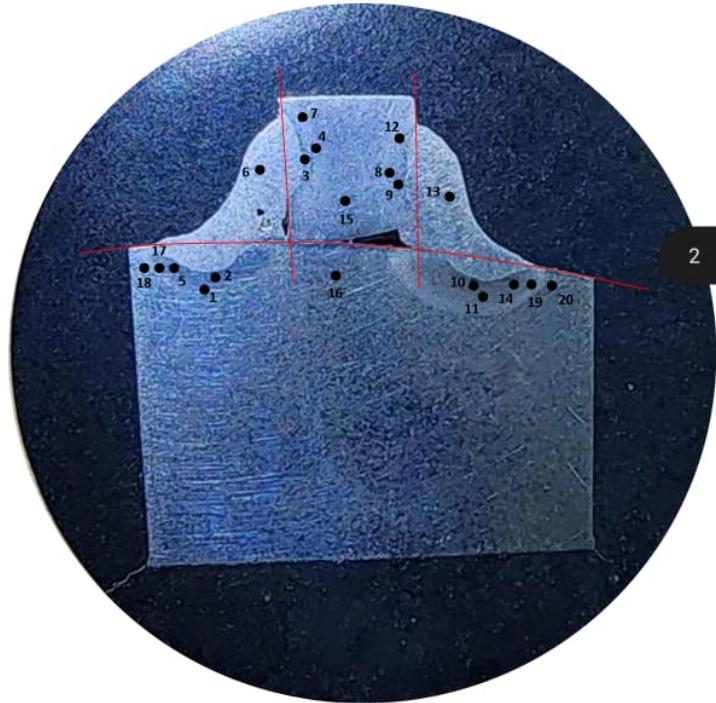


Figura 2: Mapa de las durezas tomadas en la muestra

En la Figura 2 podemos ver todos los lugares en donde se hizo un ensayo de dureza Vickers y las zona en la que se hizo la metalografía es: la zona 8 y la zona con el metal base es la 15 que utilizaremos como referencia.

- zona 8, HV = 138,9.
- zona 15, HV = 122.

Y ahora utilizando la extensión del modelo matemático de Hall-Petch:

$$HV = HV_0 + k \cdot d^{1/2} \quad (4)$$

Donde:

- $HV$  = dureza después del tratamiento térmico.
- $HV_0$  = dureza antes del tratamiento térmico.

- $k$  = constante del material.
- $d$  = diámetro del grano.

remplazando  $HV$  con la dureza de la zona 8 (zona afectada por el calor) y  $HV_0$  con la dureza de la zona 15 (material base) y  $d$  con el diámetro de grano que obtuvimos se puede sacar  $k$  y con esos se puede sacar la dureza del material en cualquier punto sabiendo el diámetro del grano.

Entonces remplazamos en la Ecuación 4:

$$138,9 = 122 + k \cdot (116,84 \mu m)^{-1/2} \quad (5)$$

$$16,9 \cdot (116,84 \mu m)^{1/2} = k \quad (6)$$

$$k = 182,68 \cdot \mu m^{1/2} \quad (7)$$

#### 1.4. Conclusión.

Como podemos ver en el tamaño de grano de la pieza y en el cálculo de la fluencia y la dureza, el material apenas se vio afectado por el calor de la soldadura quedando un tamaño de grano bastante grande y teniendo pequeñas variaciones en su dureza.

## 2. Soldabilidad de los materiales.

En esta parte veremos la soldabilidad de los distintos materiales de la pieza empleando las expresiones de la American Welding Society (AWS) y del Instituto Internacional de Soldadura (IIW).

Primero tenemos que saber las composiciones de los distintos materiales.

Composición	material 1	material 2	material 3
C	0,455	0,2	0,1
Mn	0,745	0,45	1,11
Si	0,231	0,225	0,72
Cr	0,041	0	0
Ni	0,037	0	0
Mo	0,007	0	0

Cuadro 1: Composición de los materiales.

Para medir la soldabilidad de un material nos basamos en el contenido de **carbono equivalente (CE)**, que sirve para comprender como los diferentes elementos aleantes aumentan la dureza del material, la cual puede provocar el agrietamiento en frío inducido por hidrógeno. Pero no todos los aleantes afectan por igual a la dureza por los cuales se crearon relaciones que igualan el impacto de cada elemento a la dureza según su concentración.

Ahora utilizamos las expresiones del AWS y el IIW las cuales son:

## 2.1. AWS.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$

La AWS establece que para un contenido de carbono equivalente superior al 0,4% existe la posibilidad de que se produzcan grietas en la zona afectada por el calor.

## 2.2. IIW.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$

Para medir la soldabilidad, la IIW establece un rango de valores de **carbono equivalente** los cuales son:

CE	Soldabilidad
Hasta 0,35 %	Excelente
0,36 %-0,4 %	Muy bien.
0,41 %-0,45 %	Bien.
0,46 %-0,5 %	Regular.
Más de 0,5 %	Pobre.

Cuadro 2: Rango de valores de CE.

## 2.3. Soldabilidad de los materiales por el método AWS.

### 2.3.1. Material 1.

$$CE = 0,455 + \frac{0,745 + 0,231}{6} + \frac{0,041 + 0,007}{5} + \frac{0,037}{15}$$

$$CE = 0,63$$

Teniendo esa cantidad de carbono equivalente existe la posibilidad que se formen grietas en las zonas afectadas por el calor.

### 2.3.2. Material 2.

$$CE = 0,2 + \frac{0,45 + 0,225}{6}$$

$$CE = 0,3125$$

Teniendo en cuenta la cantidad de carbono equivalente el acero 1020 tiene buena soldabilidad.

