MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL CRECIMIENTO DE GRANO AUSTENITICO Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE SU INFLUENCIA EN LA DUREZA DE UN ACERO 1020

SEBASTIAN VASQUEZ PARRA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA D.C.
2018

MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL CRECIMIENTO DE GRANO AUSTENITICO Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE SU INFLUENCIA EN LA DUREZA DE UN ACERO 1020

SEBASTIAN VASQUEZ PARRA

PARA OBTENER EL TÍULO DE INGENÍERO MECÁNICO

TESIS

TUTOR
CARLOS ARTURO BOHÓRQUEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA D.C.
2018

TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 8
2. ESTADO DEL ARTE 9
3. JUSTIFICACIÓN 11
4. OBJETIVOS 12
4.1. OBJETIVO GENERAL 12
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
5. MARCO TEÓRICO 13
5.1. FORMACIÓN DE AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO DE ACERO CON BAJO CONTENIDO DE CARBONO EN EL RANGO DE TEMPERATURAS INTERCRÍTICA 13
5.2. EFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO SOBRE LA ENERGIA DE ACTIVACION (Q) 15
5.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO 17
5.4. EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA INICIAL 18
5.5. EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS 18
5.6. DUREZA 19
5.7. TRATAMIENTO TERMICO TEMPLE 19
5.8. NOMRA ASTM E112 20
6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 21
6.1. COMPOSICIÓN QUIMICA 21
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 24
7.1. MICROESTRUCTURA ACERO 1020 A 770-820 °C Y DIFERENTES TIEMPOS DE MANTENIMIENTO 24
8. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CRECIMIENTO DE GRANO AUSTENITÍCO 33
8.1. INDICE DE TAMAÑO DEL CRECIMIENTO DE GRANO (n) 33
8.2. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (Q) 43
8.3. PARAMETRO DE AJUSTE (A) 35
8.4. ERROR ABSOLUTO Y REALITVO DEL MODELO 41
9. CONCLUSIONES 43
10. BIBLIOGRAFÍA 44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama para acero de 0,12 C - 1,5 Mn que ilustra las etapas de austenización según la temperatura y el tiempo (Fostein, 2015)..... 13
Ilustración 2. Cinética de la austenización isotérmica a diferentes temperaturas: (a) acero 0.06C-1.5Mn, (b) acero 0.12C-1.5Mn; (c) acero 0.20C-1.5Mn (Fostein, 2015). 14
Ilustración 3. Composición química de diferentes aceros, contenido de carbono equivalente y el diámetro medio medido del grano. (Christian Bernhard, 2008) 15
Ilustración 4. Diámetro medio de grano en la superficie y 10 mm por debajo la superficie, (D10) vs contenido equivalente de carbono CP para losas según la ilustración 3. (Christian Bernhard, 2008)..... 16
Ilustración 5. Energía de activación para el crecimiento del grano frente al contenido de carbono para todos los experimentos analizados. (Christian Bernhard, 2008) 16
Ilustración 6. Proceso de medición tamaño de grano. Micrografía a 1000 aumentos.. 23
Ilustración 7. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 770 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 500 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita. 24
Ilustración 8. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 820 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 500 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita. 25
Ilustración 9. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 770 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; 26
Ilustración 10. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 820 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; 27
Ilustración 11. Tamaño de grano austenitico a diferentes temperaturas. 30
Ilustración 12. Tamaño de grano austenitico a diferentes tiempos de mantenimiento.. 31
Ilustración 13. Indicé del tamaño de crecimiento de grano en relación al tamaño promedio del grano. 34
Ilustración 14. Relación entre el Error de suma cuadrada (n) y los diferentes valores de n para 770 °C. 37
Ilustración 15.Relación entre el Error de suma cuadrada (n) y los diferentes valores de n para 820 °C. 37
Ilustración 16. Valores experimentales vs valores obtenidos por el modelo matemático a 770 °C y diferentes tiempos de mantenimiento. 40
Ilustración 17.Valores experimentales vs valores obtenidos por el modelo matemático a 820 °C y diferentes tiempos de mantenimiento. 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química acero SAE 1020. ..... *21*
Tabla 2. Temperaturas intercríticas. *22*
Tabla 3. Medidas tamaño de grano en [µm] tomadas a 770 y 820 °C con diferentes tiempos de mantenimiento. *29*
Tabla 4. Desviaciones estándar de las medidas de tamaño de grano. *29*
Tabla 5. Microdurezas sin tratamiento en vickers. *31*
Tabla 6. Microdurezas de las fases martensita y ferrita a 770 y 820 °C *32*
Tabla 7. Medias tamaño de grano en µm valor experimental a 770-820 °C con diferentes tiempos de mantenimiento. *34*
Tabla 8. Medias parámetro A para diferentes valores de n. *35*
Tabla 9. Valores de tamaño de grano obtenidos por el modelo a diferentes valores de n para 770 °C. *36*
Tabla 10. Valores de tamaño de grano obtenidos por el modelo a diferentes valores de n para 820 °C. *36*
Tabla 11. Medias parámetro A definidas con los valores de n que generan el mínimo error de suma cuadrada. *38*
Tabla 12. Tamaño de grano medio experimental vs tamaño de grano obtenido por el modelo a 770 °C y diferentes tiempos de mantenimiento. *39*
Tabla 13. Tamaño de grano medio experimental vs tamaño de grano obtenido por el modelo a 820 °C y diferentes tiempos de mantenimiento. *39*
Tabla 14. Error absoluto y relativo de datos experimentales vs datos calculados por el modelo a 770 °C. *41*
Tabla 15.Error absoluto y relativo de datos experimentales vs datos calculados por el modelo a 820 °C. *41*

