



Modelación de propiedades y transformaciones de fase a altas temperaturas de aceros 2.25Cr-1Mo

Modeling of properties and phase transformations at high temperatures of 2.25Cr-1Mo steels

Yuniel Ernesto Martínez-Pérez^{1,*}, René Collazo-Carceller¹, Miguel Armando Autie-Pérez¹, José Luis Valín-Rivera^{II}

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana, Cuba

II. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica. Quilpué, Chile

*Autor de correspondencia: yunimape91@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 2 de noviembre de 2020

Aceptado: 18 de diciembre de 2020

Resumen

Se ha hecho común que la soldadura de diferentes elementos de acero pase por un proceso de simulación. Ello permite abaratar los costos de producción y disminuir las soldaduras de prueba. Sin embargo, un problema frecuente en la simulación de procesos de soldadura es la amplia gama de composiciones de los diferentes aceros que son soldados y con estas la variación de las propiedades térmicas y mecánicas lo que puede afectar los resultados de la simulación. El presente trabajo tuvo como objetivo analizar los valores de las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes y diagramas necesarios a altas temperaturas para la simulación de un proceso de soldadura de aceros 2.25Cr-1Mo partiendo de las composiciones brindadas en la literatura especializada. Para ello se empleó

un software que permitió el modelado de estas propiedades atendiendo a la composición química del material cotejando los valores alcanzados con los resultados obtenidos experimentalmente. Se obtuvieron las propiedades térmicas y las mecánicas que se precisan para desarrollar la simulación de un proceso de soldadura. Las propiedades termo-dependientes y los diagramas a temperaturas cercanas al punto de fusión necesarios para la simulación de un proceso de soldadura de un acero 2.25Cr-1Mo obtenidos mediante modelación se encuentran en correspondencia con los reportados en la literatura especializada.

Palabras claves: modelación de materiales; propiedades termo-mecánicas; comportamiento microestructural.

Abstract

It has become common for the welding of different steel elements to go through a simulation process. This enables lower production costs and lower test welds. However, a frequent problem in the simulation of welding processes is the wide range of compositions of the different steels that are welded and with these the variation of the thermal and mechanical properties, which can affect the simulation results. The objective of this work was to analyze the values of thermo-physical and thermo-dependent mechanical properties and diagrams necessary at high temperatures for the simulation of a 2.25Cr-1Mo steel welding process based on the compositions provided in the specialized literature. For this, a software was used that allowed the modeling of these

properties according to the chemical composition of the material, comparing the values achieved with the results obtained experimentally. The thermal and mechanical properties required to develop the simulation of a welding process were obtained. The thermo-dependent properties and the diagrams at temperatures close to the melting point necessary for the simulation of a welding process of a 2.25Cr-1Mo steel obtained by modeling are in correspondence with those reported in the specialized literature.

Key words: material modeling; thermo-mechanical properties; microstructural behavior.

Cómo citar este artículo:

Martínez Pérez YN, Collazo Carceller R, Autie Pérez MA, et al. Modelación de propiedades y transformaciones de fase a altas temperaturas de aceros 2.25Cr-1Mo. Ingeniería Mecánica. 2020;24(1):e619. ISSN 1815-5944.

Introducción

La soldadura constituye uno de los métodos de unión más utilizados para la fijación de elementos que posee, además, amplia variedad de aplicaciones en la industria y los servicios [1] y, como tal, presenta numerosas dificultades y retos para la comunidad científico-técnica relacionada con la misma directa o indirectamente. El crecimiento exponencial del rendimiento computacional unido a un igual desarrollo de los métodos numéricos y

la modelación han posibilitado la aparición y desarrollo de la *Computational Welding Mechanics* (CWM) donde es capaz de resolver un creciente número de problemas que interesan y afectan a las diferentes industrias, especialmente a las industrias electro-energética, de la construcción y del transporte [2]. La simulación de procesos de soldadura es ampliamente aceptada como una importante herramienta para el análisis de la evolución e interrelación de los campos de temperaturas, de esfuerzos y de deformaciones en estructuras soldadas, así como de la evolución de la microestructura y la distorsión presentes. Es aquí donde radica una de las principales ventajas de la CWM. Se ha hecho común que estas técnicas de unión de diferentes elementos de acero pasen por un proceso de simulación empleando la CWM. Aun cuando la simulación de la soldadura no elimine la necesidad de desarrollar prototipos de procesos o productos y experimentos, sí contribuye a reducir significativamente el número y costo de estos experimentos y prototipos.

En tal sentido el proceso de soldadura es un problema multifísico, en el cual ocurren fenómenos termo-mecánicos. Cada fenómeno físico es definido por una serie de ecuaciones que describen los diferentes campos acoplados entre sí y que superponen sus límites, o al menos, tienen uno común. Es por ello que la simulación de estos procesos requiere una alta calidad en la información concerniente a las propiedades físicas, termo-físicas y termo-mecánicas de los materiales empleados. Siendo así, la correcta definición de las propiedades termo-físicas y mecánicas dependientes de la temperatura es uno de los factores más importantes ya que aumentará en gran medida la exactitud y precisión de los datos obtenidos.

