Proyecto Final de Carrera

“Obtención de una expresión mejorada para el cálculo de la energía que absorbería al impacto un acero micro aleado.”

Tomás G. Otharán
Legajo 49198

Indice

- Abstract 2
- Características de las muestras 3
- Descripción del proceso de laminado. Obtención de probetas 4
- Procedimiento 5
- Primera Modificación: Cambio de escalas de temperatura 6
- Segunda Modificación: Temperatura de ensayo 6
- Resultados 9
- Conclusiones 11
- ANEXO I. Micrografía 13
- ANEXO II. Segunda Modificación 15
- ANEXO III. Datos utilizados. Tabla de Cálculo 20
- ANEXO IV. Gráficos 27

Abstract

Tomás G. Otharán

Dada la creciente demanda de aceros para ingeniería de los cuales se necesita sean más resistentes y versátiles, con propiedades mejoradas y más baratos, se reconoce que los esfuerzos deben enfocarse en el diseño del proceso de fabricación del acero mismo, eligiendo los componentes en base a las propiedades finales requeridas.

Así, la pregunta que se plantea es: ¿C*omo estar seguros de que el acero que se está por producir cumple con los requerimientos mecánicos necesarios?*

En el presente trabajo se tomó información empírica y conclusiones teóricas de un ensayo escrito por Hernán Semeniuk, Jorge Moriconi y Roberto Bruna[1], y se obtuvieron relaciones mejoradas.

Partiendo de ensayos realizados por Ternium Siderar, y examinando los resultados y las muestras por ellos provistas, se obtuvo una expresión que determina la energía absorbida al impacto en función de la temperatura, además de otras variables.

[1] *"Influencia del procesamiento termo mecánico en la tenacidad de aceros microaleados"*, 19ª conferencia sobre laminación en IAS, 2012 Rosario, Santa Fe, Argentina

- **Características de las muestras**

El trabajo girará en torno a muestras obtenidas de los aceros laminados en caliente por Siderar, las cuales han sido sometidas a un ensayo de impacto de tipo Charpy. Los datos entregados junto con las muestras son:

- Temperatura de ensayo
- Temperatura de bobinado
- Energía absorbida al impacto
- Condiciones de laminado
- Composición química correspondiente

Las muestras de ensayo de fractura son en total 55, correspondientes a 5 ensayos Charpy para 11 bobinas distintas. Los ensayos corresponden a las temperaturas de 20, 0, -20, -40 y -50 °C. Las probetas corresponden a dos tipos de acero: microaleados al **Nb-Ti** y al **C-Mn-V**. La composición química de los mismos corresponde a la siguiente tabla:

% C	% Mn	% P	% S	%Si	%Al	N ppm	% Nb	% Ti	% V
0.07 -0.09	1.3 - 1.45	0 - 0.02	0 - 0.01	0.14 - 0.22	0.025 - 0.06	70 máx	0.04 - 0.052	0.015 - 0.025	0 - 0.005
0.15 - 0.17	1.05 -1.2	0 - 0.02	0 - 0.012	0.1 - 0.17	0.02 - 0.06	92 máx	0 - 0.005	0 - 0.005	0.04 - 0.055

Tabla 1: *Rangos de composiciones químicas utilizadas.*

También se proveyeron en total 18 probetas para observación micrográfica.

Dividiremos las probetas en dos grupos, catalogando según la composición química:

Bobina N°	Grupo
595645	Nb – Ti
595646	Nb – Ti
567854	Nb – Ti
567848	Nb – Ti
602094	C - Mn - V
602119	Nb – Ti
602120	Nb – Ti
602078	
595631	C - Mn - V
634372	C - Mn - V
634100	C - Mn - V

Tabla 2. *División en grupos de las probetas, según la composición química.*

- **Descripción del proceso de laminado en Ternium Siderar. Obtención de probetas.**

La materia prima para la bobina de acero laminado consiste en planchones del mismo material, típicamente de unos 200 mm de espesor, 6000 mm de largo y típicamente 1200 mm de ancho. Estos son calentados en hornos a gas, hasta una temperatura de alrededor de 950°C, durante aproximadamente una hora; es importante lograr que la temperatura sea uniforme en todo el volumen. Una vez listo el proceso de calentamiento, los planchones son empujados mediante pistones hidráulicos fuera del horno, hacia el tren de laminado.

La planta de Ternium Siderar posee un tren laminador en caliente que consta de 10 puentes, los primeros 4 de los cuales se denominan “desbastadores”, independientes entre sí; son tareas de estos puentes la “limpieza” superficial del acero y las primeras grandes reducciones. Los siguientes 6 puentes son los que producen las reducciones más finas; no son independientes entre sí, lo que significa que mientras la chapa está saliendo de un puente, simultáneamente está entrando al siguiente. Estos últimos puentes son los que dan la forma y espesor final al acero. Una línea típica puede estirar un planchón hasta lograr una longitud unas 100 veces mayor que la inicial, reduciendo el espesor en una proporción similar. El ancho de la bobina final es el mismo que el del planchón, las reducciones aplicadas son solamente en el espesor. Esto se logra con rodillos auxiliares, ubicados en forma vertical a los costados del tren.

A continuación de la laminación se produce el enfriamiento de la chapa y el bobinado final. El enfriamiento no es total - es decir, no se lleva al acero a temperatura ambiente – sino que sólo se reduce la temperatura para evitar deformaciones, oxidaciones y cambios micro estructurales; tampoco es homogéneo: las temperaturas se reducen en forma localizada mediante un tren especial que rocía refrigerante sobre la chapa; todo el proceso se controla en función de las propiedades finales que se requieran de ese acero particular. Las temperaturas típicas de bobinado están en el orden de los 500 – 600 °C. Entre las variables más importantes que se manejan en el proceso de bobinado están las temperaturas inicial y final, y la velocidad de enfriamiento.

Las probetas se cortan directamente de la chapa laminada, luego del despunte de la misma, pudiendo hacerse en posición longitudinal o transversal a la dirección de laminación. Particularmente en este trabajo se utilizaron probetas transversales, con la entalla atravesando el espesor de la chapa; esto se manifiesta en la superficie de fractura, cuya microestructura está fuertemente orientada siguiendo la dirección de laminación.

- **Procedimiento**

Partimos de la siguiente expresión, sólo válida para las temperaturas de -40 y -50°C, con la cual se calcula la energía absorbida al impacto para aceros microaleados al Nb – Ti y al C – Mn – V. La misma puede encontrarse *"Influencia del procesamiento termo mecánico en la tenacidad de aceros microaleados"*:

$$EA(J) = 814.96 + 8.16 * \left[\frac{Mn}{C}\right] - 5.86[Perlita] + 121.05 * \ln(F9 - F10) - 0.53 * espesor - 0.76 * TFL - 0.16 * TB \quad (1)$$

Donde:

Mn, C y Perlita[2] expresados en porcentajes en peso.

TFL y TB son las temperaturas de finalización de laminado y de bobinado respectivamente (en °C).

F9-F10 expresa la diferencia de espesores a la entrada del noveno puente y la salida del décimo (mm).

La expresión anterior presenta dos problemas principales:

1. No depende de la temperatura de ensayo, entonces sólo es válida a la temperatura de los ensayos de los cuales fueron obtenidos los datos (Charpy a -40 y -50 °C).
2. La fórmula utiliza las temperaturas en escala Celsius; esto representa un problema para la modificación que se pretende hacer, puesto que la misma implica introducir la temperatura de ensayo como variable, y ésta puede ser de valores como 0 (cero) grados Celsius, o menores, con lo cual el resultado de la fórmula podría no tener sentido.

La corrección de estos problemas es el eje central del presente trabajo, y se hará modificando la fórmula de la siguiente manera:

- 1ra modificación: Cambiando la escala de temperaturas.
- 2da modificación: Introduciendo un coeficiente relacionado a la **temperatura de ensayo.**
- 3ra modificación: Introduciendo un coeficiente relacionado **al área de fractura, en función de la temperatura de ensayo (ver en ANEXO II).**

La primera modificación planteada tiene un efecto *directo* sobre la fórmula, esto es, permite el cálculo de la energía absorbida sin necesidad de otros ensayos. La segunda modificación es *indirecta*, puesto que es necesario examinar el área de fractura para obtener los datos para ingresar en la fórmula. De cualquier

[2] El porcentaje de perlita se buscó determinar mediante el estudio metalográfico de las muestras, sin embargo, no fue posible por la falta de un software adecuado. El desarrollo completo del tema se encuentra en el ANEXO I.

manera, la introducción del término mejora sustancialmente los resultados, razón por la cual se considera apropiado conservar la modificación.

- **Primera modificación: Cambio de escala de temperatura**

El primer paso a seguir antes de comenzar a trabajar con temperaturas es compatibilizar la expresión con el uso de la escala Kelvin. A este efecto, se le dan valores a la ecuación en escala Celsius, se registra el resultado, y luego se compara con la misma expresión en escala Kelvin. Si el resultado es numéricamente menor en escala Kelvin (como es previsible dado que las temperaturas están restando en la ecuación), entonces la diferencia entre ambos resultados debe sumarse a la expresión en Kelvin, y así obtenemos el término independiente necesario.