RESUMEN

El presente trabajo direcciona el desarrollo y validación de un modelo matemático experimental para predecir el tamaño de grano austenitico en el rango de temperaturas intercríticas durante el proceso de templado. En primer lugar, el tamaño de grano de austenita fue determinado mediante el estudio metalográfico del acero con el uso fotografías sobre la microestructura del material a dos temperaturas y diferentes tiempos de mantenimiento en el horno. A continuación, se plantea el modelo matemático teniendo en cuenta todos estos parámetros experimentales y se realiza el estudio de la dureza luego del temple para establecer su relación con el tamaño de grano. De esta forma fue posible estudiar la influencia del tamaño de grano austenitico sobre la dureza del material en el rango de temperaturas intercríticas.

El conocimiento y control del crecimiento de grano siempre ha sido un factor importante por tener en cuenta al momento de establecer el cambio en las propiedades mecánicas de los materiales como la dureza, el desarrollo de un modelo matemático que pueda predecir este fenómeno es el objetivo principal de este trabajo. Este estudio se realizó bajo diferentes condiciones de temperatura y variación del tiempo de mantenimiento en el proceso de temple, dentro del rango de temperaturas intercríticas A1 y A3 para el acero SAE 1020 utilizado. Con el fin de obtener los datos necesarios para el posterior análisis y planteamiento matemático.

Los resultados obtenidos por el modelo de predicción para el tamaño de grano se ajustaron a los datos experimentales con un margen de error aceptable.

A lo largo del documento se encontrará toda la información pertinente al proceso experimental, discusión y análisis de resultados, planteamiento matemático para el crecimiento de grano austenitico, fotografías metalográficas del proceso y por ultimo las conclusiones pertinentes al estudio realizado.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los estudios realizados en cuanto al modelamiento matemático del crecimiento de grano y su influencia en las propiedades mecánicas de los aceros se ha visto enfocado al conocimiento de estos factores sobrepasando la región intercrítica del material con el uso de diferentes tratamientos térmicos como el temple. Sin embargo, el estudio en la región intercrítica se encuentra muy limitado y más aún el conocimiento del crecimiento de grano y la influencia que este pudiera tener frente a las propiedades mecánicas del material es casi nulo; un estudio de este tipo en la región intercrítica podría responder a los cuestionamientos planteados anteriormente y además de esto un modelo matemático que pueda predecir el tamaño de grano para esta zona proporcionaría datos suficientes para establecer propiedades fundamentales como la dureza para un acero SAE 1020.