Una de las complicaciones que existen en la simulación de soldadura es que las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes necesarias han sido determinadas para un número pequeño de aleaciones específicas. Por otro lado, la información en ocasiones está incompleta pues no todas las propiedades requeridas son medidas y generalmente se utiliza la información dispersa brindada por varias fuentes para construir una base de datos de la aleación empleada. A esto se suma que esta información que se encuentra dispersa difiere de un autor a otro.

Geng et al [3] determinan los diagramas CCT (*Continuous Cooling Transformation*) y TTT (*Time-Temperature Transformation*) de varios aceros utilizando el método de aprendizaje automático. López et al [4] observaron mediante la modelación el impacto que tiene el tamaño del grano austenítico en dos aceros de medio carbono. Por otra lado, Borisade et al [5] emplearon la modelación para predecir las propiedades mecánicas en un acero de bajo carbono. Así mismo Narayana et al [6] emplearon un modelo de redes neuronales artificiales para realizar una correlación entre la composición, la temperatura y las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico. Igual método empleó Saoudi et al [7] para predecir las propiedades mecánicas en el cordón de una unión soldada basados en la composición química de un acero API X70,

Así mismo Ban et al [8] utiliza la modelación para predecir las propiedades mecánicas de un acero superior de alto rendimiento. Liu et al [9] modelaron las curvas de esfuerzo-deformación en un acero 2.25Cr-1Mo-0,25V obteniendo buenas aproximaciones entre los resultados experimentales y los modelados. Jian et al [10] también investigaron sobre los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de un acero como el empleado por Liu et al [9].

Hasta el momento en la bibliografía consultada no se ha encontrado un estudio que analice y muestre los valores de todas las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes y del comportamiento de la microestructura de aceros del tipo 2.25Cr-1Mo a temperaturas cercanas o por encima del punto de fusión. En tal sentido la composición nominal 2.25Cr-1Mo engloba a varios tipos de aceros por lo que las concentraciones de su composición varían y con ellas tanto las propiedades termo-físicas y mecánicas como los diagramas de fase y de estabilidad de segundas fases.

Es así que el problema objeto de la investigación viene dado por la necesidad de obtener las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes y de los diagramas de un acero 2.25Cr-1Mo que se requieren para llevar a cabo la simulación de un proceso de soldadura de modo que se obtengan resultados más precisos. Es por ello que, para dar respuesta a esta problemática, el principal objetivo del presente trabajo es analizar los valores de las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes y diagramas necesarios a altas temperaturas para la simulación de un proceso de soldadura de aceros 2.25Cr-1Mo partiendo de las composiciones brindadas en la literatura especializada.

Fueron tomadas cuatro composiciones que responden a la denominación 2.25Cr-1Mo. Para determinar las propiedades de cada composición se empleó un software que permitió el modelado de las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes atendiendo a la composición del material y se cotejaron los valores alcanzados con resultados obtenidos experimentalmente reportados en la literatura especializada. Se obtuvieron las propiedades termo-físicas y mecánicas que se precisan para desarrollar la simulación de un proceso de soldadura. Los valores de las propiedades estudiadas alcanzados en el trabajo pueden ser empleados para realizar la simulación de un proceso de soldadura de un acero tipo 2.25Cr-1Mo pues no existieron diferencias estadísticamente significativas con los experimentales utilizados como referente.

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar los valores de las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes y diagramas necesarios a altas temperaturas para la simulación de un proceso de soldadura de aceros 2.25Cr-1Mo. Este trabajo contribuyó a agrupar la información imprescindible para la simulación de procesos tecnológicos, al aumento en la precisión y exactitud de los resultados obtenidos en cada simulación.

Hasta el momento, en las investigaciones consultadas no se han analizado, de manera simultánea, aceros de una misma composición nominal pero diferente composición química a causa del costo que eso conllevaría

Métodos y Materiales

Se exponen a continuación las composiciones empleadas durante el estudio, todas con denominación nominal 2.25Cr-1Mo. El método seguido para obtener las propiedades termo-físicas y mecánicas termo-dependientes fue el de la modelación empleando un software que permite realizar este tipo de estudios en función de la composición del material. Igualmente se exponen los modelos mediante los cuales se obtuvieron las propiedades y diagramas antes mencionados.

Material

El material utilizado es un acero de composición nominal 2.25Cr-1Mo [11], el más empleado de los aceros al cromo-molibdeno [12] y altamente utilizado en la reparación y construcción de tuberías de supercalentadores y calderas en la industria termo-energética.

Dépinoy et al [13] estudiaron experimentalmente el crecimiento del grano austenítico con el tiempo a diferentes temperaturas de austenización de un acero 2.25Cr-1Mo libre de Vanadio. Así mismo investigaron sobre los efectos del tiempo y la temperatura de los pasos de enfriamiento sobre los carburos, la microestructura y la composición química [14]. Por su parte, Phung-on y Saiyasombat [15] estudiaron los efectos de un tratamiento térmico post-soldadura en la unión de un acero 2.25Cr-1Mo.

