

La formación de austenita en aceros de bajo carbono

The formation of austenite in low carbon steels

Felipe Castro, Bernd Schulz
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Santiago de Chile
bernd.schulz@usach.cl

Resumen

La formación de austenita es un proceso complejo en el cual la microestructura inicial y la velocidad de calentamiento juegan un rol importante. La cinética del proceso está controlada ya sea por la difusión del carbono o por la movilidad de la intercara γ/α . La temperatura de transición desde un mecanismo al otro durante el calentamiento ha sido predicha suponiendo condiciones de equilibrio local (EL), y designada A_m . En este estudio se discute la evidencia metalográfica de la transición desde el control difusional por carbono al control por la movilidad interfacial (o masiva). El proceso de la formación de austenita desde una microestructura inicial de ferrita+perlita es discutido a la luz de evidencia metalográfica.

Palabras Clave: Austenita; Acero; Carbono.

Abstract

The formation of austenite is a complex process in which the initial microstructure and the rate of heating play an important role. The kinetics of the process is controlled either by carbon diffusion or by the mobility of the γ/α interface. The transition temperature from one mechanism to the other during the heating has been predicted assuming conditions of local equilibrium (EL), and has been denominated A_m . In this study the metallographic evidence of the transition from the carbon diffusional control to the control is discussed. the interfacial mobility (or massive). The process of austenite formation from an initial ferrite + perlite microstructure is discussed in the light of metallographic evidence.

Keywords: Austenite; Steels; Carbon.

La mayoría de las características de la formación de austenita desde agregados de ferrita y perlita han sido resumidos por Mehl (Mehl, 1943), como sigue (i). La formación de la austenita es un proceso térmicamente activado, (ii) la austenita nuclea en los bordes de la perlita, (iii) se producen gradientes de carbono durante el crecimiento de la austenita (Speich y Szirmae, 1969), (iv) el tiempo para la formación completa de austenita disminuye con la disminución del espaciamiento interlaminar de la perlita y es relativamente independiente del tamaño de la colonia, y (v) la cinética de la disolución de la cementita (θ) es significativamente mas lenta a la de la ferrita. Estudios posteriores (Haworth y Parr, 1965; Judd y Paxton, 1968; Speich y Szirmae, 1969; Hillert *et al.*, 1971) han validado estas conclusiones que han servido como referencias para modelos difusionales de formación de austenita. La Figura N° 1 muestra la formación de austenita en una microestructura de ferrita mas perlita. Consistente con (ii), la austenita (transformada a martensita por el templado) se forma en los bordes de ferrita/perlita, como lo indican las flechas.

La termodinámica de la formación de la austenita ha sido extensamente revisada en la literatura (Castro *et al.*, 2017). Bajo velocidades de calentamiento habituales ($< 10^\circ \text{C/s}$), la formación de austenita en un agregado de ferrita y cementita comienza usualmente en la intercara α/θ . A velocidades de calentamiento muy rápidas ($\geq 100^\circ \text{C/s}$), la fuerza motriz para la nucleación de austenita pue-

de ser incrementada sustancialmente ,permitiendo así la nucleación en sitios menos favorables, como intercaras α/α . La Figura N° 2 muestra una imagen SEM de un de un acero con bajo carbono laminado en frio y calentado a 150°C/s hasta 704°C y luego templado, después de una homogeneización de menos de 0.5 s. Se observa que la formación de austenita (transformada en martensita al ser templada, flechas de color amarillo en la Figura N° 2) ocurrió en los bordes de grano ferríticos. Resultados experimentales de estos sitios de nucleación ha sido publicado recientemente (Castro *et al.*, 2016).

El crecimiento de austenita ocurre simultáneamente a costa de la perlita y la ferrita proeutectoide. Sin embargo ,la austenita crecerá mas rápido a costa de la perlita que la ferrita, como lo muestra la Figura N° 3, debido a la menor distancia de difusión involucrada en la perlita.

