

DETERMINACIÓN DE LOS EXPONENTES b Y c EN LA ECUACIÓN COFFIN & MANSON – BASQUIN – C & M – B

Yesid Aguilar¹, Ramiro Catacolí^{2}, Daniel Atehortua², Claudia Roa³*

1: Profesor Escuela Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia

2: Estudiante Doctorado en Ingeniería énfasis en Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia

3: Ingeniera, Controltec Ltda. Convenio VRIN- OTRI- 2012. UV-CT. - Cali, Colombia.

*Contacto: ramiro.catacoli@controltecltda.com

RESUMEN

En la determinación del comportamiento a la fatiga de los metales, se ha desarrollado investigación direccionada a establecer métodos para la estimación predictiva de los parámetros de vida a fatiga, basados en deformación. Aquellos han sido estudiados, entre otros, desde la ecuación, Coffin & Manson - Basquin (C&M-B) $\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$. Los métodos existentes para el propósito, provienen de correlaciones experimentales, basándose en propiedades monotónicas tensiles de los materiales. Algunos resultados derivaron en complicadas expresiones para el cálculo de los parámetros, más otros, a causa de sus pobres correlaciones, se les asignó valores constantes. Dado que la aproximación de vida a fatiga basada en deformación, se rige por la relación $\frac{\Delta \epsilon}{2}$ vs N_f , se sugiere en la literatura técnica, que los parámetros de vida a fatiga, deberían ser cuantificados sobre el análisis y conexión de datos reales de deformación y una propiedad monotónica apropiada. Para el referido propósito, la estimación de los parámetros de fatiga, a saber, b y c , en esta investigación, están basados en los esfuerzos último y de fluencia (propiedad monotónica), o en sus formas correspondientes, tenacidad y resiliencia, y en los %C y %CE (propiedad intrínseca), ello teniendo como objeto de estudio, los aceros: SA 283, A 588 y SAE 1045, soldados y definidos en soldabilidad en el diagrama de Graville. Los mismos resultados permitieron establecer deductivamente, los valores para ϵ'_1 , σ'_1 , y ϵ'_f , σ'_f , respectivamente obtenidos desde C&M-B, para N_f igual a 1 y N_f igual a 10^4 ciclos.

Palabras Clave: *Graville, Soldadura, Fatiga, Coffin & Manson – Basquin*

ABSTRACT

In determining the fatigue behavior of metals, research has developed directed to establish predictive methods for estimating the parameters of fatigue life, based on deformation. Those have been studied, among others, from the Coffin & Manson – Basquin equation (C&M-B) $\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$. Existing methods for the purpose, are from experimental correlations based on monotonic tensile properties of the materials. Some results led to complicated expression for calculating the parameters, others because of its poor correlations, constant values were assigned. Since fatigue life approach based deformation is governed by the relationship $\frac{\Delta \epsilon}{2}$ vs N_f suggested in the literature that the fatigue life parameters should be quantified on the analysis and actual data connection with deformation and appropriate monotonic property. For said purpose, the estimation of the fatigue parameters, namely, b and c in this study are based on

ultimate and yield stress (monotonic property), or their corresponding shapes, toughness and resiliency, and the % C and % EC (intrinsic property), this having as object of study, steels: SA 283, A 588 and SAE 1045, welded and weldability defined in the Graville diagram. The results allow to establish deductively, values for ϵ'_1, σ'_1 , y ϵ'_f, σ'_f , respectively obtained from **C&M-B**, for N_f equal to 1 and N_f equal to 10^4 cycles.

Keywords: *Graville, Welding, Fatigue, Coffin & Manson – Basquin*

1 INTRODUCCIÓN

Se ha establecido que la fatiga alcanza cuando menos el 90% de todas las fallas por servicio, debido a cargas mecánicas, por la anterior razón entre otras, la investigación es proclive a determinar predictivamente, las condiciones bajo las cuales puede llegar a aparecer este fenómeno. La presente investigación se ha propuesto estudiar al acero SA 283 C, teniendo como similares de referencia, a los aceros A 588 y SAE 1045, aceros para los cuales se ha evaluado su soldabilidad en el diagrama de Graville [1], a partir de sus composiciones químicas(%C y %CE), reportadas en la Tabla 3. Para el cálculo del número de cargas reversibles que determinan la iniciación de las grietas por fatiga $2N_f$, se aproximara el valor de las constantes o parámetros de fatiga, a través de la expresión Coffin & Manson- Basquin, ecuación 1 [2]:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