Tenemos entonces, para los siguientes valores representativos:

[Mn/C]	[Perlita]	ln[F9-F10]	espesor	TFL (°C)	TB (°C)
3	3	0.3	9.5	650	550

$$\mathbf{EA(J)} = 814.96 + 8.16 * 3 - 5.86 * 3 + 121.05 * 0.3 - 0.53 * 9.5 - 0.76 * 650 - 0.16 * 550 = \mathbf{270.34}$$

[Mn/C]	[Perlita]	ln[F9-F10]	espesor	TFL (K)	TB (K)
3	3	0.3	9.5	650 + 273	550 + 273

$$\mathbf{EA(J)} = 814.96 + 8.16 * 3 - 5.86 * 3 + 121.05 * 0.3 - 0.53 * 9.5 - 0.76 * 923 - 0.16 * 823 = \mathbf{19.18}$$

La diferencia entre ambos valores es 251.16; el término independiente para la ecuación en escala Kelvin es entonces: 814.96 + 251.16 = **1066.12**

La ecuación que usaremos entonces es:

$$\mathbf{EA(J)} = 1066.12 + 8.16 * \left[\frac{\mathrm{Mn}}{\mathrm{C}}\right] - 5.86 * [\mathrm{Perlita}] + 121.05 * \ln[\mathrm{F9} - \mathrm{F10}] - 0.53 * \mathrm{espesor} - 0.76 * \mathrm{TFL} - 0.16 * \mathrm{TB} \quad (1.a)$$

- **Segunda modificación: Temperatura de ensayo**

Para incluir la temperatura en la expresión se plantea lo siguiente: multiplicar la ecuación (1.a) por un factor de la forma $k * T^m$, donde T es la temperatura de ensayo expresada en escala Kelvin. Se usa esta expresión como la más simple para aproximar con una forma polinómica la curva.

La ecuación sugerida entonces es

$$\mathbf{EA} = F(\,) * \mathrm{kT^m} \quad (2),$$

donde

$$F(\,) = \left(1066.12 + 8.16 * \left[\frac{\mathrm{Mn}}{\mathrm{C}}\right] - 5.86 * [\mathrm{Perlita}] + 121.05 * \ln[\mathrm{F9} - \mathrm{F10}] - 0.53 * \mathrm{espesor} - 0.76 * \mathrm{TFL} - 0.16 * \mathrm{TB}\right)$$

Tomando logaritmo a (2), tenemos:

$$\ln(\mathrm{EA}) = \ln\left(F()\right) + \ln(\mathrm{k}) + \mathrm{m} * \ln(\mathrm{T}) \qquad (2.a)$$

$$\ln(\mathrm{EA}) - \ln\left(F()\right) = \ln(\mathrm{k}) + \mathrm{m} * \ln(\mathrm{T}) \qquad (2.b)$$

En el último paso, la ecuación resulta:

$$\ln\left(\frac{\mathrm{EA}}{F(\,)}\right) = \ln(\mathrm{k}) + \mathrm{m} * \ln(T) \quad (3)$$

La ecuación (3) es la ecuación de una recta donde la variable independiente es T, y los valores *k* y *m* son indeterminados. La magnitud de dichos valores se determinará utilizando los datos proporcionados por los ensayos Charpy. El método es el siguiente:

- Se utiliza la ecuación (1) con los datos de ensayo a -40°C y -50°C para calcular el porcentaje de perlita de cada acero (ver ANEXO I). Se toma un promedio del valor conseguido para cada temperatura.
- Con esos porcentajes de perlita, se calcula $\ln\left(\frac{\mathrm{EA}}{F(\,)}\right)$, utilizando el valor numérico de EA obtenido en cada ensayo, y el valor de F() calculado correspondientemente.
- Una vez obtenidos todos los datos para todos los aceros en todas las temperaturas, se hace una estimación lineal (método de cuadrados mínimos) para obtener los valores de *m* y *ln(k)* en la ecuación (3).

Los datos y cálculos realizados pueden encontrarse en el ANEXO III.

Los resultados fueron: m = 2.677 y k = $5.089*10^{-7}$.

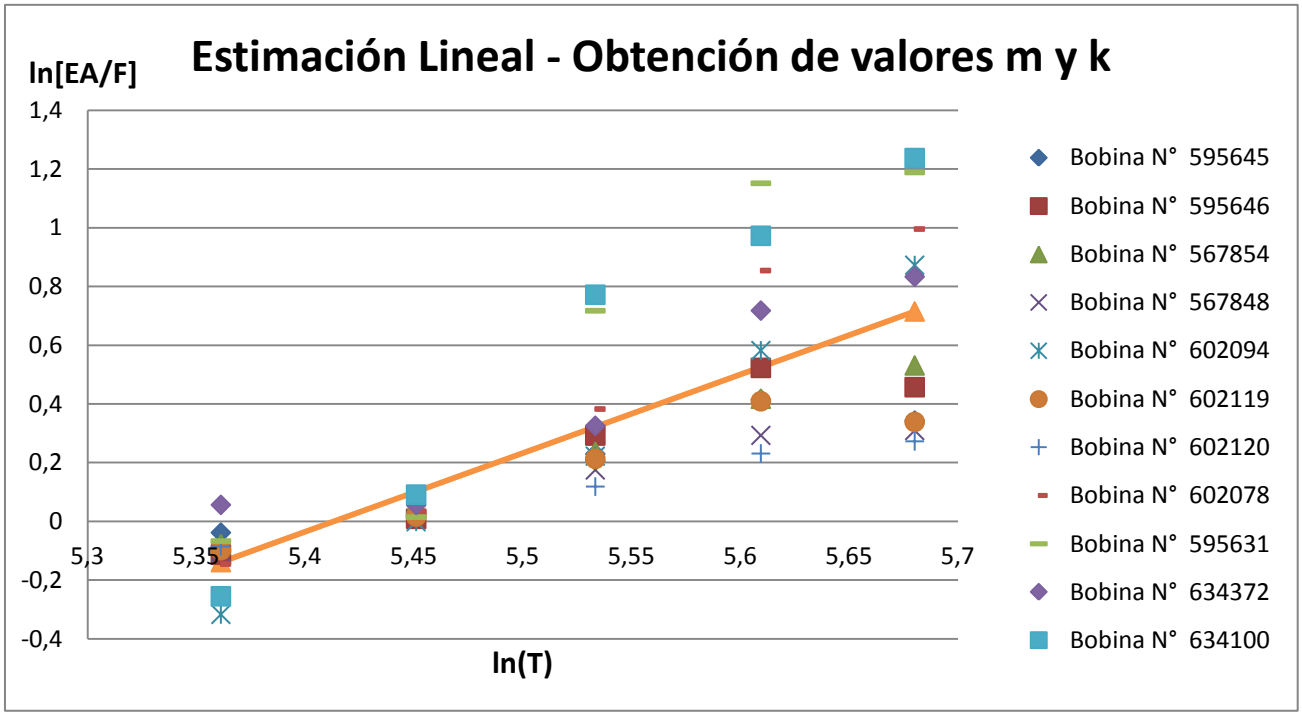


Gráfico 1. Representación de los datos de ensayo y la estimación lineal.

La variable *dependiente* expresa el error relativo entre el valor de energía absorbida por ensayo y el calculado con la fórmula (1). Con estos valores de *m* y *k* se calcula **EA** nuevamente, esta vez con la ecuación (2), para realizar una comparación con los resultados de ensayo. Esto nos permitirá evaluar cuán alejados de los valores de ensayo están los valores de la ecuación modificada.

- **Resultados**

La siguiente tabla compara los resultados numéricos obtenidos al aplicar la fórmula modificada sólo con la temperatura, fórmula (2), contra los obtenidos de ensayo:

	Energía absorbida en ensayo (J)					**Energía calculada (J)**				
N° de bobina	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213
595645	165	177	147	120	112	240	199	162	130	102
595646	169	181	144	108	96	220	182	149	119	94
567854	149	133	111	93	81	180	149	121	97	76
567848	183	180	160	140	121	275	228	186	149	117
602094	102	76	53	42	31	88	72	59	47	37
602119	177	190	156	128	114	259	214	175	140	110
602120	195	187	167	156	136	304	252	205	165	130
602078	128	111	69	48	40	97	80	65	52	41
595631	146	141	91	45	41	92	76	62	50	39
634372	211	188	127	97	97	187	155	127	102	80
634100	129	99	81	41	29	75	62	50	40	32

Tabla 3. Comparación entre los valores de energía obtenidos de ensayo, y los calculados con la ecuación (2).

Cada resultado numérico se divide por el correspondiente resultado empírico para obtener una idea de cuán alejada es la estimación teórica con respecto a la realidad (una idea del error):

$$\frac{\boldsymbol{Energía\ calculada\ (J)}}{\boldsymbol{Energía\ absorbida\ en\ ensayo\ (J)}}$$

N° de bobina	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213
595645	1,45	1,12	1,10	1,09	0,91
595646	1,30	1,01	1,03	1,10	0,98
567854	1,21	1,12	1,09	1,05	0,94
567848	1,50	1,27	1,16	1,06	0,97
602094	0,86	0,95	1,11	1,11	1,20
602119	1,46	1,13	1,12	1,09	0,96
602120	1,56	1,35	1,23	1,06	0,95
602078	0,76	0,72	0,94	1,07	1,01
595631	0,62	0,54	0,68	1,09	0,93
634372	0,89	0,83	1,00	1,05	0,82
634100	*0,58*	*0,62*	*0,62*	*0,98*	*1,09*

Tabla 4. Relación entre los valores de la tabla anterior. Los resultados se ajustan con bastante precisión en las inmediaciones de 233K (-40 °C).

En la temperatura de 233 K (-40°C), la estimación resulta bastante acertada (una diferencia de no más del 11% en un solo caso) debido a que la fórmula original se obtuvo con datos de probetas ensayadas a esa temperatura. En la mayoría de los casos la zona mejor representada por la fórmula modificada es la de transición. Consideramos aquí que una diferencia en los valores de hasta 10% es aceptable, puesto que los datos empíricos pueden contener errores de medición.

Para cada temperatura de ensayo el error *promedio* no supera el 10% (promediando todas las muestras).

La fórmula modificada predice aceptablemente la zona de transición (DBTT, ductile-brittle transition temperature), puesto que esa zona es de tendencia lineal en la mayoría de los aceros y dado que la temperatura se insertó en la fórmula mediante una estimación lineal (método de los cuadrados mínimos). Saliendo del rango de la DBTT, la estimación teórica difiere en mucho del resultado empírico.

Por otro lado, para los aceros que se comportan como enteramente frágiles o enteramente dúctiles en el rango de temperaturas ensayado, también es aceptable la predicción, puesto que en esos casos la absorción de energía es aproximable por una función lineal (ver anexo *Gráficos*).