Bajo equilibrio local, el crecimiento estará controlado por la difusión del carbono a cualquier temperatura y contenido de carbono para la $G^\alpha < G^\gamma$, donde G^i :Energía libre de de Gibbs de la fase i. A la temperatura donde G^γ llega a ser la menor para cualquier contenido de carbono, la formación de la austenita será controlada por la intercara 6, o sea masiva. Esta temperatura ha sido denominada A_m . Bajo velocidades de calentamiento convencionales, la formación total de austenita ocurre mucho antes de la A_m . Sin embargo, calentamiento conti-

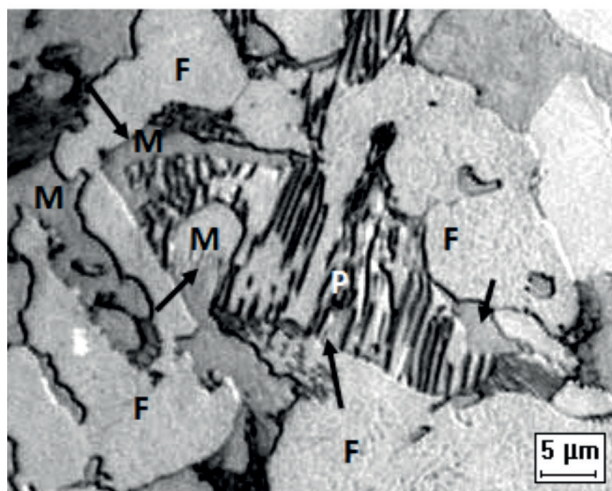


Figura N° 1. La formación de austenita en una microestructura inicial de ferrita + perlita. F, P, y M muestran las áreas de ferrita, perlita y martensita, respectivamente. Atacado con Nital 2%.

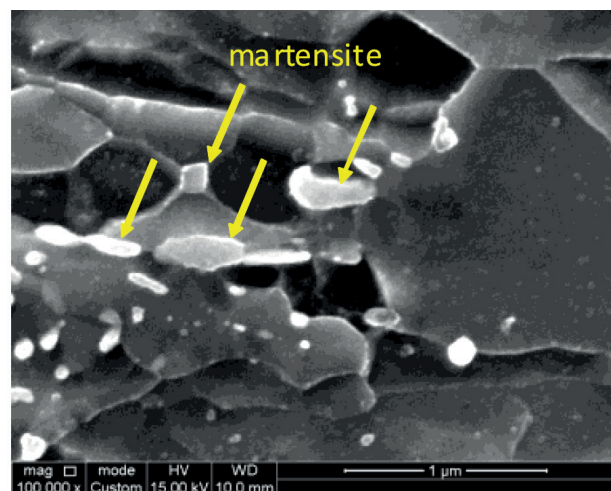


Figura N° 2. Acero con 0.2% C y 75% de laminación en frio, calentado a 150°C/s hasta 704°C y luego templado. Las flechas amarillas indican sitios de posible nucleación de austenita. Atacado con Nital 2%.