En adelante y al interior de este texto, se la denominará **C&M-B**, expresión ampliamente usada debido a su carácter práctico y extensivo conocimiento que la sustenta. En la anterior ecuación, la amplitud de deformación total, está dividida en las correspondientes, deformación elástica (ϵ_e) y plástica (ϵ_p). **E** es el conocido modulo Young, σ' y **b** son respectivamente, el coeficiente y el exponente de resistencia a la fatiga, ϵ' y **c**, respectivamente, el coeficiente y exponente de elasticidad. Por su parte N_f , corresponde al número de ciclos hasta la falla final por fatiga.

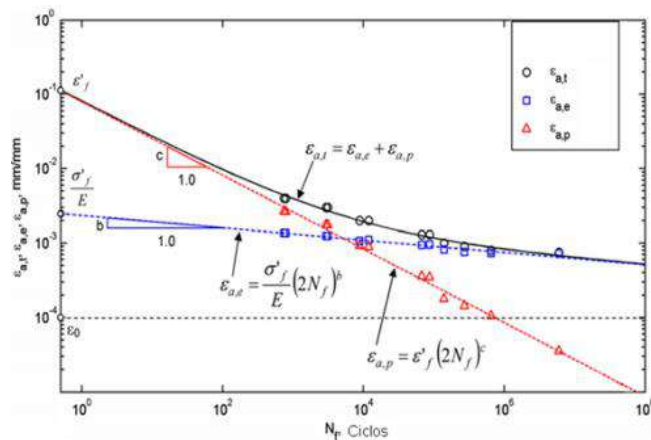


Figura 1. Curva deformación – vida (B & C-M). [17]

El mundo investigativo ha desarrollado métodos para la estimación de la deformación cíclica, basada en la aproximación predictiva de los parámetros de fatiga, a partir de las propiedades monotónicas de los materiales.

1.1 Repaso de algunos de los métodos existentes - Estimación de los parámetros de fatiga.

Desde el estado del arte, se conocen varios métodos utilizados para estimar el comportamiento a la fatiga de materiales. La tabla 1 a continuación, presenta el resumen de algunos métodos.

Tabla 1 . Métodos empleados para la estimación de parámetros de fatiga [5]

Método de Estimación	Año	σ'_f	ϵ'_f	b	c
Morrow	1964	-	-	$\frac{-n'}{1+5n'}$	$\frac{1}{1+5n'}$
Pendientes Universales de Manson's	1965	1.9.Su	$0.76 \left[\ln \left(\frac{1}{1-RA} \right) \right]^{0.6}$	-0.12	-0.6
Cuatro puntos de Manson's	1965	$1.25\sigma_f \cdot 2^b$ $\sigma_f \approx S_U(1 + \epsilon_f)$	$\frac{0.125}{20^c} \left[\ln \left(\frac{1}{1-RA} \right) \right]^{3/4}$	$\frac{\log(0.36 S_U / \sigma_f)}{5.6}$	$\frac{1}{3} \log \frac{0.0066 - \sigma'_f (2 \times 10^4)^b / E}{0.239 [\ln 1 / (1 - RA)]^{3/4}}$
Ong	1993	$S_U \cdot (1 + \epsilon_f)$	ϵ_f	$\frac{1}{6} \log \frac{(S_U/E)^{0.81}}{0.625 \sigma_f/E}$	$\frac{1}{4} \log \frac{0.0074 - \sigma'_f (10^4)^b / E}{2.074 \cdot \sigma_f/E}$
Roessle Fatemi	2000	$4.25 \times HB + 250 \text{ MPa}$	$\left[\frac{(0.32 \times HB^2) - (487 \times HB)}{+191000 \text{ MPa}} \right] / E$	-0.09	-0.56

Otra técnica de aproximación, no consignada en la tabla anterior, consiste en incluir un punto de una prueba monotónica, dentro de un conjunto de datos existentes de fatiga de bajo ciclo, puntos estos denominados, de anclaje. Lo anterior en virtud, que hay una gran similitud, entre la estructura de la dislocación producida por la fatiga, especialmente en sus primeros ciclos y la similar en deformación estática. Este concepto en el punto de anclaje, basado en un ciclo, define cualitativamente, la mejor correspondencia biunívoca, entre los diagramas, esfuerzo-deformación y deformación-vida, Figura 2 a continuación.