En la literatura consultada pudo apreciarse que existe una gran variabilidad en la composición de este acero. La tabla 1 muestra las cuatro composiciones estudiadas que fueron seleccionadas aleatoriamente con el fin de determinar las propiedades y comportamiento mediante modelación y comparar estos resultados con aquellos alcanzados experimentalmente y que se encuentran presentados de manera muy dispersa en la bibliografía estudiada.

Para llevar a cabo la modelación de las propiedades se utilizó un software que permite obtener, a partir de la composición química, el comportamiento termo-dependiente tanto de las propiedades termo-físicas como de las mecánicas.

Tabla 1. Composiciones del acero 2.25Cr-1Mo (wt %) estudiadas. Fuente: [11, 15, 16]

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Cu	Al	Ni	V
C1	0,150	0,6	0,03	0,03	0,5	2,6	1,13	x	x	x	x
C2	0,050	0,3	0,03	0,03	0,5	1,9	0,87	x	x	x	x
C3	0,102	0,433	0,014	0,0048	0,31	2,09	0,93	0,12	0,02	0,03	0,011
C4	0,1176	0,4	0,015	0,0136	0,31	2,50	1,12	x	x	x	x

Propiedades termo-físicas y mecánicas

Las propiedades termo-físicas analizadas son el calor específico, la conductividad térmica y la densidad, mientras que las mecánicas son expansión térmica, módulo de Young y coeficiente de Poisson. Estas son las propiedades requeridas para llevar a cabo una simulación de soldadura empleando este tipo de material y se obtuvieron utilizando un modelo mixto discretizado igualmente empleado por Guo et al [17], ecuación 1. La selección del modelo se basa en el hecho de estar desarrollando el presente trabajo en base a un sistema multicomponente, lo que permite determinar, para cada fase individualmente, las propiedades termo-físicas y mecánicas.

$$P = \sum_i x_i P_i^0 + \sum_i \sum_{j>i} x_i x_j \sum_v \Omega_{ij}^v (x_i - x_j)^v \quad (1)$$

Donde P es la propiedad de determinada para cada fase individual, P_i^0 la propiedad de la fase en el elemento puro, Ω_{ij}^v es un parámetro de interacción binaria dependiente del valor de v , x_i y x_j que son las fracciones molares de los elementos i y j en la fase y una vez que las propiedades individuales son definidas entonces, a partir de ellas se determina la propiedad final de la aleación [17].

Diagramas Tiempo-Temperatura-Transformación (TTT)

Cuando el acero tipo 2.25Cr-1Mo es calentado por encima de A1 (temperatura donde comienza a desaparecer la cementita) la estructura body center cubic (bcc), comienza a transformarse en una estructura fase center cubic (fcc) y termina este proceso cuando alcanza AC3 (temperatura donde desaparece la ferrita α) [18].

Para determinar los diagramas TTT se utilizaron modificaciones propuestas por Nigel Saunders junto a otros especialistas para la descomposición de la austenita en ferrita, bainita y perlita sobre el modelo de transformación presentado por J.S Kirkaldy junto a otros autores [19] que presenta buena exactitud cuando se trata de aceros y que es mostrado en la ecuación 2.

$$t(x, T) = \frac{1}{\varphi(N) D_{eff} \Delta T^q} \int_0^x \frac{dx}{x^{2(1-x)/3} (1-x)^{2x/3}} \quad (2)$$

Donde t es el tiempo que toma transformar una fracción x de austenita a la temperatura T , β es un coeficiente empírico, $\varphi = \beta * 2^{(G-1)/2}$, G el tamaño de grano ASTM, D es el coeficiente de difusión efectiva, ΔT es el subenfriamiento y q es un exponente dependiente del mecanismo de difusión. Una vez obtenido el diagrama TTT, el diagrama CCT se obtiene empleando una regla aditiva bien establecida.

Los datos obtenidos de cada propiedad y diagrama para cada una de las composiciones planteadas fueron comparados estadísticamente entre ellos. Para validarlos también fueron comparados con los resultados experimentales extraídos de la literatura especializada.

Resultados y Discusión

Debido a que la simulación de soldadura se da por la interacción de del campo térmico, con el campo mecánico y el campo microestructural se presentan a continuación tanto los resultados del análisis de las propiedades termo-físicas y mecánicas determinadas para cada una de las composiciones estudiadas como los diagramas TTT y los de equilibrio de fases que fueron obtenidos.

Comportamiento microestructural

En la simulación de procesos de la soldadura el empleo del análisis microestructural está en dependencia del material a utilizar. Cuando se emplean aceros austeníticos generalmente se obvia el campo microestructural y consideran solamente la interacción entre los campos térmico y mecánico [2]. Para los aceros ferríticos, como los aceros 2.25Cr-1Mo, se tiene en cuenta el campo microestructural debido a que las transformaciones producen variaciones significativas en el comportamiento de las propiedades del material y por ende en los resultados que se obtengan en la simulación.

En la figura 1 se muestra una comparación entre los resultados numéricos y los experimentales.