### 2.3.3. Material 3.

$$CE = 0,1 + \frac{1,11 + 0,72}{6}$$

$$CE = 0,405$$

## 2.4. Soldabilidad de los materiales por el método IIW.

### 2.4.1. Material 1.

$$CE = 0,455 + \frac{0,745}{6} + \frac{0,041 + 0,007}{5} + \frac{0,037}{15}$$

$$CE = 0,59$$

### 2.4.2. Material 2.

$$CE = 0,2 + \frac{0,45}{6}$$

$$CE = 0,275$$

### 2.4.3. Material 3.

$$CE = 0,1 + \frac{1,11}{6}$$

$$CE = 0,285$$

## 2.5. Conclusión.

Teniendo en cuenta el método del AWS, el material 1 y 2 tienen una soldabilidad baja y pueden llegar a aparecer grietas y presentar fragilidad en las zonas afectadas por el calor. Para el material 2 la soldabilidad es mejor que los anteriores al tener un **CE** dentro del límite aceptable.

Y según el método del IIW el material 1 tiene una soldabilidad muy pobre y los materiales 2 y 3 tienen una muy buena soldabilidad.

Según el reglamento CIRSOC-304, que habla sobre soldadura de aceros en estructuras, y la tabla A.IV-2 que muestra la velocidad de enfriamiento máxima según para cierta dureza crítica, alcanzable en la zona afectada por el calor en la soldadura; según el porcentaje de **CE**, la cual nos muestra que el material 2 y el tres no llegan a ninguna de las durezas críticas con las velocidades de la tabla lo que muestra su buena soldabilidad, en cambio el material 3 sí llega a una dureza crítica con una velocidad de enfriamiento de  $9C/s$ , por lo que de no tener un precalentamiento a alta temperatura y posible poscalentamiento, la zona afectadas por el calor en el material 1 se volverían muy frágiles.

Esto se puede observar en la macrografía de la pieza donde las zonas cercanas al cordón de soldadura en el material 1 (las zonas afectadas por el calor) se encuentran de un color

distinto al resto del material de la pieza, en dónde es posible que el material se haya fragilizado al no contar con un precalentamiento.

## 2.6. Parametro critico del metal (Pcm).

El Pcm, al igual que las ecuaciones del IIW y la AWS, sirve para calcular el carbono equivalente, pero se usa específicamente para aceros donde el porcentaje de carbono no excede el 0,11 % y usualmente se usa en la fabricación de tuberías.

Su ecuación es:

$$P_{cm} = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5B \% \quad (8)$$

## 3. Cálculo de dureza Brinell.

A la hora de trabajar con aceros, tener el dato de la dureza Brinell (HB) es muy útil debido a que con él se puede obtener de forma aproximada la resistencia a la tracción del material con el que estamos trabajando, lo cual es muy útil ya que hacer un ensayo de dureza es más sencillo y rápido que hacer un ensayo de tracción.

### 3.1. Modelos empíricos:

$$\sigma_t = X \cdot HB \quad (9)$$

Estando  $\sigma_t$  es  $kp/mm^2$ . Siendo  $X$  la constante de conversión que en este caso para un acero al carbono es 0,36. Y teniendo la dureza Vickers del material se puede hacer una conversión a la HB y de ésta manera conseguir la resistencia a la tracción del IRAM 1020 afectado por el calor.

Eso se calcula con la siguiente ecuación:

$$HB = HV \cdot 0,95 \quad (10)$$

Entonces podemos sacar la dureza Brinell.

$$HB = 138,9 \cdot 0,95 \quad (11)$$

$$HB = 132 \quad (12)$$

Y ahora sacamos la tensión de tracción del material.

$$\sigma_t = 132 \cdot 0,36 \quad (13)$$

$$\sigma_t = 47,52 \frac{Kp}{mm^2} \quad (14)$$

Por último pasamos el resultado a MPa:

$$\sigma_t = 466 \text{ MPa} \quad (15)$$

#### 4. Deslizamiento de bordes de grano y de dislocaciones.

El endurecimiento por Hall-Petch se presenta debido a que al hacerse más pequeños los granos de un material metálico, aumenta la densidad de bordes de grano y por ende aumenta la cantidad de dislocaciones retenidas en los mismos y se detiene el principal mecanismo de deformación de los metales provocando un aumento de su resistencia a la fluencia y a la tracción (sobre todo el primero, al volverse menos dúctil el material), pero llegado a un diámetro de grano de 10 nanómetros, los bordes de granos se desplazan, perdiendo parte de la resistencia obtenida la restringir a los desplazamientos de dislocaciones.

En nuestra muestra no se observa el fenómeno de deslizamiento de borde de grano debido a que nos encontramos con un diámetro promedio de grano de  $116,84 \mu\text{m}$ , por lo que nos encontramos bastante lejos del tamaño necesario para poder que se dé este fenómeno aparte de que, de haber dicho deslizamiento, se necesitaría de un microscopio electrónico de barrido (MEB) para poder observarlo con exactitud.

En cambio con las dislocaciones pasa algo distinto, y es que definitivamente deben de haber dislocaciones en nuestra muestra y se podrían ver de haber aplicado el agente corrosivo correcto y se hubiese utilizado un MEB, debido a que las dislocaciones al igual que los bordes de grano son lugares con mucha energía libre lo cuál facilita su corrosión y permite visualizarlo, pero no es caso en este trabajo. Pero se puede asegurar de que hay dislocaciones en la muestra sobretodo al tratarse de una soldadora donde el calor y enfriamiento repentino haya provocado el desplazamiento de las misma.