Veremos también el efecto de agregar el *área deformada* como variable, usando la ecuación (4) obtenida en el ANEXO II:

	Energía absorbida en ensayo (J)					**Energía calculada (J)**				
N° de bobina	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213
595645	165	177	147	120	112	216	182	151	123	99
567854	149	133	111	93	81	173	143	118	95	75
595631	146	141	91	45	41	86	72	60	49	40

Tabla 5. Comparacion entre los valores obtenidos de ensayo y los calculados con la ecuación (4).

$$\frac{\boldsymbol{Energía\ calculada\ (J)}}{\boldsymbol{Energía\ absorbida\ en\ ensayo\ (J)}}$$

N° de bobina	T (K): 293	T (K): 273	T (K): 253	T (K): 233	T (K): 213
595645	1,31	1,02	1,02	1,03	0,87
567854	1,16	1,08	1,06	1,02	0,93
595631	0,59	0,51	0,66	1,09	0,95

Tabla 6. Relación entre los valores de la tabla anterior. Puede verse una mejoría apreciable en los valores de los dos primeros aceros, incluso en los extremos, si se comparan con los resultados obtenidos en la tabla 4.

Estos resultados muestran claramente que la inserción de la ductilidad como variable mejora notablemente los resultados para los aceros que son *dúctiles* (véase tabla 2), en este caso los dos primeros de la lista, pero no para los que son frágiles.

- **Conclusiones**

Podemos decir, luego de la revisión de los datos y resultados anteriores, que la modificación de la fórmula es **acertada**, puesto que es de gran utilidad a la hora de predecir el comportamiento del acero micro aleado; esto es particularmente útil en el diseño del mismo.

En base a los resultados obtenidos, se concluye que:

- La inserción de la temperatura de ensayo en la fórmula es un cambio clave; si bien la manera expresada aquí es una de tantas posibles, en el presente trabajo arrojó resultados que pueden considerarse precursores para una investigación más profunda.
- Las diferencias encontradas en las temperaturas extremas pueden deberse a que la estimación usada fue lineal.
- Aunque la expresión obtenida no es ciento por ciento *precisa*, su mayor utilidad reside en la posibilidad de **estimar** la cantidad de energía que absorberá un acero de las características estudiadas, sobre todo alrededor de la temperatura de -40°C. Esto permite saber si el acero tendrá un comportamiento frágil o dúctil, y si sirve para la aplicación para la cual se lo está diseñando.
- Los mejores resultados se alcanzaron para los aceros que presentan tendencia a ser dúctiles; una mejor investigación debería hacerse teniendo en cuenta esto (estudiando comportamientos dúctiles y frágiles por distintos caminos, y obteniendo fórmulas para cada uno de ellos).
- La inserción del indicador de área dúctil también tuvo sus repercusiones en los resultados, mejorándolos en algunos casos. De cualquier manera, esto no es particularmente útil puesto que obliga a realizar ensayos adicionales para poder medir *A*.
- En cuanto a la observación cualitativa de comportamiento dúctil – frágil, se encontró que los aceros con comportamiento ***frágil***, presentaban dicho comportamiento por debajo de los 75J de energía absorbida. Por otro lado, los que presentaban comportamiento ***dúctil***, lo hacían por encima de esa cota. Esto puede observarse en el ANEXO II. Gráficos.
- Globalmente, todo el proceso puede dar resultados con mayor precisión si se mejoran los métodos de medición de parámetros (por ejemplo para el indicador *A)*, y se unifican las muestras (espesores iguales, toma de datos de una misma temperatura de ensayo, etc.).

Podemos agregar como conclusión final, orientada a obtener mejores resultados, que la mejor manera de optimizar la fórmula planteada es recalcularla con datos de los mismos aceros, para **todas** las temperaturas de ensayo. Es decir, repetir el proceso original planteado en *"Influencia del procesamiento termo mecánico en la tenacidad de aceros microaleados"* (con el cual se obtiene una expresión que ***no*** contiene a la temperatura como variable), para cada temperatura en particular. Con esto obtendremos una familia de fórmulas, y una serie de datos mucho más completa a la cual aplicar el método planteado aquí.

ANEXO I

- **Micrografía**

Dado que el porcentaje de perlita presente en el acero es un dato necesario para la aplicación de la fórmula (1), varias de las muestras se procesaron a fin de lograr establecer dicho porcentaje.

El primer paso en esta etapa fue la preparación de las muestras. Las mismas consistían en probetas ensayadas bajo protocolo Charpy, aglomeradas con polímero para poder ser pulidas. En total se pulieron 18 probetas, en 6 grupos distintos. La superficie que se observó fue la de fractura. El proceso de pulido demoró alrededor de 8 horas para todas las muestras, y se hizo con métodos mecánicos: utilizando una máquina pulidora de laboratorio con lijas cada vez más finas, rotando las superficies 90 grados al cambiar de lija, una vez borradas toda marca de la lija anterior. Las lijas utilizadas fueron desde la N° 360 hasta llegar a la N° 1500, y luego el pulido a espejo con alúmina. Finalizado este proceso, se atacaron las muestras con Nital durante unos segundos, para revelar los bordes de grano y poder observar al microscopio. Una vez terminada cada muestra, se la guardó en una campana de vacío para evitar oxidaciones. Al proceder de la misma forma con todas las muestras, queda asegurado que los resultados serán comparables entre sí.

La estructura granular se observó mediante microscopio óptico, con aumentos de 100x, 400x y 1000x. Las fotografías que se usarán en el presente trabajo fueron tomadas directamente desde una computadora, a través de la cámara provista para utilizar con el microscopio. Las fotos se tomaron con filtro de luz verde, para dejar en evidencia los bordes de grano, ya que sin el filtro el contraste era menos claro.

Los resultados obtenidos de la observación micrográfica permiten expresar que la cantidad de perlita varía desde ser muy escasa -sólo presente en borde de grano o en aglomeraciones esporádicas- hasta ocupar una superficie apreciable, en formaciones del tamaño de los granos ferríticos o incluso mayores.

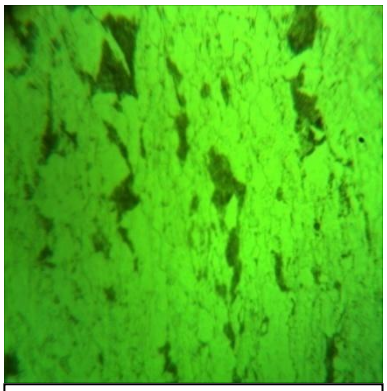


Fig 1. Probeta Nº7, aumento 1000X, zona central

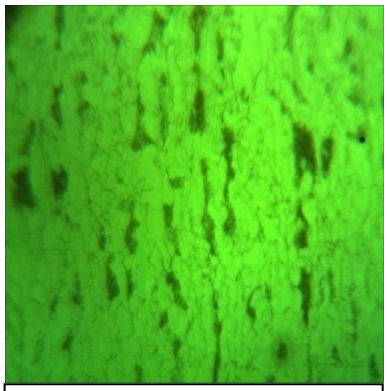


Fig 2. Probeta Nº9, aumento 1000X, zona central

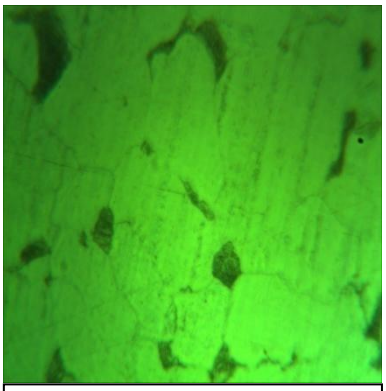


Fig 3. Acero 1010, aumento 1000X, zona central

Las imágenes anteriores muestran una comparación entre los aceros microaleados y sus formaciones perlíticas; y entre un acero común (1010). Este último presenta granos considerablemente más grandes, y perlita más escasa en porcentaje.

Se observa también que ciertos aceros están fuertemente orientados en la dirección de laminación.

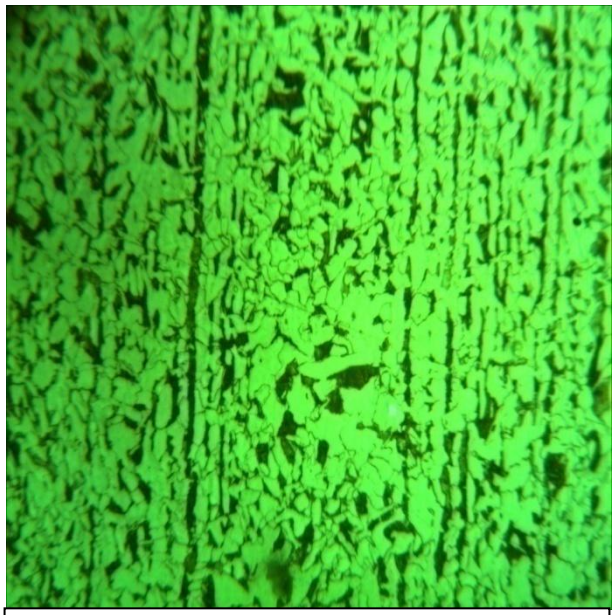


Fig 4. Probeta Nº10, aumento 400X, zona central

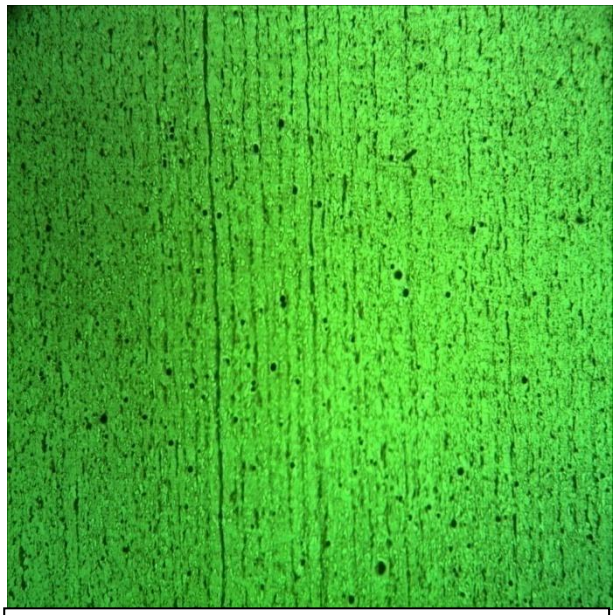


Fig 5. Probeta Nº12, aumento 100X, zona central

Al no disponer del software adecuado, las imágenes presentadas solo sirven para dar una estimación cualitativa del porcentaje de perlita.