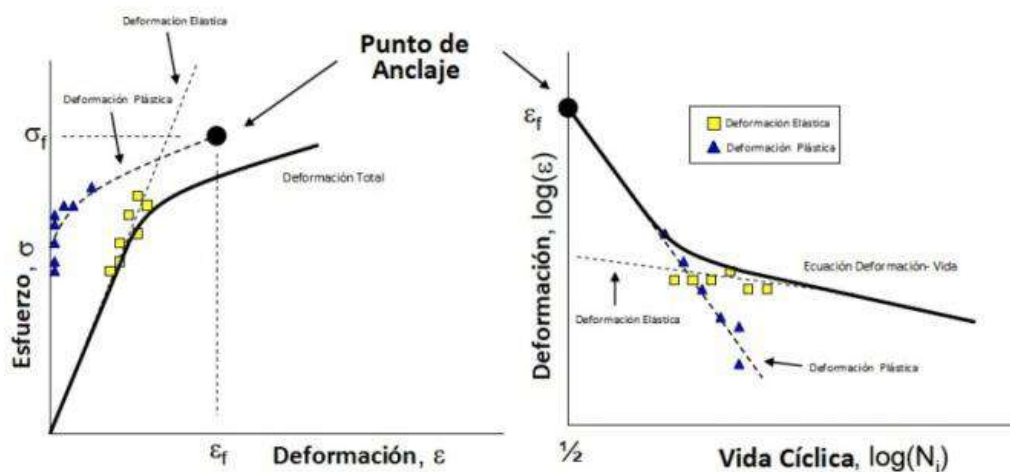
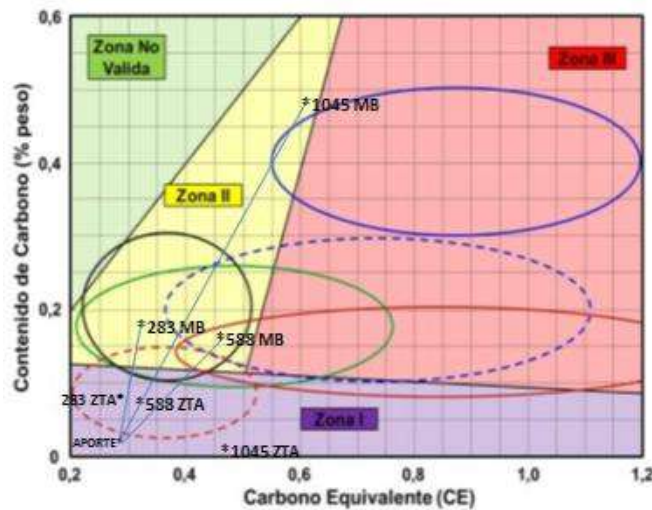


Figura 2. Representación esquemática – Método del punto de anclaje [14]

1.2 Fundamentación - Método propio para la estimación de b y c.

Esta propuesta para determinar los parámetros de fatiga, se basa, en dos parámetros mono tónicos o puntos de anclaje, que derivan de la propiedad más íntima y más característica de los materiales, su composición química (%C y %CE), en asocio, con el módulo de elasticidad **E**, que es determinado por las fuerzas de vínculo entre los átomos [8], mientras que el similar **G**, le compite transversalmente. Los aceros en general, son caracterizados por su porcentaje de carbono (% C) y por su porcentaje de carbono equivalente (%CE), esta caracterización ha cobrado gran interés, para la definición de la soldabilidad de los mismos aceros, en el diagrama de Graville, que es una gran herramienta para este propósito y en él se han situado los aceros al carbono objeto de este estudio, Figura 3.