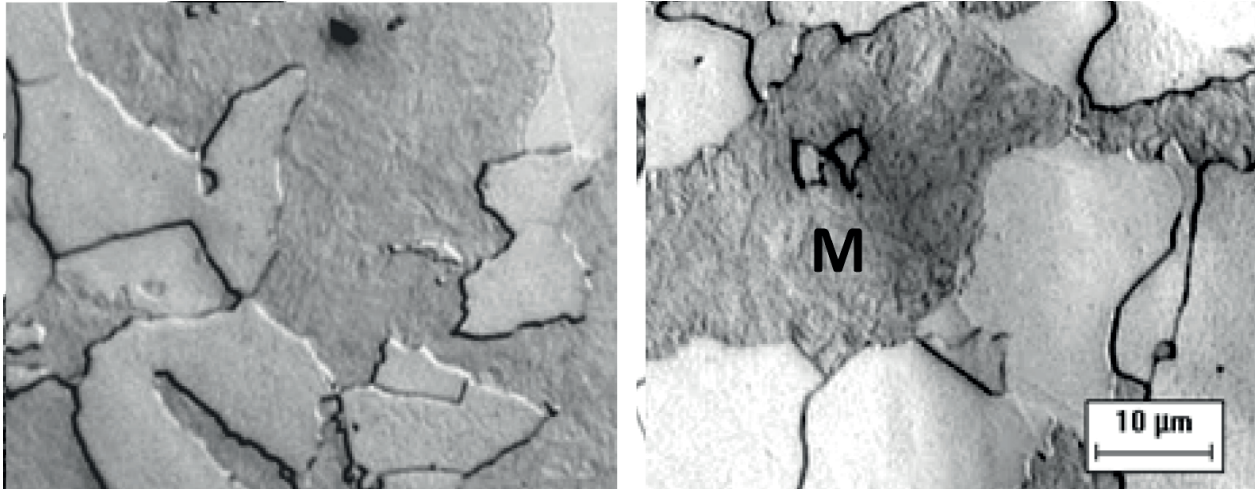


Figura N° 3. Acero con 0.2% C laminado en caliente, (izquierda) mostrando la microestructura clásica de ferrita + perlita y (derecha) el mismo acero calentado a 10 °C/s hasta 750 °C y luego templado en agua. La formación de austenita ocurrió principalmente en las colonias perlíticas. Atacado con Nital 2%.

nuo rápido permite la formación masiva de la austenita. La elevada temperatura a la cual se forma la austenita permite la difusión rápida de elementos aleantes por la intercara. Por consiguiente, se espera que las condiciones de equilibrio local (EL) gobiernen el movimiento de la intercara γ/α . Condiciones de EL no permiten que T_0 sea el límite de la transición para la formación de la austenita por control en la intercara. La razón proviene del hecho que a cualquier temperatura debajo de la A_m , el sistema puede rápidamente alcanzar la menor

energía libre de Gibbs al llegar al equilibrio local. Se muestra en la Figura N° 4b que por encima de cualquier temperatura sobre la T_0 , la austenita puede alcanzar un equilibrio mas estable (ilustrado por la tangente común entre la energía libre de ferrita y austenita en Figura N° 4b) si se establecen las condiciones de EL en vez de la transformación masiva (por ej. ΔG en Figura N° 4b). Por consiguiente no hay justificación termodinámica para un cambio a un mecanismo que disipe menos energía que el activo.

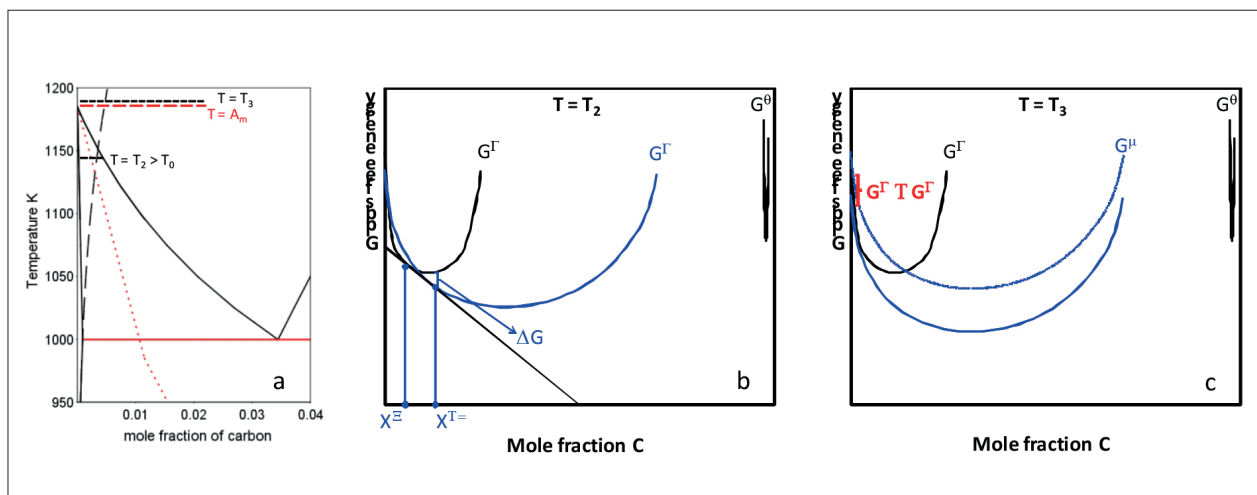


Figura N° 4. Sección del diagrama de equilibrio binario Fe-C mostrando la T_0 y la extrapolación del equilibrio α/θ (líneas rojas punteadas y negras segmentadas, respectivamente). (b) y (c) son esquemas de la energía libre de Gibbs en función de la fracción molar de carbono para T_2 y T_3 respectivamente.