Para el desarrollo del trabajo, el valor del porcentaje de perlita presente en los aceros se estimó utilizando la ecuación (1) en sentido inverso, es decir, utilizando los valores de EA empíricos, se introdujeron en la fórmula todos los datos y se calculó el porcentaje de perlita que el acero *debería haber tenido para absorber la energía correspondiente.* Este valor de Perlita es el que luego se utiliza en todos los cálculos.

ANEXO II

- **Tercera modificación: Área de fractura**

En su trabajo, Hernán Semeniuk, Jorge Moriconi y Roberto Bruna establecen como indicador cuantitativo de área dúctil a la relación entre la menor deformación lateral y la misma longitud sin deformar. Esto no es del todo representativo, como se verá a continuación.

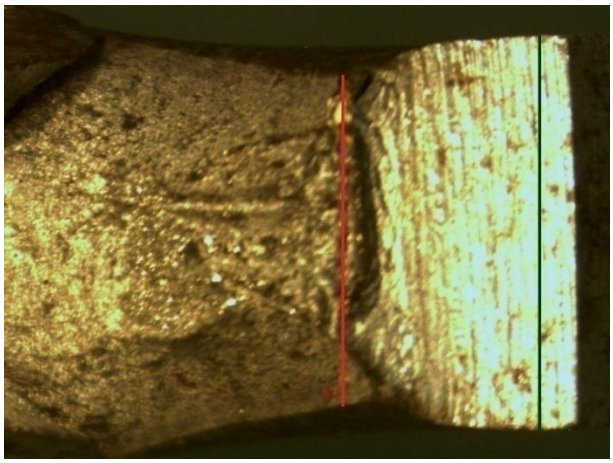


Imagen 1: representación de la manera de medir la estricción lateral. En rojo la mínima longitud deformada, y en verde la longitud original de la entalla.

En *"Influencia del procesamiento termo mecánico en la tenacidad de aceros microaleados"*, encontramos ciertas discrepancias (ver gráfico 2); mientras que en uno de los gráficos se expresa que para una bobina en particular hubo cambios de alrededor de 10% en la energía absorbida entre las temperaturas de -50 y -40 °C, el siguiente gráfico expresa que la estricción lateral de esa misma probeta aumentó aproximadamente un 300% en el mismo rango. Esto se evidencia porque, estando las temperaturas citadas en la zona de comportamiento frágil del material, no puede haber un aumento tan grande de estricción (como deformación lateral), ya que esto indicaría un comportamiento dúctil.

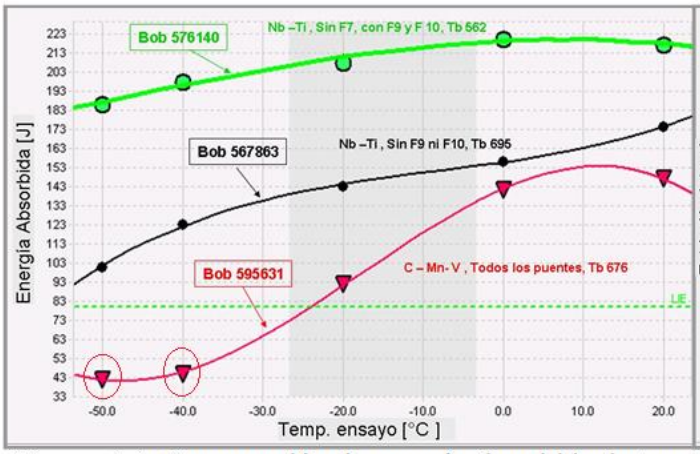


Figura 14: Comparación de energía absorbida de tres muestras representativas.

***Figure 14**: Comparison of energy absorbed of three representative specimens.*

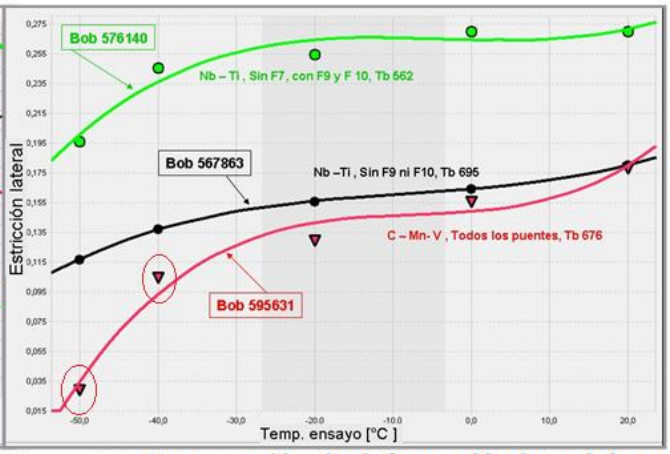


Figura 15: Comparación de deformación lateral de tres muestras representativas.

***Figure 15**: Comparison of side deformation of three representative specimens.*

*Gráfico 2. Extracto del trabajo "*Influencia del procesamiento termo mecánico en la tenacidad de aceros microaleados*". Se aprecia en los puntos marcados las diferencias entre la energía absorbida y la estricción lateral correspondiente.*

Es por esto que en el presente trabajo se busca cuantificar el área dúctil **como la relación entre el aumento de área y el área original**. Se propone un nuevo indicador, *A*, como la relación $\frac{A_1}{S}$, donde A_1 representa el área definida por los cuatro puntos extremos de la superficie de fractura, vista de frente, aproximada por un trapecio, y S el área de la sección transversal de la probeta en la zona de rotura (sin deformar y sin tener en cuenta el área de la entalla).

De esta manera, tenemos como ejemplo:

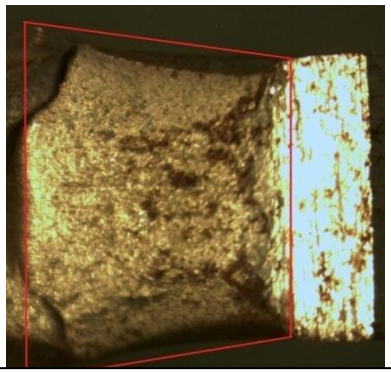


Imagen 2: representación de A_1 sobre una foto de una probeta ensayada (dúctil).

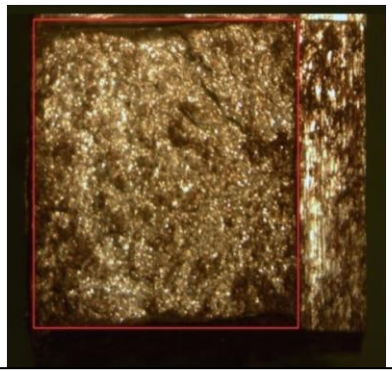


Imagen 3: representación de A_1 sobre una foto de una probeta ensayada (frágil).

En la imagen 2 se puede observar que el área delimitada se aleja bastante de la forma cuadrada de la sección transversal, esto implica un porcentaje de deformación mayor que en la imagen 3, cuya área delimitada es muy parecida a la sección transversal original.

La medición de las áreas como se explicó anteriormente se hará mediante software, midiendo sobre las fotos de las probetas ensayadas.

Denominando con L_e la longitud original de la entalla, y L la longitud del lado perpendicular a ella, tenemos que

$$S = L_e * L$$

Denominando con L_f y L_i a las longitudes finales de los lados que se deforman, tenemos

$$A_1 = \frac{L_f + L_i}{2} * L$$

Entonces

$$A = \frac{A_1}{S} = \frac{\left(\frac{L_f + L_i}{2}\right) * L}{L_e * L}$$

$$A = \frac{L_f + L_i}{2L_e}$$

Se obtuvo este indicador para cada probeta midiendo sobre la imagen digital la cantidad de pixeles entre los puntos deseados.

Los resultados, para las 3 bobinas medidas en cada temperatura de ensayo son los siguientes:

Bobina N°	Temperatura de ensayo (K)	L_e Promedio	L_i Promedio	L_f Promedio	A
567854	293	786	705	967,5	6,393%
	273	788,5	702	972	6,151%
	253	782,5	693,5	952	5,144%
	233	786,5	712,5	940	5,054%
	213	789	755	896	4,626%
595631	293	823,5	701	1040	5,707%
	273	801	711	984	5,805%
	253	859	753	1010	2,619%
	233	876,5	772	983,5	0,143%
	213	898	826,5	941	-1,587%
595645	293	826	743,5	1083	10.563%
	273	795,5	723,5	1035,5	10,559%
	253	841	730,5	1087	8,056%
	233	814	692	1010	4,545%
	213	733,5	631	897	4,158%

Tabla 7. Se entiende que el indicador A no puede ser negativo, y se atribuye ese tipo de resultados a errores en la medición. En la sección de Conclusiones se ampliará el concepto.

- **Linearización**

Con los valores obtenidos del indicador *A* para cada probeta se construyó un gráfico que representa el porcentaje de cambio de área para cada acero en particular.