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6}\right) + \left(\frac{\%Ni + \%Cu}{15}\right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5}\right) \quad (2)$$



Aceros de bajo Carbono
%CE=[0.212-0.51], %C=(0.1-0.3)

Aceros de baja aleación y alta resistencia
%CE=[0.21-0.76], %C=(0.09-0.26)

Aceros procesados termomecánicamente
%CE=[0.2-0.52], %C=(0.025-0.15)

Aceros de baja aleación tratables térmicamente
%CE=[0.3-0.5], %C=(0.55-1.2)

Aceros templados y revenidos
%CE=[0.36-1.2>], %C=(0.1-0.3)

Aceros al Cromo - Molibdeno
%CE=[0.38-1.2], %C=(0.08-0.2)

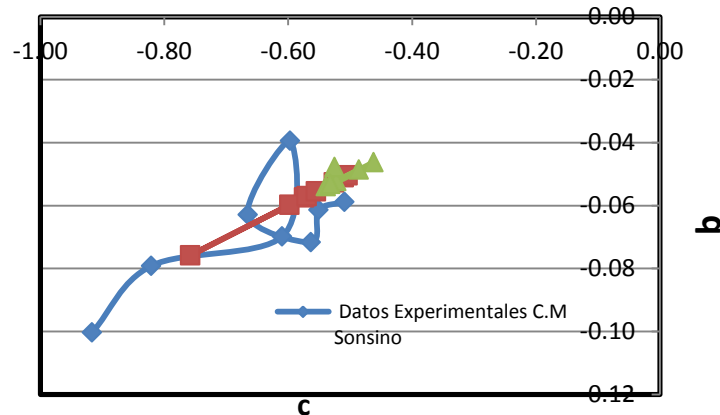


Figura 3. Diagrama de Graville [1] - Correlación de parámetros b y c

El trabajo de Gough [7], ha mostrado que un metal se deforma bajo esfuerzo cíclico por el deslizamiento en el mismo plano atómico y en la misma dirección cristalográfica tal como sucede en un proceso de deformación unidireccional. Las líneas de deslizamiento generalmente se forman durante los primeros miles de ciclo de esfuerzos. Las bandas de deslizamiento persistente, son los embriones de las grietas por fatiga, puesto que ellas abren como grietas anchas bajo la aplicación de pequeñas deformaciones ténsiles. Hay una gran similitud entre la estructura de dislocación producida por la fatiga y la similar en deformación estática. Los átomos de soluto abarcan dos grandes categorías, respecto a su relativo efecto del aumento de la resistencia a la deformación y al corte. Primero, aquellos átomos que no producen distorsión esférica, tales como la mayoría de átomos que se disponen intersticialmente, tienen un relativo efecto de aumento de la resistencia por unidad de concentración, de aproximadamente tres veces, su módulo de corte o de rigidez ($3G$). Segundo, los átomos de soluto que sí distorsionan esféricamente la red, tal como los átomos que se disponen sustitucionalmente, tienen un efecto sobre la resistencia, de aproximadamente un décimo del módulo de corte ($G/10$) [8]. Lo anterior deriva en el hecho que, la resistencia y la ductilidad a la fatiga, guardan dependencia con el módulo de rigidez o de corte (G) y desde luego en asocio con el módulo de elasticidad (E), es decir, b y c, son además de valores funcionales del %C y del %CE, valores funcionales del módulo de rigidez, así:

$$b = f\left(\%C, \%CE, \frac{E}{G}\right) \quad c = f\left(\frac{1}{\%C}, \frac{1}{\%CE}, \frac{G}{E}\right) \quad (3)$$

La consideración anterior es tenida en cuenta para la estimación de b y c en la presente investigación, como factores de intensificación del %C y del %CE.