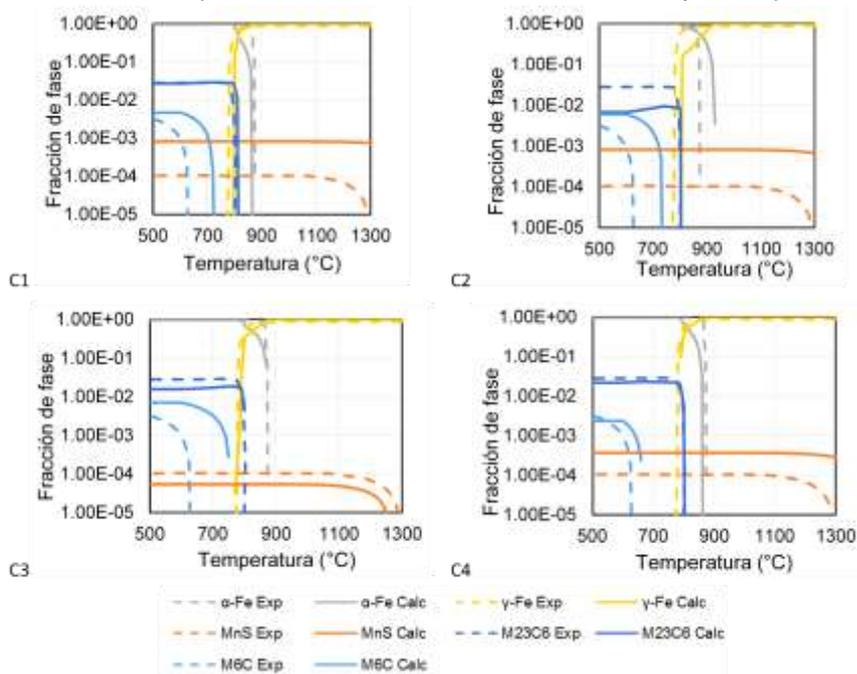


Fig. 1. Comparación de los diagramas de equilibrio de fases obtenidos (líneas continuas) y los presentados por Dépinoy et al [14] (líneas discontinuas). Fuente: autores

La presencia de ferrita a temperatura ambiente, la transformación de esta en austenita y los carburos presentes tienen un comportamiento coherente con los resultados experimentales de referencia (Dépinoy et al [14]). El carburo $M_{23}C_6$ se encontró que disolvía en el rango de temperatura intercrítica (excepto para C2) siendo C1 la composición que mejores aproximaciones brinda. En cambio, el M_6C estabiliza, para C1, C2, C3 y C4, a una temperatura de 722 °C, 730 °C, 750 °C y 660 °C. La diferencia observada se debe a la variación en las concentraciones de los elementos químicos compositivos de cada una de las composiciones estudiadas.

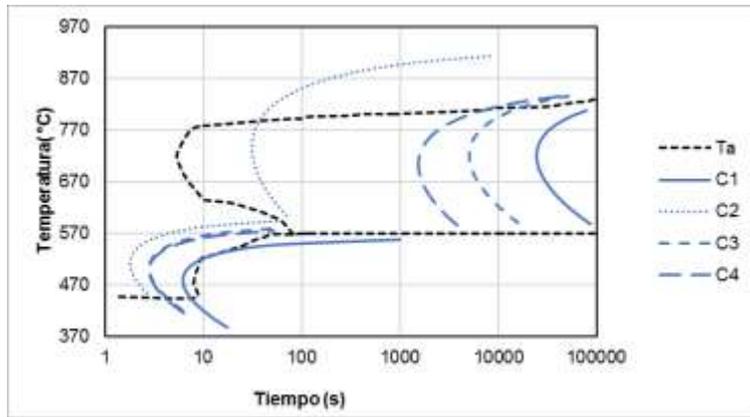
Las partículas MnS se presentaron en pequeñas concentraciones, aunque son mayores y estabilizan a temperaturas superiores que las descritas en la bibliografía exceptuando a C3 que estabiliza a 1250 °C. Aun cuando este comportamiento del MnS se reporta para aceros como el estudiado, no se ha encontrado, hasta el momento, algún trabajo que muestre uno similar para las composiciones que se analizan en este estudio.

Diagramas TTT

La figura 2a muestra que los diagramas TTT obtenidos presentan un comportamiento similar y coherente con los presentados en Tsai et al [20]. Las diferencias se deben tanto a la composición química como a los distintos procesos de austenización empleados donde estos determinan el tamaño de grano que presentará el material existiendo una fuerte dependencia en la obtención de estos diagramas TTT con respecto al tamaño del grano.

Los diagramas muestran que la temperatura de transformación de martensita a austenita coincide con lo planteado en por Tsai et al [20]. Nótese también que la temperatura A_{c3} para C2 sobrepasa a la del resto de las composiciones (incluyendo los valores reportados por la referencia) debido, quizás, a la variación de los valores del carburo M23C6.