Con el control en el crecimiento de grano en base a un modelo matemático, facilita en gran manera la determinación de los parámetros necesarios en la obtención de un determinado material como lo son la temperatura y el tiempo de mantenimiento necesario para obtener un tamaño especifico de grano al final de un tratamiento térmico como el temple, el cual define los rango de valores de propiedades como la dureza y disminuye el uso costoso de pruebas específicas con el fin de conocer el comportamiento del crecimiento de grano y su influencia en las propiedades del mismo.

Se desarrollaron dos proyectos en conjunto, el proyecto titulado Influencia del tiempo de permanencia en el tamaño de grano de la martensita en un acero tratado a temperaturas intercríticas se encargó de toda la parte metalográfica y el presente documento trabajo toda el área matemática con el uso de los datos experimentales obtenidos en la parte metalográfica, por lo tanto las fotografías utilizadas al igual que la medición de durezas realizadas pueden ser similares al proyecto mencionado anteriormente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de grano austenitico depende de la temperatura de calentamiento y el tiempo de sostenimiento, por lo tanto, son variables que se pueden controlar durante el proceso de temple del acero, el conocimiento de los cambios de microestructura que se presentan durante el calentamiento juegan un papel importante en la obtención de las propiedades mecánicas, sin embargo, obtener los datos de un material en específico para definir una propiedad como la dureza no es una tarea sencilla. Es por esto que un modelamiento matemático de la evolución de grano de ausentita durante los intervalos de calentamiento puede establecer la temperatura y el tiempo de sostenimiento para controlar las propiedades mecánicas como la dureza del acero SAE 1020. La función principal del modelo es poder establecer los parámetros que intervienen en un proceso como lo es el temple y poder definir los mismos con el fin de obtener ciertas características específicas en las propiedades mecánicas de un material como lo es en este caso la dureza.

Realizando la búsqueda de toda la información pertinente a este caso, se encuentra bastantes referencias que atacan la problemática a temperaturas mayores a A3, lastimosamente la información sobre este fenómeno del crecimiento de grano austenitico en el rango de temperaturas intercríticas A1 y A3 es muy limitada y mucho más en aceros con bajo contenido de carbono como el SAE 1020. De igual forma en la universidad se encuentra el mismo patrón de investigación como el mencionado por esta razón este estudio se enfoca con gran importancia en la región intercrítica.

Todo lo anterior llevo a plantear un modelo matemático que pueda predecir el tamaño de grano en un acero SAE 1020 luego del proceso de templado dentro del rango de temperaturas intercríticas.

2. ESTADO DEL ARTE

Muchos modelos empíricos para la predicción de crecimiento de grano de austenita se han propuesto por expertos en el área de materiales a lo largo de los años con respecto a este tema, con el uso de los datos experimentales proponen una solución matemática que pueda predecir el crecimiento de grano.

Beck en 1948 sugirió una ecuación empírica algo sencilla para la predicción de crecimiento del grano durante el temple isotérmico para el aluminio de alta pureza.

$$D = \frac{D_r}{A^n}(t_g + A)^n \qquad \text{(Ec.1)}$$

D es el tamaño de grano promedio después del proceso de templado. El proceso de temple incluye el tiempo para la recristalización completa *R* y el tiempo para el crecimiento del grano *tg*. *Dr* es el tamaño de grano recristalizado, *n* es un parámetro que depende de la temperatura y del material. Fue uno de los primeros modelos planteados para predecir el tamaño de grano. (Beck, Holzworth, & Hu, 1948)