2 PROCEDIMIENTO PROPUESTO EN ESTE ESTUDIO PARA DETERMINAR b Y c

Basado en el efecto relativo sobre la resistencia al corte, que tienen los átomos de soluto, sobre los similares de solvente (%C, %CE) y sobre la capacidad derivada de distorsión de la red atómica, se concluye y se propone en consecuencia, la siguiente regla para la determinación de

los parámetros b y c, o exponentes de elasticidad y de resistencia a la fatiga, en la ecuación C & M – B:

$$c = n \%C \quad \text{ó} \quad c = n \%C + \%CE \quad n = 1,2,3 \quad (4)$$

$$b = \frac{c}{10} \quad \text{ó} \quad b = \frac{\%C + \%CE}{10} \quad (5)$$

Nótese en el diagrama de Graville adjunto, que esta regla rige leyéndose de abajo hacia arriba, siguiendo la columna de aceros, según se esquematiza en óvalos sobre el mismo diagrama. Obsérvese también que para la aplicación de la regla de determinación de b y c, existen fronteras o rangos, que sin ser claramente definidos, señalan el camino de aplicación de los criterios. Nótese adicionalmente que hay zonas de cruces, hecho que indetermina la aplicación de la regla, razón por la cual debe aplicarse el siguiente criterio: De todos los valores calculados para c, el más cercano a 0.5 [8, 12,13], será el verdadero valor de c para el acero en cuestión y de todos los valores calculados para b, el más cercano a 0.08 [8, 12,13], será el verdadero valor de b para el acero en cuestión.

3 TRABAJO EXPERIMENTAL

Los especímenes de trabajo, fueron objeto de análisis químico, en el material base – MB y en la zona de transición de la soldadura – ZTA, para los aceros A 588, SAE 1045 y SA 283C, la Tabla 3 a continuación, consigna los resultados del análisis realizado en un Espectrómetro de Emisión Atómica Thermo Jarrell Ash Atom Comp 181 ME-E00-EE01. Para los referidos aceros, fueron calculados sus correspondientes porcentajes de Carbono Equivalente (%CE). Dichos aceros, están situados en el diagrama de Graville, Figura 3, en relación con su material de aporte, E-71T9C. Haciendo uso de las expresiones 4 y 5, según cada situación, fueron calculados los parámetros b y c y posteriormente consignados en la Tabla 3 de este artículo, a partir de ellos se planteó para cada pareja (material base y material soldado), un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, para resolver los coeficientes σ'_1 y ε'_1 , para el propósito se utilizó en la ecuación C&M-B, E igual a 206 MPa, $N_f=N_1$ (igual a 1 ciclo - punto de anclaje) y $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$, quedó definido con los resultados experimentales de esfuerzos residuales de tensión, para los tres materiales objeto de estudio, tanto en el material base – MB, como en la zona de transición – ZTA, resultados experimentales estos, obtenidos mediante difracción de rayos X – DRX, realizados en el difractómetro PANALYTICAL X'PERT PRO. A continuación se muestran los resultados de DRX obtenidos. Dado el punto de anclaje elegido, se estima que la consideración de los datos reales de fatiga, no debe afectar el ajuste de la curva, durante el proceso de modelado por regresión lineal, así las cosas y para determina σ'_f y ε'_f (consignados en la tabla 3), se utilizó la ecuación C&M-B, acudiendo a un aspecto de la propuesta de los cuatro puntos y/o pendientes universales de Manson [2], donde 10^4 ciclos corresponde al rango elástico de deformación $\Delta\varepsilon$, o proporción de vida total a la fatiga, que corresponde a la etapa de iniciación por formación de estricciones y microfisuras de 0.25 milímetros [13].

3.1 Resultados experimentales realizados mediante la técnica difracción de rayos X (DRX)

Tabla 2. Resumen Resultados Refinamiento DRX.

Muestra	a (Å) ± 0,00001	T. Cristalito (Å) ± 50	Microtensiones ± 0,00001
A 588 - Sin soldadura	2,86768	6330	0,00042
A 588 - Con soldadura	2,86776	2322	0,00055
SAE 1045 - Sin soldadura	2,86652	2057	0,00068
SAE 1045 - Con soldadura	2.86619	3436	0,00048
SA 283 - Sin soldadura	2,867526	2747	0,000390
SA 283 - Con Soldadura	2,867606	2469	0,000474