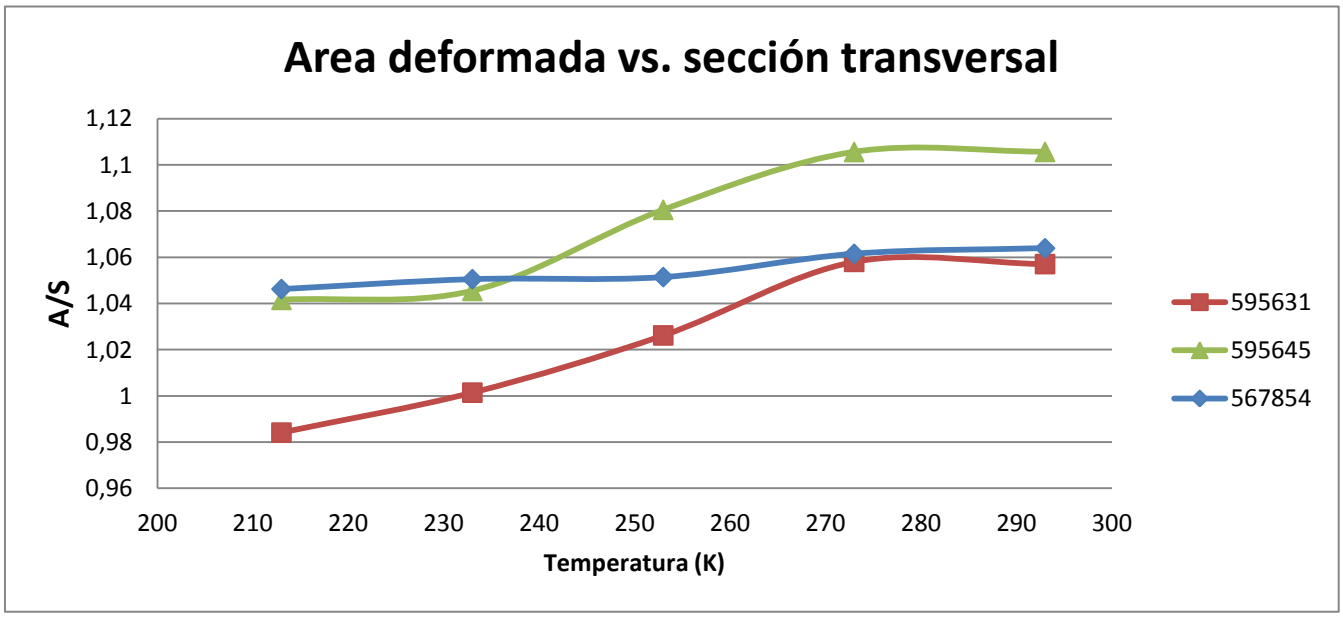


Gráfico 3. Representación de los 3 aceros para los cuales se aplicó la fórmula (4). De aquí se obtiene el término lineal que se incorpora en la fórmula.

Con esta información podemos realizar una aproximación lineal del cambio de área en función de la temperatura de ensayo, con lo cual obtendremos una función lineal que dependerá de la temperatura,

pero cuya pendiente y ordenada estarán dictadas por los valores de *deformación* del acero en particular. Esta función lineal será la que anexaremos a la fórmula obtenida para **EA**, con el fin de tomar en cuenta el porcentaje de área dúctil.

De esta manera la ecuación (2):

$$\mathbf{EA} = F(\,) * \mathrm{kT^m} \quad (2),$$

Se convierte en

$$\mathbf{EA} = F(\,) * \mathrm{kT^m}/(\mathrm{pT} + \mathrm{q}) \quad (4),$$

Donde *p* y *q* con coeficientes que se calcularán para cada acero en particular, en función de los datos obtenidos de la medición de área de fractura. Es ***inversamente proporcional*** porque empíricamente se obtuvo el mejor resultado así. Los valores de *p* y *q* dependen sólo del acero que se utilice, con lo cual deben realizarse ensayos Charpy al mismo para determinarlos.

ANEXO III

Datos utilizados.

Los espesores de probeta utilizados en el trabajo no fueron los establecidos por norma; esto puede llevar a que los resultados no sólo no sean comparables entre sí, sino tampoco representativos a los fines de la norma ASTM. Por esta razón haremos algunas aclaraciones al respecto, para un mejor entendimiento de las conclusiones a las cuales se llegó.

La norma ASTM E23 ("Standard methods for notched bar impact testing of materials") considera, en cuanto al tamaño de las probetas, que:

X1.3.1 Increasing either the width or the depth of the specimen tends to increase the volume of metal subject to distortion, and by this factor tends to increase the energy absorption when breaking the specimen. However, any increase in size, particularly in width, also tends to increase the degree of constraint and by tending to induce brittle fracture, may decrease the amount of energy absorbed. Where a standard-size specimen is on the verge of brittle fracture, this is particularly true, and a double width specimen may actually require less energy for rupture than one of standard width.
X1.3.2 In studies of such effects where the size of the material precludes the use of the standard specimen, for example when the material is 6.35-mm (0.25-in.) plate, subsize specimens are used. Such specimens (Fig. A3.1) are based on the Type A specimen of Fig. 1.
X1.3.3 General correlation between the energy values obtained with specimens of different size or shape is not feasible, but limited correlations may be established for specification purposes on the basis of special studies of particular materials and particular specimens. On the other hand, in a study of the relative effect of process variations, evaluation by use of some arbitrarily selected specimen with some chosen notch will in most instances place the methods in their proper order.

El punto 1.3.1 indica que cualquier aumento en las dimensiones de la probeta por encima del estándar establecido, por un lado tiende a aumentar la absorción de energía debido al mayor volumen de material sujeto a distorsión; y por otro lado, tiende a facilitar la fractura frágil debido a que aumentan las restricciones para el libre movimiento de la probeta.

El punto 1.3.3 indica que una correlación general para los valores de energía obtenidos entre especímenes de distintos tamaños no es factible, pero correlaciones limitadas para estudios especiales y materiales particulares pueden ser establecidas; y que por otro lado, en el estudio de las variaciones debidas al proceso, la evaluación mediante un espécimen arbitrario hará, en casi todas las instancias, un uso correcto del método.

Los especímenes utilizados en este trabajo se basaron en el tipo A que establece la norma.

Las consideraciones anteriores refuerzan la conclusión a la que se ha llegado, la cual indica que todo el proceso puede (*debe*) mejorarse si los ensayos se hicieran con probetas normalizadas, y los métodos de medición estandarizados. Todos los resultados a los cuales se ha arribado en este trabajo son empíricos, y deben ser tomados como tal. Al establecer bases sólidas, es la intención de este trabajo la de ser un precursor para futuras investigaciones.

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
595645	EP	7,5	165	178	148	120	113	508	614	29	89
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9,5	1060	7040	0,085	1,373	0,0177	0,0045	0,168	0,00905	0,01718	0,02452
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0469	0,00234	0,0201	0,03	38	2,7	885	647	0,180	0,347	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
595646	EQ	7,5	170	181	144	108	96	490	582	30	86
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9,5	1060	7040	0,082	1,367	0,0136	0,0029	0,196	0,01401	0,0187	0,02728
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0509	0,003	0,0195	0,032	41	2,4	870	688	0,171	0,350	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
567854	BT		149	133	111	93	81	476	589	29	88
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9,5	1030	7040	0,082	1,359	0,0176	0,0066	0,172	0,00934	0,01663	0,01815
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0453	0,0024	0,0215	0,038	33	2,9	886,105	657	0,000	0,243	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
602078	EU	7,5	128	111	69	49	41	340	520	30,79	88
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	8	1385	7051	0,1566	0,9388	0,0135	0,003	0,1795	0,0091	0,01643	0,01882
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
		0,001	0,002	0,0389	54	2,2	875	642	0,260	0,482	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
567848	BY		183	180	160	140	121	500	597	30	87
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9,5	1030	7040	0,085	1,343	0,0137	0,0062	0,17	0,00689	0,01632	0,01357
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0438	0,00194	0,0203	0,044	50	2,7	863,6573	597	0,000	0,246	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
602119	ER	6,7	177	190	156	128	114	488	585	29,82	93
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	7	1060	7040	0,082	1,351	0,0113	0,0033	0,184	0,00389	0,01476	0,01598
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0467	0,00281	0,0187	0,034	48	2,5	888	679	0,332	0,617	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
602120	ET	6,7	195	187	167	156	136	492	581	29,76	94
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	7	1060	7040	0,082	1,351	0,0113	0,0033	0,184	0,00389	0,01476	0,01598
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,0467	0,00281	0,0187	0,034	48	2,5	891	641	0,339	0,622	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
634372	IG		211	188	127	97	97	426,44	574,07	31,69	
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9	1120	7640	0,161	1,091	0,0094	0,0018	0,125	0,0116	0,0154	0,027
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,001	0,043	0,002	0,051	75		867	626	0,000	0,223	

			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
634100	IH		129	99	81	41	29	428,92	576,12	27,49	
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	7,5	1510	7640	0,159	1,139	0,0126	0,0025	0,125	0,008	0,0151	0,0171
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
	0,001	0,047	0,002	0,046	67		889	656	0,301	0,548	