La figura 2b indica que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de temperatura obtenidos para cada una de las composiciones estudiadas exceptuando los valores de C2 y C4 que si presentan tales diferencias. No obstante C2 es la única composición estudiada cuyas temperaturas no presentan diferencias significativas con respecto a Tsai et al [20].



a)

Contraste	Significación	Diferencia	+/- Límites
C1 - C2		-47,0	52,2468
C1 - C3		7,0	53,4965
C1 - C4		12,0	53,4965
C1 - Tsai	*	-61,8023	50,2305
C2 - C3		54,0	54,5279
C2 - C4	*	59,0	54,5279
C2 - Tsai		-14,8023	51,3275
C3 - C4		5,0	55,7265
C3 - Tsai	*	-68,8023	52,5991
C4 - Tsai	*	-73,8023	52,5991

* indica una diferencia significativa.

b)

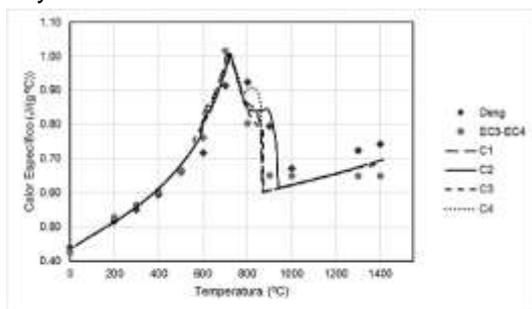
Fig. 2. a) Diagramas TTT para aceros con denominación 2.25Cr-1Mo. b) Resultados estadísticos de la comparación

Propiedades termo-físicas termodependientes

Calor Específico

Los resultados alcanzados para el calor específico se muestran en la figura 3a donde puede observarse que, para todas las composiciones siguen un comportamiento análogo a los resultados experimentales expuestos en la literatura consultada (Deng y Murakawa [18]; Normas europeas EN1993-1-2, Eurocode 3 y EN1994-1-2, Eurocode 4: EC3-EC4).

La figura 3b muestra el análisis estadístico donde puede apreciarse que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los valores de calor específico determinados para C1, C2, C3 y C4 y los valores de referencia.



a)

Variación	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
Between groups	0,0292974	5	0,00585948	0,31	0,9088
Within groups	11,3783	596	0,0190912		
Total (Corr.)	11,4076	601			

b)

Fig. 3. a) Valores de calor específico obtenido en función de la temperatura. b) Análisis estadístico.

Fuente: autores

El calor específico aumenta hasta temperaturas cercanas a los 720 °C coincidiendo con la disminución del carburo tipo M_6C . A partir de los 720 °C y hasta los 880 °C comienza a descender. Se observa una zona donde dicho descenso es muy pequeño y aparenta ser prácticamente constante. Esto se debe a la transformación de ferrita a austenita entre los 800 °C, que comienzan a aparecer los primeros granos de austenita y los 860 °C, cuando toda la ferrita se convirtió en austenita. A partir de aquí es más notable el descenso de los valores de calor específico. A partir de los 880 °C cambia nuevamente su comportamiento y comienza a ascender dado que ya la fase presente es la austenita, con presencia de MnS.

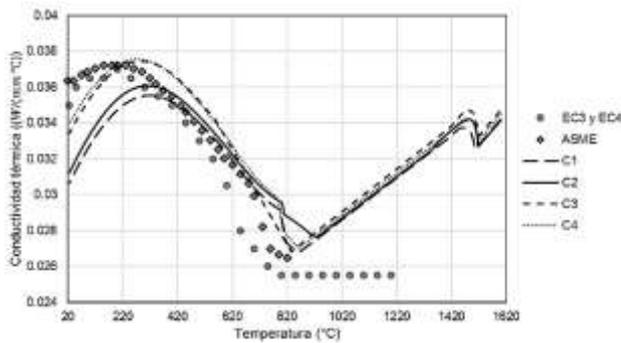
La comparación estadística anterior demuestra lo acertado de los resultados obtenidos en este apartado.

Conductividad Térmica

En la figura 4a se observan los valores obtenidos de la conductividad térmica para las cuatro composiciones. A temperaturas superiores a los 820 °C se aprecian contrastes con los valores reportados tanto las normas europeas EC3-EC4 como por el código ASME, Sección II, Parte. Ello es debido a la diferencia entre las composiciones químicas y al tratamiento térmico de los aceros estudiados (incluyendo lo reportado por la

referencia). Por otro lado, en la figura 4b se observan cuáles son los grupos que presentan diferencias significativas.

A partir de los 300 °C y hasta los 820 °C se aprecia una disminución de la conductividad térmica en función de la temperatura. Coincidiendo con AC3, después de los 820 °C hay una tendencia al aumento de esta propiedad, comportamiento que no se aprecia en la literatura de referencia y que brinda un comportamiento específico a temperaturas cercanas a la de fusión.