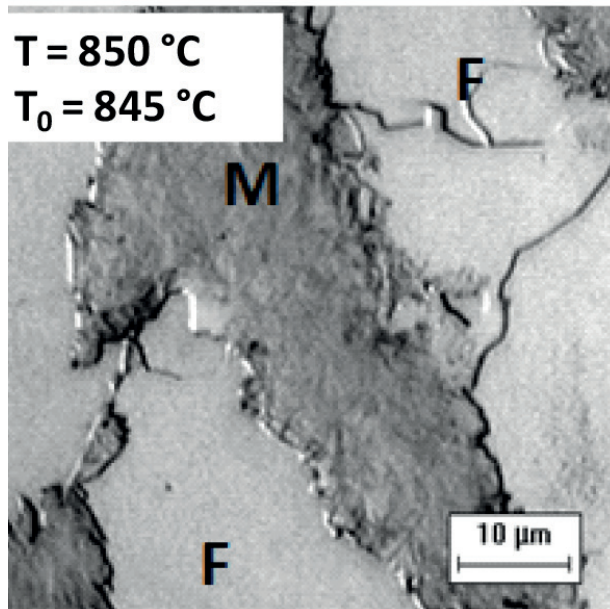


Figura N° 5a.

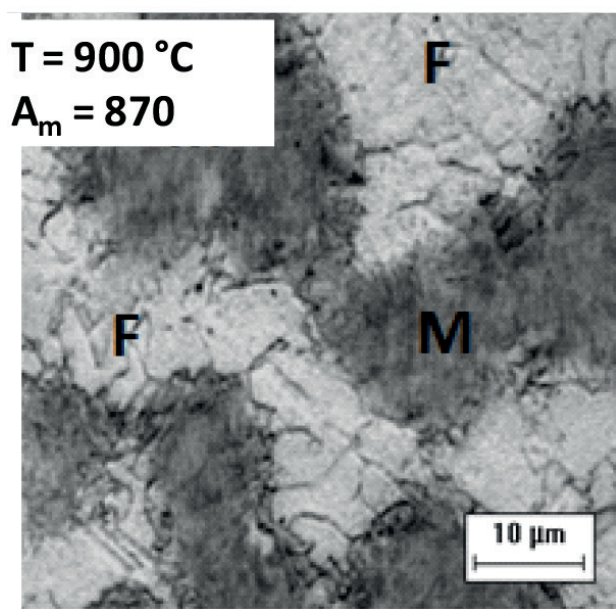


Figura N° 5b.

La formación masiva de la austenita se activara siempre cuando $G_a > G_\gamma$ para cualquier contenido de carbono, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4c. La evidencia de que la formación de austenita ocurre sobre A_m y no a T_0 se muestra en las Figuras N° 5a, b y c. Las temperaturas críticas fueron calculadas usando el programa ThermoCalc, base de datos TCFE7. El acero es el mismo que en la Figura N° 3, sin embargo, la velocidad de calentamiento para esta muestra fue 1500°C/s . La temperatura máxima es la indicada en cada imagen. Sobre T_0 pero bajo A_m (por ejemplo Figura N° 5c), no hay indicación de algún cambio microestructural producto de la transición de mecanismos de transformación austenítica. Sobre A_m (por ejemplo Figura N° 5b), la estructura de la ferrita pro-eutectoide exhibe una modificación significativa, aunque la distribución general del carbono no es diferente de la del acero templado desde 850°C (Figura N° 5a). Esto se debe al hecho que para la formación masiva de la austenita no es necesaria la difusión del carbono por delante de la intercara γ/α . Como la formación masiva de la austenita no requiere difusión de carbono, es probable que la ferrita también se transforme masivamente con el temple. Figura N° 5c muestra un área de la microestructura tratada bajo las mismas condiciones que la de la Figura N° 5b, en la cual la transformación masiva de la ferrita se produjo hasta que la intercara α/γ llego a zonas ricas en carbono (por ejemplo en Figura N° 5b). Es posible que, en las