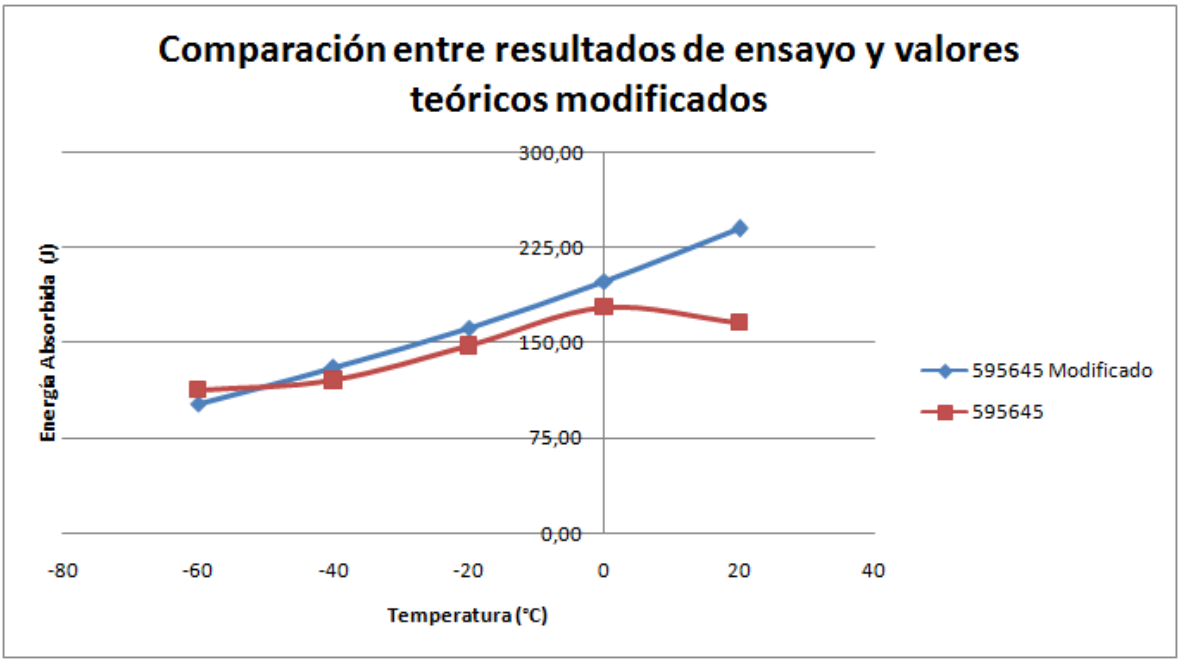
			Charpy								
N° de bobina	**Identif.**	**Esp. (mm) Probeta**	**20**	**0**	**-20**	**-40**	**-60**	**E (Mpa)**	**R (Mpa)**	**A (%)**	**Dureza HRB**
595631	EO	7,5	147	141	92	45	42	396	555	33	86
	Espesor	Ancho	Grado	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
	9,5	1245	7640	0,1611	1,0897	0,0114	0,0027	0,1418	0,00818	0,01528	0,01813
	Nb	V	Ti	Al	N2	B	TFLCuerpo	TB Cola	LN (F9 - F10)	LN (F8 - F10)	
		0,0429	0,0026	0,0379	58	2,2	871	676	0,214	0,443	

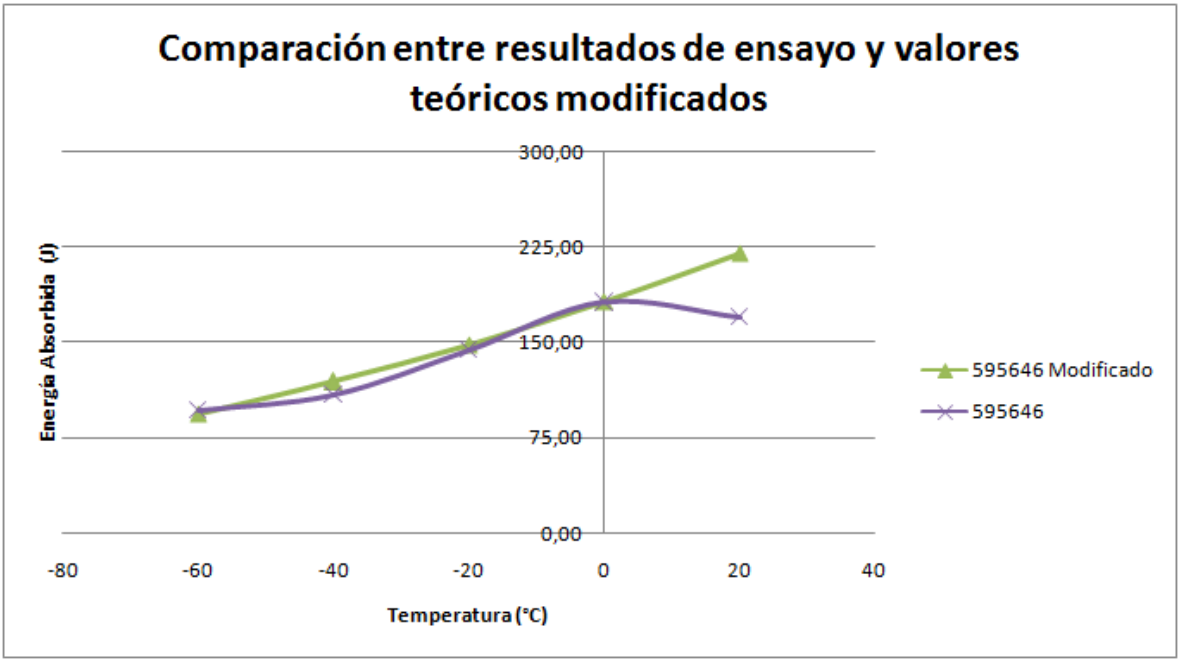
N° de bobina	Temperatura					Espesor	C	Mn	TFL	TB	LN (F9 - F10)	%Perlita calculado	Energía calculada con la fórmula sin modificar (J)	m	k	Energía calculada con la fórmula modificada (J)				
	293 K	273 K	253 K	233 K	213 K											293 K	273 K	253 K	233 K	213 K
595645	165	178	148	120	113	9,50	0,09	1,37	1158	919,00	0,18	12,14	116	2,68	5,10E-07	239	198	161	129	102
595646	170	181	144	108	96	9,50	0,08	1,37	1143	961,37	0,17	15,90	102	2,68	5,10E-07	210	173	141	114	89
567854	149	133	111	93	81	9,50	0,08	1,36	1159	929,97	0,00	13,60	87	2,68	5,10E-07	178	148	120	97	76
567848	183	180	160	140	121	9,50	0,09	1,34	1137	869,73	0,00	9,64	131	2,68	5,10E-07	268	221	181	145	114
602094	102	76	53	43	31	8,00	0,16	1,08	1145	925,67	0,25	15,99	37	2,68	5,10E-07	76	63	51	41	32
602119	177	190	156	128	114	7,00	0,08	1,35	1161	952,12	0,33	13,82	121	2,68	5,10E-07	249	206	168	135	106
602120	195	187	167	156	136	7,00	0,08	1,35	1164	913,83	0,34	10,37	146	2,68	5,10E-07	300	248	202	162	128
602078	128	111	69	49	41	8,00	0,16	0,94	1148	914,95	0,26	13,41	45	2,68	5,10E-07	92	76	62	50	39
595631	147	141	92	45	42	9,50	0,16	1,09	1144	949,46	0,21	13,19	44	2,68	5,10E-07	89	74	60	48	38
634372	211	188	127	97	97	9,50	0,16	1,09	1140	899,47	0,00	1,55	97	2,68	5,10E-07	199	165	134	108	85
634100	129	99	81	41	29	9,50	0,16	1,14	1162	928,59	0,30	15,23	35	2,68	5,10E-07	72	59	48	39	31