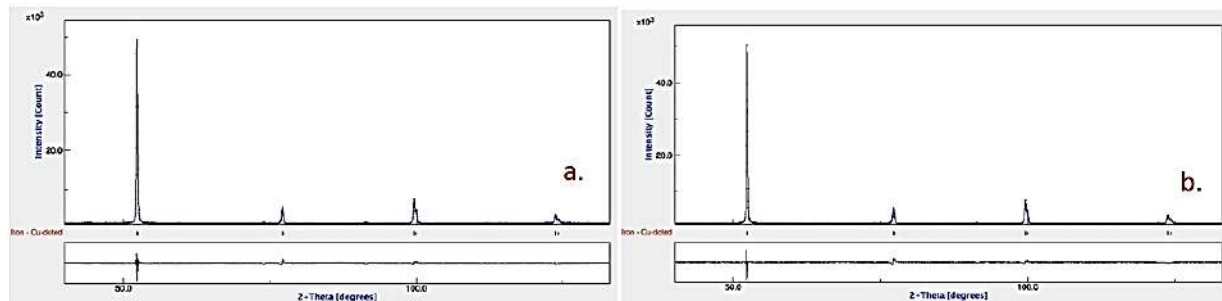


Figura 4. Difractograma Refinamiento DRX - SA 283C. a) Material Base. b) Soldado

3.2 Resumen de los datos experimentales y calculados.

Toda la información experimental y calculada, arriba señalada, se consigna en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Propiedades Monotonicas y Datos de la Investigación

Material		Valores Monotonicos						Valores Cíclicos Tensión Controlada						
		E	σ_y	σ_u	% C	% CE	$n' = \frac{\sigma_u}{\sigma_y}$	$n_f = \frac{b}{c}$	Cálculos para un (1) Ciclo		Calculados para 10 ⁴ Ciclos			
									ϵ' %	σ' (Mpa)	ϵ' %	σ' (Mpa)	b	c
588	M-Base	206	435	290	0,154	0,464	1,5	0,1	0,61	1,76	15	1232	-0,06	-0,46
	M-Soldado				0,071	0,326		0,1			15	2694	-0,05	-0,54
1045	M-Base	206	655	586	0,486	0,611	1,1	0,1	0,15	-3,24	15	1736.	-0,05	-0,49
	M-Soldado				0,018	0,468		0,1			15	2340	-0,05	-0,52
283	M-Base	206	375	185	0,175	0,303	2	0,1	0,48	-1,36	15	1625	-0,05	-0,48
	M-Soldado				0,084	0,28		0,1			15	2542	-0,05	-0,53

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Refinamiento DRX materiales base y soldado aceros A588, SAE1045 y SA283C

Los resultados obtenidos del refinamiento DRX, presentados en la Tabla 2, ensayo efectuado para cada muestra soldada, tanto en el material base como en el material de soldadura y respectivamente para los aceros objeto de estudio, en barridos transversales. Se puede observar para cada pareja de análisis (material base y material soldado), en la tabla 2, que los parámetros

de red **a** (Å), son prácticamente iguales para todos los materiales, para el refinamiento de cada muestra, se utilizó la misma fase estructural $\text{Cu}_{0.3}\text{Fe}_{99.7}$, con grupo espacial $I m -3 m$.

Los resultados del tamaño de cristalito, indican que la muestra SA283C soldada, presenta un tamaño de cristalito de $2469 \pm 40 \text{ \AA}$, el cual es menor que el material base $2747 \pm 47 \text{ \AA}$, hecho este relacionado con el proceso de soldadura, debido a que durante el mismo, el material alcanza un estado de fusión y/o pastoso y con el posterior enfriamiento, se producen regiones ordenadas o cristalinas de tamaños pequeños, dado el enfriamiento de forma rápida característico de la soldadura. Lo anterior explica que el sistema experimentó solución sólida intersticial, dado entre otros, el tamaño relativo (más pequeño) del soluto con relación al solvente. El mismo fenómeno también es explicado por la escasa o ninguna microtensión relativa, entre el material base y el material de soldadura, obsérvese que apenas se diferencian en 0,00008%, valor que está prácticamente en el margen de error de los datos correspondientes. Estos resultados son firmemente coherentes con el método establecido para determinar los parámetros b y c en este estudio. Obsérvese que el análisis de los resultados DRX para el SA283, es cualitativamente muy similar al A588, pero cuantitativamente mucho más potenciado, nótese que el tamaño del cristalito de $2322 \pm 50 \text{ \AA}$ es muchísimo menor que el material base, $6330 \pm 50 \text{ \AA}$, adicionalmente la diferencia relativa de microtensiones, es ahora más significativa 0,00013%. Contrariamente, el acero SAE 1045, presenta con los dos anteriores y desde sus resultados DRX, una diferencia cualitativa y cuantitativa, en manera alguna contraria; lo anterior indica, dado los análisis, que este material experimentó solución sólida sustitucional, que asocia las más grandes microtensiones y endurecimiento por deformación.