E. Anelli desarrollo un conjunto de modelos matemáticos integrados para simular la laminación en caliente y el enfriamiento controlado de varillas. Con el uso de pruebas experimentales en aceros con C-Mn y aceros eutectoides seleccionados como representativos de las diversas aplicaciones de las varillas. La recristalización de austenita, fracción de austenita transformada, microestructuras finales y propiedades mecánicas fueron calculadas con el modelado de fenómenos físicos y usando relaciones cuantitativas entre los parámetros microestructural y cinético y las variables del proceso, es decir, tensión, velocidad de deformación, temperatura y tiempo.

E. Anelli aplico los modelos para predecir la evolución de la microestructura durante el laminado en caliente y para investigar el efecto de las condiciones de trabajo y los mecanismos de recristalización en la formación de microestructuras heterogéneas austeníticas. Con el estudio realizado por Anelli los modelos de crecimiento de grano que proporciono lograron dar una visión importante del proceso que fue muy beneficiosa en la mejora de la calidad de los productos obtenidos mediante la laminación en caliente. (Anelli, 1992)

Turnbull determino un valor teórico de exponente crecimiento de grano fue de 2,0 para su modelo matemático basado en el de Beck. Y los otros estudios acordaron que el crecimiento de grano cambia el valor de exponente con condiciones de calentamiento. (Turnbull, 1951)

Raghunathan realizó un estudio paramétrico para cuantificar el tamaño de grano en dos aleaciones comerciales donde examino los efectos de la temperatura y el tiempo, mostrando que los parámetros de deformación y las microestructuras originales tienen un efecto controlador sobre el tamaño de grano. De esta forma presenta la formula cinética del crecimiento de grano:

$$d = d_0 + At^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \qquad \text{(Ec.2)}$$

Donde d es el tamaño de grano final, d_0 el tamaño de grano inicial, A es un parámetro de ajuste, t es el tiempo de mantenimiento, m índice de tiempo, Q la energía de activación, R la constante del gas con un valor de 8,314 [J/mol K] y T la temperatura. (Raghunathan & Sheppard, 1989)

Xu Yaowen, Di Tang, Yong Song y Xiaogang Pan desarrollaron un modelo pragmático para predecir el crecimiento de grano de austenita isotérmica en un acero de doble fase laminado en caliente, se estudiaron diferentes condiciones de calentamiento donde se varió el tempo de mantenimiento, la temperatura y la velocidad de calentamiento y se hizo un análisis matemático sobre el exponente de tiempo y el tamaño de grano inicial donde se encontró que el exponente de tiempo de la ecuación de Beck vario en un amplio rango cuando la temperatura disminuye. (Yaowen, Tang, Yong, & Pan, 2011)

Dingqian Dong, Fei Chen, y Zhenshan Cui determinaron un modelo matemático para el crecimiento de grano austenitico en un acero de baja aleación donde definieron que la temperatura de calentamiento y el tiempo de mantenimiento son dos factores fundamentales para el comportamiento del crecimiento de grano de austenita, con el uso de modelamiento teóricos anteriores plantean una ecuación exponencial teniendo en cuenta el crecimiento de grano inicial durante el proceso experimental realizado como base de la investigación. (Dong, Chen, & Cui, 2012)Se encontró que la temperatura de calentamiento a 1050 ° C es un punto de inflexión durante el crecimiento del grano de austenita.