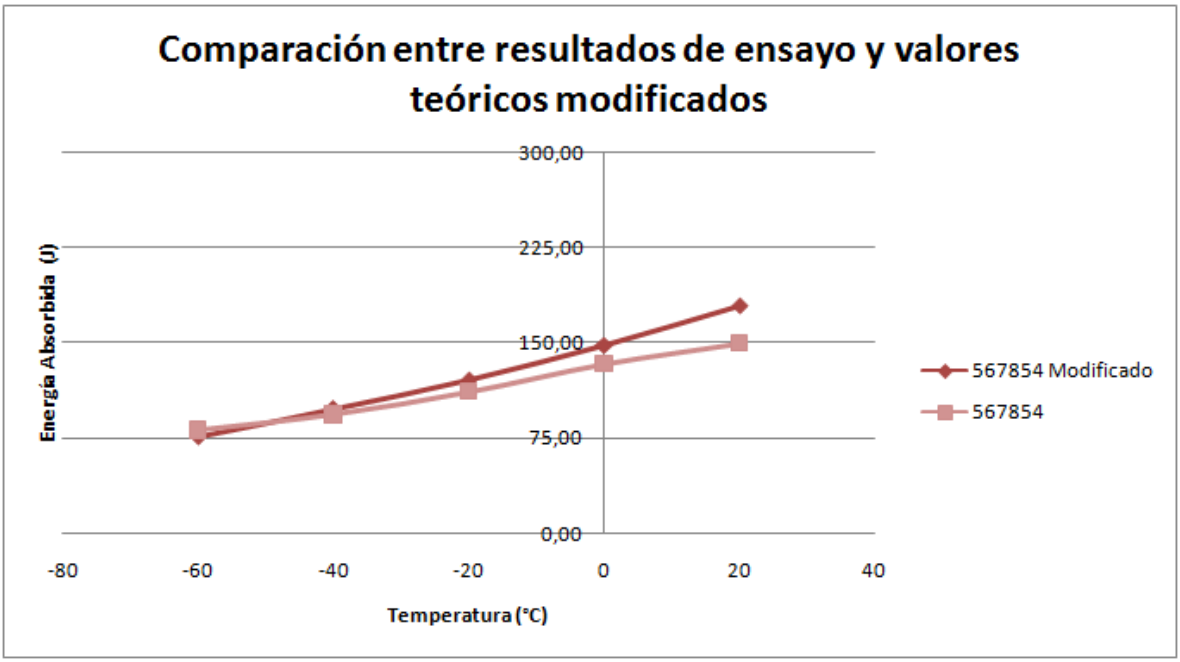
Anexo IV

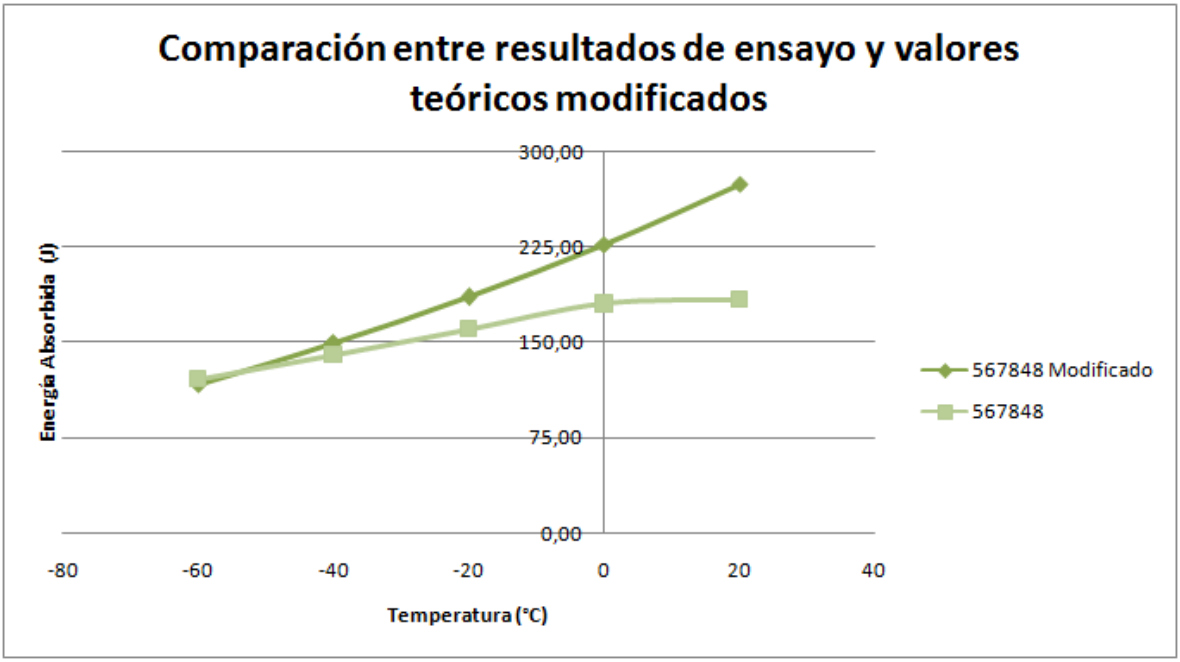
- Gráficos

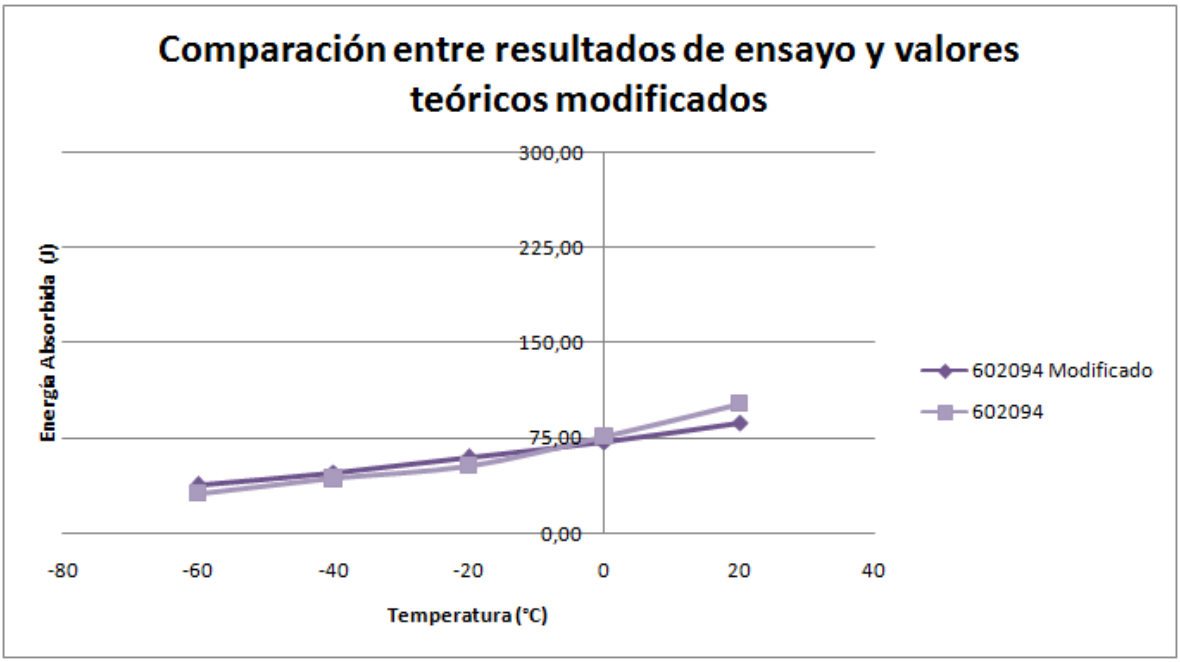
Se presentan graficados los valores de energía absorbida obtenidos por ensayo, y se los compara con los valores calculados con la ecuación modificada (ecuación (2)).