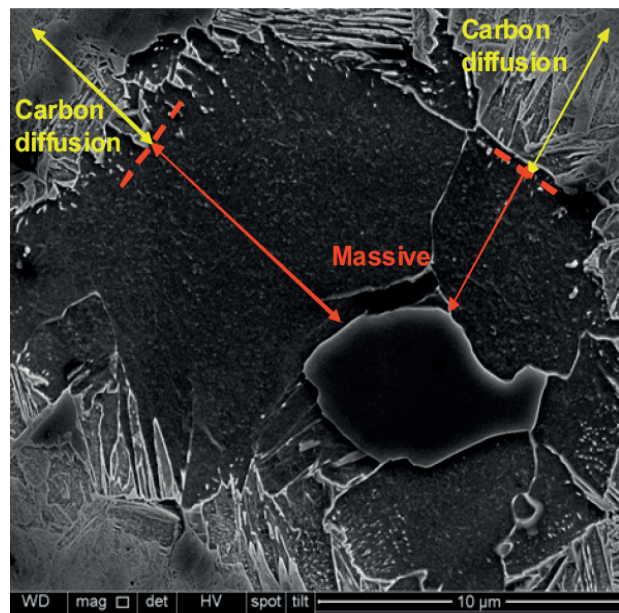


Figura N° 5c.

Figura N° 5a. Acero con 0.2%C laminado en caliente y calentado a 1500°C/s hasta 850°C y templado.

Figura N° 5b. El mismo material calentado a 1500°C/s hasta 900°C y templado.

Figura N° 5c. Imagen SEM de un área similar a la imagen central, donde se puede apreciar el detalle de la microestructura. F, P y M son ferrita, perlita y martensita respectivamente. Atacado con Nital 2%.

zonas ricas en carbono de la microestructura, se puedan formar varios productos de transformación de la austenita durante su enfriamiento, tales como bainita y martensita.

Observaciones finales

El análisis termodinámico del calentamiento continuo de un agregado de ferrita + cementita indica claramente que la transición de un mecanismo de formación de austenita controlado por difusión de carbono a un mecanismo controlado por el mo-

vimiento de la intercara ocurre a la temperatura denominada Am. La información metalográfica es consistente con la predicción termodinámica basada en condiciones de equilibrio local.

Agradecimientos.

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Metalúrgica en la Universidad de Santiago de Chile y el Proyecto Fondecyt N° 11170104 por el financiamiento parcial del Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales (18° SAM-CONAMET), celebrado en San Carlos de Bariloche, Argentina.

Referencias

Castro FM, Schulz B, Papaefthymiou S, Artigas A, Monsalve A, Petrov RH. 2016. The effect of ultra-fast heating on cold-rolled low carbon steel: formation and decomposition of austenite. *Metals* 6: 321. doi:10.3390/met6120321.

Castro FM, Sabirov I, Goulas C, Sietsma J, Monsalve A, Petrov RH. 2017. Austenite formation in 0.2% C and 0.45% C steels under conventional and ultra-fast heating. *Mater Des* 116: 448-460. doi:10.1016/j.matdes.2016.12.009.

Haworth WI, Parr JG. 1965. The effect of rapid heating on the alpha-gamma transformation of iron. *Trans ASM* 58: 476-488.

Hillert M, Nilsson K, Torndahl LE. 1971. Effect of alloying elements on the formation of austenite and dissolution of cementite. *J Iron Steel Inst* 209: 49-66.

Judd RR, Paxton HW. 1968. Kinetics of austenite formation from a spheroidized ferrite-carbide aggregate. *Trans AIME* 242: 206-215.

Mehl RF. 1943. The mechanism and rate formation of austenite from ferrite-cementite aggregates. *Trans ASM* 31: 613-650.

Speich GR, Szirmai A. 1969. Formation of austenite from ferrite and ferrite-carbide aggregates. *Trans AIME* 245: 1063-1073.