Contraste	Significación	Diferencia	+/- Límites
EC3-EC4 - ASME	*	-0,00457391	0,00136324
EC3-EC4 - C1	*	-0,00285543	0,00136324
EC3-EC4 - C2	*	-0,00346236	0,00136324
EC3-EC4 - C3	*	-0,00494016	0,00136324
EC3-EC4 - C4	*	-0,00567412	0,00136324
ASME - C1	*	0,00171848	0,00136324
ASME - C2		0,00111155	0,00136324
ASME - C3		-	0,00136324
ASME - C4		0,000366243	0,00136324
C1 - C2		-	0,00136324
C1 - C3	*	0,000606932	0,00136324
C1 - C4	*	-0,00208472	0,00136324
C2 - C3	*	-0,00281869	0,00136324
C2 - C4	*	-0,00147779	0,00136324
C3 - C4	*	-0,00221176	0,00136324
		-	0,00136324
		0,000733966	0,00136324

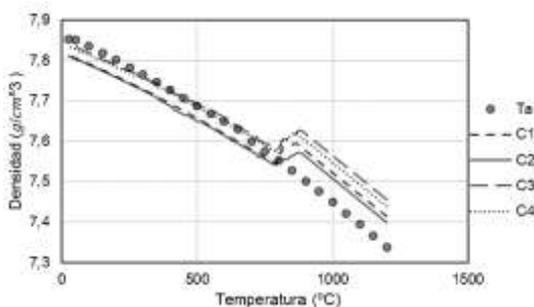
* indica una diferencia significativa.

Fig. 4. a) Valores de conductividad térmica obtenidos en función de la temperatura. b) Resultados estadísticos. Fuente: autores

Densidad

La figura 5a muestra el comportamiento obtenido de la densidad en función de la temperatura. Que tiende a disminuir con el aumento de la temperatura y hasta los 800°C mantienen un comportamiento semejante al planteado por Tahami et al [21]. Las diferencias a temperaturas superiores a los 800 °C son consecuencia de la variabilidad de la composición química y del tratamiento térmico de austenización a que fueron sometidos los aceros. El salto observado coincide con el rango de temperaturas en el que ocurre la transformación ferrítico-austenítica que experimenta el material y con la presencia del carburo M23C6.

La figura 5b presenta una prueba de rangos múltiples. En tal sentido puede observarse como C1 es la composición que presenta la menor diferencia respecto a la referencia dada la diferencia en la cantidad de elementos de las composiciones estudiadas. Se destaca que entre los datos reportados en la literatura y los obtenidos en el trabajo no se presentan diferencias estadísticamente significativas.



Contraste	Significación	Diferencia	+/- Límites
C1 - C2		0,00802124	0,0269692
C1 - C3	*	-0,0325721	0,0269173
C1 - C4		-0,0244756	0,0270218
C1 - Tahami		-0,000420763	0,0473308
C2 - C3	*	-0,0405933	0,0269173
C2 - C4	*	-0,0324969	0,0270218
C2 - Tahami		-0,008442	0,0473308
C3 - C4		0,00809647	0,02697
C3 - Tahami		0,0321513	0,0473012
C4 - Tahami		0,0240549	0,0473608

* indica una diferencia significativa.

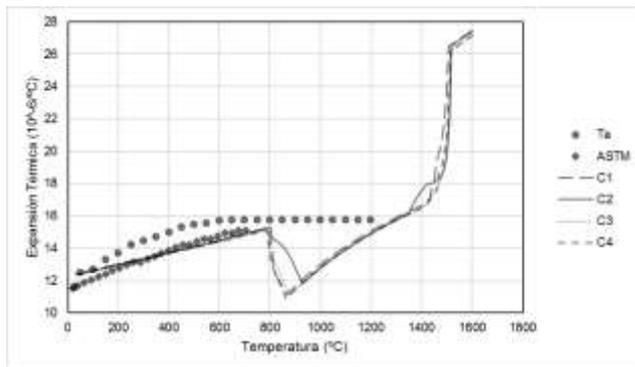
Fig. 5. Valores de densidad obtenidos en función de la temperatura. b) Resultados estadísticos. Fuente: autores

Propiedades mecánicas termo-dependientes

Expansión Térmica

En la figura 6a se puede apreciar el comportamiento de la expansión térmica obtenido para cada una de las composiciones planteadas en función de la temperatura obteniendo resultados similares y coherentes a los presentados en la literatura especializada hasta los 704 °C. Más allá de esta temperatura no se ha encontrado, hasta el momento, el comportamiento de esta propiedad para este tipo de material. A partir de los 800 °C la expansión térmica experimenta un descenso debido a la transformación de ferrita en austenita. Desde 870 °C hasta los 1430 °C asciende linealmente debido a la transformación completada y a la disolución de carburos en la austenita. A partir de los 1430 °C los carburos disueltos comienzan a difundirse hasta alcanzar los 1530 °C donde la austenita puede considerarse homogénea.

Por su parte en la figura 6b observa una prueba de rangos múltiples donde los resultados obtenidos no presentan diferencias significativas con lo reportado por Tahami et al [21]. En cambio, solo C1, C2 y C3 presentan diferencias respecto a los valores aportados por el código ASME.



a)

Contraste	Significación	Diferencia	+/- Límites
ASME - C1	*	-1,6995	1,4073
ASME - C2	*	-1,7060	1,4100
ASME - C3	*	-1,4271	1,4068
ASME - C4		-1,3895	1,4078
ASME - Tahami		-1,3983	1,8741
C1 - Tahami		0,30129	1,4316
C2 - Tahami		0,30776	1,4342
C3 - Tahami		0,02884	1,4310
C4 - Tahami		-0,00878	1,4321

* indica una diferencia significativa.