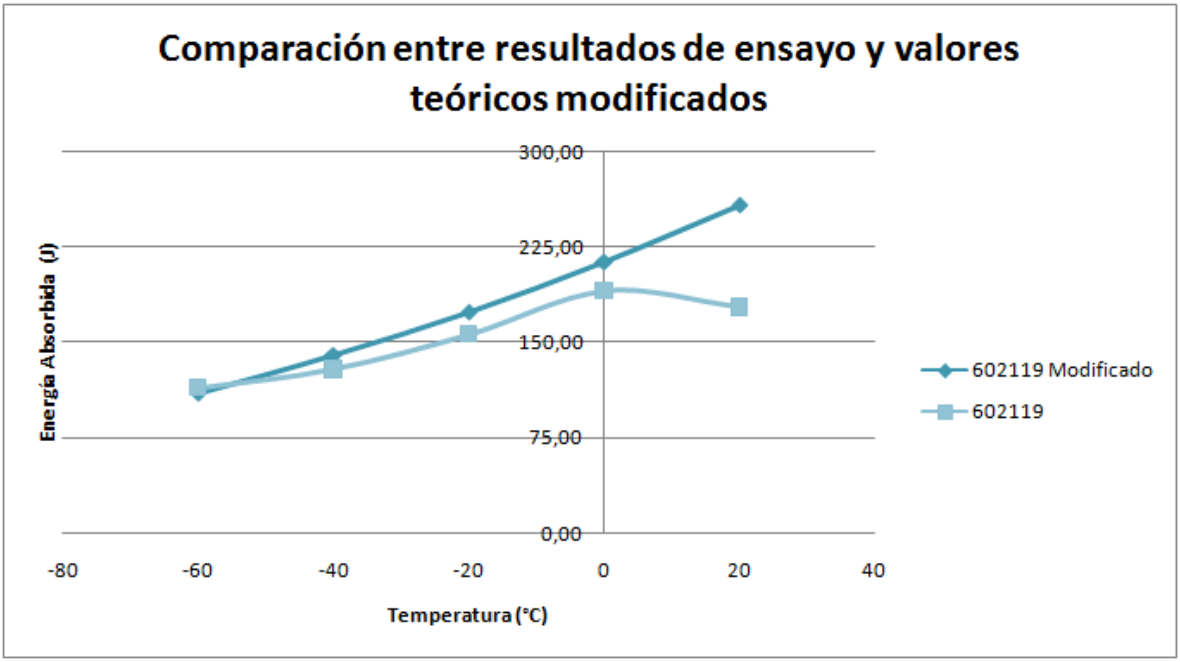


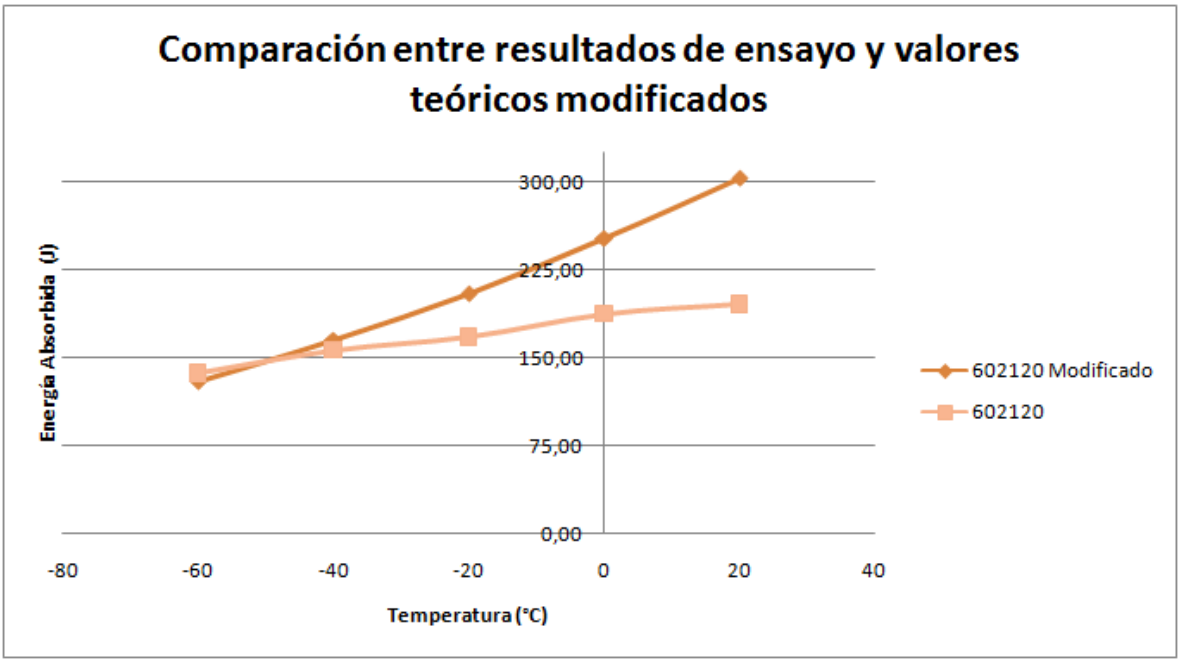


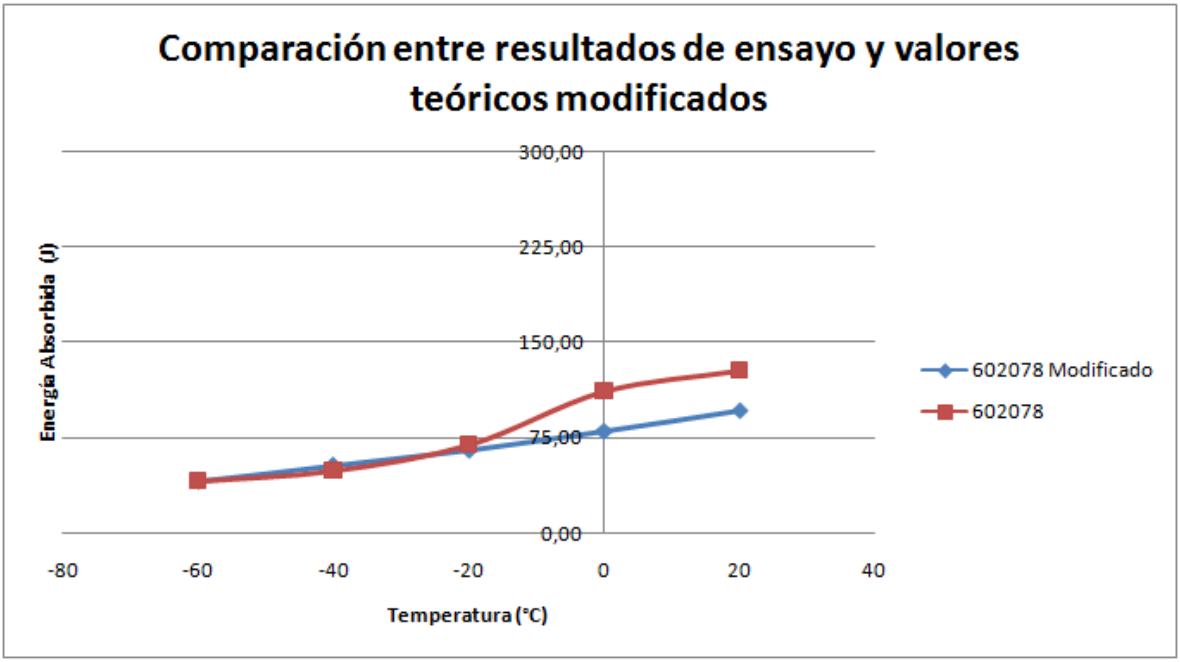

Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
567854 Modificado
567854

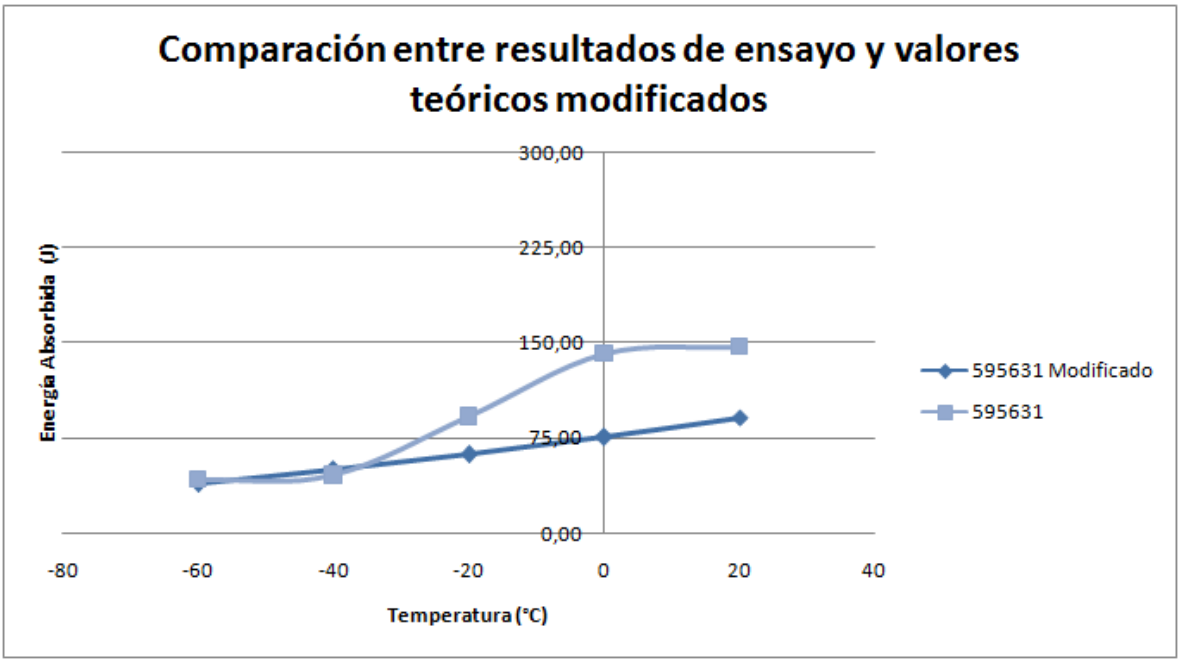

Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
567848 Modificado
567848

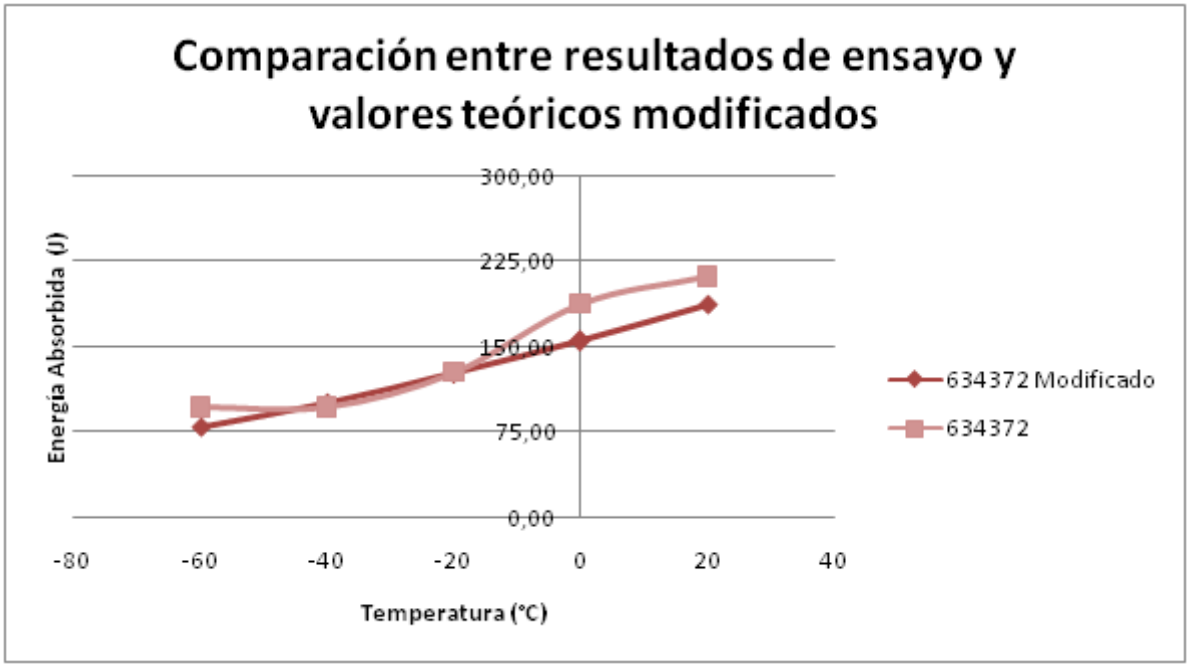

Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
602094 Modificado
602094

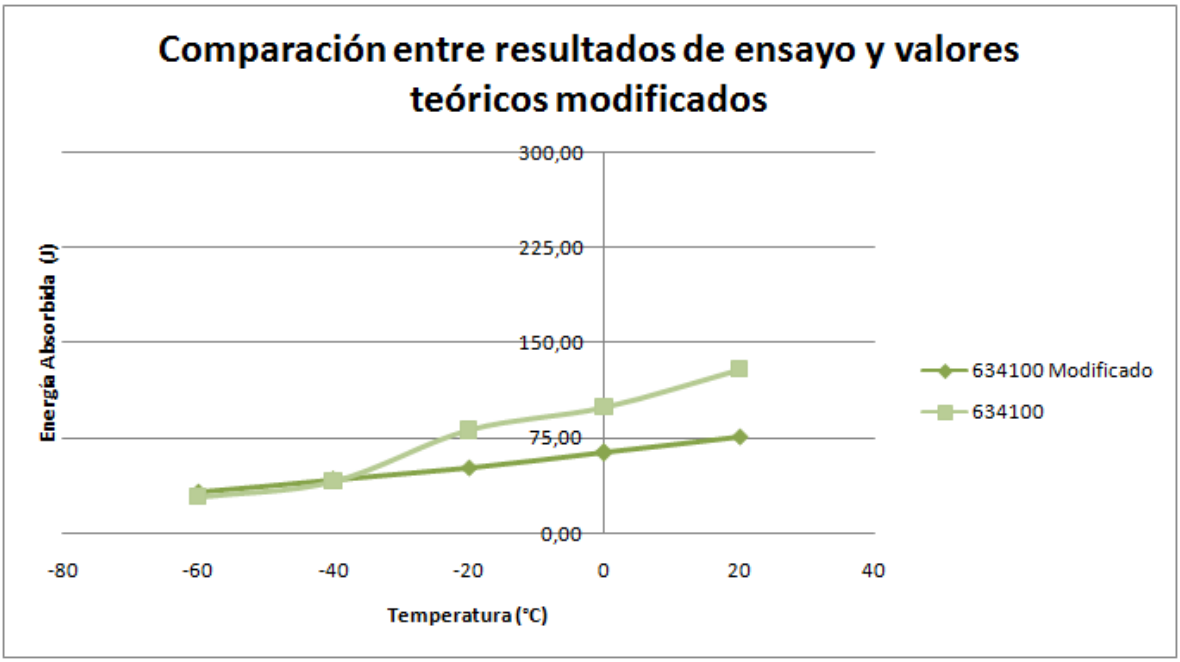

Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
602119 Modificado
602119


Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
Energía Absorbida (J)
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
602120 Modificado
602120


Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
Energía Absorbida (J)
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
602078 Modificado
602078


Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
595631 Modificado
595631


Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
634372 Modificado
634372


Comparación entre resultados de ensayo y valores teóricos modificados
300,00
225,00
150,00
75,00
0,00
Energía Absorbida (J)
-80
-60
-40
-20
0
20
40
Temperatura (°C)
634100 Modificado
634100