4.2 Correlación de resultados - b y c en C&M-B a la luz de la investigación internacional

En la figura 3, los valores b y c obtenidos según las expresiones 4 y 5 para los aceros estudiados por Sonsino (estudio de referencia), versus los similares obtenidos para los aceros A588, SA283C y SAE1045, muestran que estos últimos correlacionan muy acertadamente, dada la tendencia lineal exhibida.

5 CONCLUSIONES

El método propuesto para estimar los parámetros b y c, deriva de la química de los materiales y de la influencia de esta en las propiedades monotónicas y cíclicas de los mismos, es decir, este es un método que se encuentra en íntima relación y proporción, con la naturaleza del material y con los mecanismos de formación de microgrietas. Por su parte σ'_f y ϵ'_f son variables de respuesta y están determinados adicionalmente por las condiciones de carga.

Este método propuesto, cuando aludió a la junta soldada de los aceros estudiados, facilitó la comprensión de los mecanismos de fatiga, en asocio con el diagrama de Graville, hecho que en conjunto permitió definir las expresiones de cálculo para b y c, como propuesta de este trabajo de investigación.

Este método de estimación de los parámetros de fatiga b y c, en la ecuación de C & M – B, aplica para los aceros soldados, e indistintamente, para los aceros - materiales base o sin soldar.

6 REFERENCIAS

1. ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering, ASM, International, 1993.
2. Manson, S.S., "Fatigue: a complex subject – some simple approximation". Exp Mech, 5:193–226, 1965.
3. Lee, K.S., Song, J.H., "Estimation methods for strain life fatigue properties from hardness". International Journal Fatigue, 28:386–400, 2006.
4. Ong, J.H. "An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data". International Journal Fatigue, 15:213–219, 1993.
5. Meggiolaro, M.A., Castro, J.T.P., "Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation Predictions". International Journal Fatigue, 26:463–476, 2004.
6. Morrow, J.D., Tuler, F.R., "Low Cycle Fatigue Evaluation of Inconel 713C and Waspaloy", Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Volume 87, p 275-289, 1965.
7. Radonovich, D.C., Thesis "Methods of extrapolating low cycle fatigue data to high stress amplitudes", Orlando – Florida, 2007.
8. Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, USA, McGraw-Hill, 1976.
9. Basquin, O.H., "The exponential law of endurance tests". Am Soc Test Mater Proc, 10:625–30, 1910.
10. Gough, H.J., ASTM volumen 33, part II, pp3-114, 1933.
11. Fleischer, R. L., "Solid Solution Hardening of Intermetallic Compounds". MRS Proceedings, 288, 1992.
12. Wetzel R.M., Coffin L.F., STP465- Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASM, International, 1969
13. Coffin, L.F.Jr, MEQ Volume 3, p 22. 1963.
14. Sonsino, C.M., Lagoda, T., Demofonti, G., "Damage accumulation under variable amplitude loading of welded médium – and high- strenght steels", International Journal Fatigue, 26:487-496, 2004.
15. Bannantine J.A., Comer J.J., Handrock J.L. Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. Prentice-Hall. New Jerse, 1990.
16. Kim, K.S., Chen X., Han, C., Lee, H.W., "Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading", International Journal of Fatigue, p. 783-793, 2002.
17. Nieslony, A., Dsoki, C., Kaufmann, H., Krug, P., "New Method for evaluation of the Manson- Coffin- Basquin and Ramberg – Osgood equations with respect to compatibility", International Journal of Fatigue 30 1967–1977, 2008.