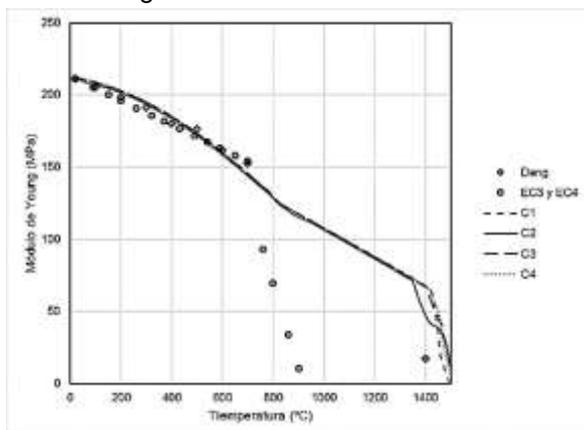
b)

Fig. 6. Comparación de los valores de coeficiente medio de expansión térmica obtenida en función de la temperatura. b) Resultados estadísticos de la comparación. Fuente: autores

Módulo de Young

En la figura 7a se muestra el comportamiento del módulo de Young para las composiciones estudiadas. En todos los casos se pueden notar como el módulo de Young desciende con el aumento de la temperatura. Se observa que existen diferencias entre los comportamientos planteados por la literatura consultada. Los comportamientos obtenidos en el presente trabajo mediante la modelación difieren gráficamente de los presentados en los trabajos ya referidos. Esto se hace más evidente en las temperaturas superiores a los 820 °C.

Sin embargo, en la figura 7b se muestra el resultado de un análisis estadístico donde no se observaron diferencias significativas entre las medias de los valores del módulo de Young observados.



a)

Variación	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
Between groups	15951,5	5	3190,3	1,08	0,3693
Within groups	1,94677E6	660	2949,65		
Total (Corr.)	1,96272E6	665			

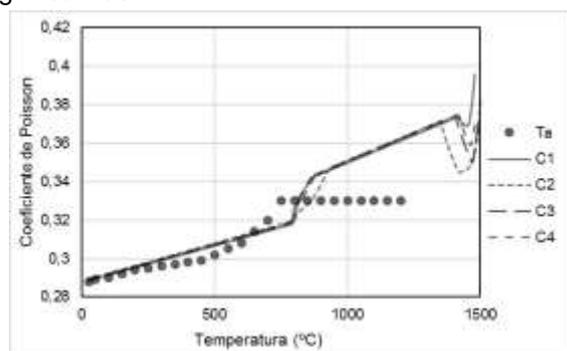
b)

Fig. 7. Valores del módulo de Young en función de la temperatura. b) Resultados estadísticos. Fuente: autores

Coefficiente de Poisson

En la figura 8a se observa la relación que existe entre el coeficiente de Poisson y la temperatura. Nótese la tendencia al aumento de la propiedad en cuestión con el aumento de la temperatura encontrándose en correspondencia con lo planteado por Tahami et al [21].

En la figura 8b se muestra como a pesar de los contrastes que puedan percibirse en el gráfico, estadísticamente las medias de los valores obtenidos y los reportados por la referencia no tienen diferencias significativas.



Variación	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
Between groups	0,00057234	4	0,000143085	1,03	0,3932
Within groups	0,0512797	368	0,000139347		
Total (Corr.)	0,051852	372			

a)

b)

Fig. 8. Valores del coeficiente de Poisson obtenidos en función de la temperatura. b) Resultados estadísticos. Fuente: autores

La limitante fundamental del trabajo es que no se pudo corroborar experimentalmente los resultados obtenidos debido a la ausencia del equipamiento necesario en el país y a lo costoso de dichos ensayos.

Conclusiones

Las propiedades termo-dependientes y los diagramas a altas temperaturas necesarios para la simulación de un proceso de soldadura de un acero 2.25Cr-1Mo obtenidos mediante modelación se encuentran en correspondencia con los reportados en la literatura especializada.

El tratamiento de austenización, la composición química y los carburos presentes influyen significativamente en el comportamiento de las propiedades termo-dependientes y diagramas obtenidos en el presente trabajo.

Se deben tomar en cuenta el comportamiento termo-dependientes a altas temperaturas de las propiedades termo-físicas y mecánicas y de las fases descritas en la simulación de un proceso de soldadura de un acero 2.25Cr-1Mo.

Referencias

- Martínez-Pérez Y, Collazo-Carceller R. Revisión bibliográfica de los efectos de los parámetros de soldadura en las tensiones residuales del proceso. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*. 2018;16):85-8.
- Goldak JA, Akhlaghi M. *Computational Welding Mechanics*. New York, United States of America: Springer Science+Business Media, Inc.; 2005.
- Geng X, Wang H, Xue W, et al. Modeling of CCT diagrams for tool steels using different machine learning techniques. *Computational Materials Science*. 2019;171:109235. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109235>
- López RD, Maldonado A, López CE, et al. Efecto del Tamaño de Grano Austenítico en el Comportamiento Mecánico para los Aceros AISI 1045 y 4140 Mediante Experimentación y Modelado. *Padi*. 2019;7(2):81-87. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7iEspecial2.4919>
- Borisade SG, Ajibola OO, Adebayo AO, et al. Development of mathematical models for the prediction of mechanical properties of low carbon steel (LCS). *Materials Today: Proceedings*. 2020;38:1133-39. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.134>
- Narayana PL, Lee SW, Park CH, et al. Modeling high-temperature mechanical properties of austenitic stainless steels by neural networks. *Computational Materials Science*. 2020;179:109617. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109617>
- Saoudi A, Fellah M, Hezil N, et al. Prediction of mechanical properties of welded steel X70 pipeline using neural network modelling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020;186:104153. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104153>
- Ban H, Zhou G, Yu H, et al. Mechanical properties and modelling of superior high-performance steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021;176:106407. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106407>
- Zili L, Chunming L, Jianhua D, et al. Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behaviour of V Modified 2.25Cr-1Mo Heat Resistant Steel Plate. *Journal of Wuhan University of Technology*. 2020;35(1):192-99. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2243-3>
- Jiang Z, Wang P, Li D, et al. The evolutions of microstructure and mechanical properties of 2.25Cr-1Mo-0.25V steel with different initial microstructures during tempering. *Materials Science & Engineering A*. 2017;699:165-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.095>
- Lima WF, Rigueira G, Furtado HC, et al. Microstructure Evolution and Creep Properties of 2.25Cr-1Mo Ferrite-Pearlite and Ferrite-bainite Steels After Exposure to Elevated Temperatures. *Materials Research*. 2017;20(2):418-22. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0596>
- Chu DJ, Kim HY, Lee J, et al. Investigation of precipitation sequence during creep in 2.25Cr-1Mo steel. *Materials Characterization*. 2020;164:110328. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110328>
- Dépinoy S, Marini B, Toffolon-Masclat C, Roch F, Gourgues-Lorenzon A-F. Austenite Grain Growth in a 2.25Cr-1Mo Vanadium-Free Steel Accounting for Zener Pinning and Solute Drag: Experimental Study and Modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(5):2289-300. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4002-4>
- Dépinoy S, Toffolon Masclat C, Urvoy S, et al. Carbide Precipitation in 2.25 Cr-1 Mo Bainitic Steel: Effect of Heating and Isothermal Tempering Conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(5):2164-78. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4045-6>
- Phung-on I, Saiyasombat C. Semi in-situ local structure observation during PWHT of CreMo weldments extent of the PWHT on local structure changes in heat affected zone

- microstructure. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;11:1123-34. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.082>
16. Na H, Lee S, Kang C. Effect of Micro-Segregation on Impact Toughness of 2.25Cr-1Mo Steel after Post Weld Heat Treatment. *Metals*. 2018;8(6):373. <https://doi.org/10.3390/met8060373>
 17. Guo Z, Saunders N, Miodownik P. Modelling material properties of lead-free solder alloys. *Journal of Electronic Materials*. 2008;37(1):23-31. <https://doi.org/10.1007/s11664-007-0218-1>
 18. Deng D, Murakawa H. Finite element analysis of temperature field, microstructure and residual stress in multi-pass butt-welded 2.25Cr-1Mo steel pipes. *Computational Materials Science*. 2008;43(4):681-95. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.025>
 19. Buchmayr B, Kirkaldy JS. Modeling of the temperature field, transformation behavior, hardness and mechanical response of low alloy steels during cooling from the austenite region. *Journal of Heat Treating*. 1990;8(2):127-36. <https://doi.org/10.007/BF02831633>
 20. Tsai MC, Chiou CS, Yang JR. Microstructural evolution of simulated heat-affected zone in modified 2.25Cr-1Mo steel during high temperature exposure. *Journal of Materials Science*. 2003;38:2373 – 91. <https://doi.org/10.1023/A:1023940732136>
 21. Vakili-Tahami F, Daei-Sorkhabi AH, Saeimi-S MA, et al. 3D finite element analysis of the residual stresses in butt-welded plates with modeling of the electrode-movement. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2009;10(1):34-43. <http://10.1631/jzus.A0720127>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Yuniel Ernesto Martínez Pérez. <https://orcid.org/0000-0002-8761-0076>

Diseño de la investigación, recolección y procesamiento de los datos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final. Participó en el desarrollo y procesamiento de los contenidos obtenidos con el software de modelación.

René Collazo Carceller. <http://orcid.org/0000-0001-9139-7231>

Diseño de la investigación, análisis de los resultados, elaboración, redacción y revisión del informe final. Colaboró con los análisis del comportamiento material y en el procesamiento de los resultados estadísticos.

Miguel Armando Autié Pérez. <http://orcid.org/0000-0002-6766-208X>

Diseño de la investigación, análisis de los resultados, elaboración, redacción y revisión del informe final. Aportó los elementos relacionados con el procesamiento e implementación de los modelos matemáticos empleados, así como en la elaboración y revisión del informe final.

José Luis Valín Rivera. <http://orcid.org/0000-0002-9751-220X>

Diseño de la investigación, análisis de los resultados, elaboración, redacción y revisión del informe final. Colaboró con los análisis del comportamiento material, de las propiedades determinadas y su relación con los diagramas TTT. Apoyó en la redacción y revisión informe final.