Bernhard año 2008 en su investigación establece un modelo matemático del crecimiento de grano para el proceso de colada continua en láminas de diferentes aceros con bajo contenido de carbono, teniendo en cuenta la composición química de los aceros y su influencia en este fenómeno, establece un valor C_p como contenido de carbono específico equivalente basándose en la composición química de cada acero con el cual define el crecimiento de grano según la composición química del material y a partir de esto con los datos experimentales tomados en las mediciones define un modelo para predecir el aumento en el tamaño de grano de cada acero con el fin de establecer una relación directa con la composición química.

$$\bar{D}(t+\Delta t) = \bar{D}(t) + M_0^* * \exp\left(\frac{-2Q_{app}}{R(T_i+T_{i+1})}\right) * \left(\frac{1}{\bar{D}(t)}\right) * \Delta t \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Donde, M_0^* es la constante cinética que describe la movilidad del límite de grano en [m^2/s] asumido como $4*10^{-3}$ [m^2/s], $\bar{D}$ diámetro promedio del grano, t es el tiempo, T la temperatura aplicada, R la constante de los gases (8.314 [J/mol*K]) y Q_{app} es la energía de activación. (Christian Bernhard, 2008).

Todos los estudios realizados anteriormente como se pudo observar en los antecedentes se trabajaron por encima de la zona de la región intercrítica, es por esta razón que el presente proyecto se enfocó en elaborar todos los estudios pertinentes al crecimiento de grano dentro de la región intercrítica, que arrojo resultados positivos y cumplió con las expectativas planteadas al iniciar el proyecto.

3. JUSTIFICACIÓN

Se ha establecido que el tamaño de grano está directamente relacionado con las propiedades finales de cada material, en la mayoría de los estudios realizados con referencia al modelamiento matemático del crecimiento de grano en los aceros el enfoque ha sido el estudio de este fenómeno por encima de la zona intercrítica, de la temperatura A3 a la hora de realizar tratamientos térmicos como el templado; los resultados de estos estudios han sido positivos y la influencia de los mismos en las propiedades mecánicas del material se han definido dependiendo del tratamiento térmico utilizado y el material. A pesar de esto no es suficiente para definir la influencia del crecimiento de grano dentro de la zona intercrítica que pueda tener sobre las propiedades mecánicas del material, es por esta razón que un estudio del crecimiento de grano austenitico dentro de la región intercrítica y su influencia en las propiedades mecánicas es tan necesario e indispensable con el fin de conocer los efectos positivos o negativos que pueda tener un aumento en el tamaño de grano y a su vez la proporción de crecimiento del mismo.

Con el planteamiento de un modelo matemático que pueda predecir el crecimiento de grano, se establece una herramienta con la que se puede definir valores en las propiedades mecánicas como la dureza luego de un tratamiento térmico como el temple con el control de los parámetros que intervienen en el proceso como la temperatura y el tiempo de mantenimiento. Todo esto con el fin de facilitar el conocimiento pertinente al tamaño de grano y la influencia que pueda tener en propiedades como la dureza sin tener la necesidad de realizar costosos y largos ensayos que estudian estos fenómenos.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener un modelo matemático que defina el crecimiento de grano austenítico en un acero 1020 para verificar su influencia en la dureza de dicho material.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los datos experimentales de crecimiento de grano austenitico según la norma E 407-99 “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”.
- Plantear un modelo matemático que pueda establecer el crecimiento de grano austenitico y a su vez concuerde con los datos obtenidos experimentalmente.
- Definir el margen de error entre el modelo matemático y los datos experimentales para establecer su eficacia.
- Medición de dureza del acero posterior al ensayo E 407-99 con el fin de establecer la influencia positiva o negativa del crecimiento de grano sobre esta propiedad del material.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. FORMACIÓN DE AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO DE ACERO CON BAJO CONTENIDO DE CARBONO EN EL RANGO DE TEMPERATURAS INTERCRÍTICA

Los factores más importantes para justificar un tratamiento térmico intercritico, incluyen la nucleación y **el crecimiento de la austenita** y la duración de la transformación "el proceso" por falta de uniformidad en el contenido de carbono en austenita.

Existen tres etapas de austenizacion isotérmica en los aceros con estructura ferrita-perlita en su microestructura:

- Un crecimiento rápido en la fase y regiones de perlita hasta que son consumidas totalmente, se tienen los siguientes datos experimentales: en la etapa de 0,06 C – 1,5 Mn se obtuvo una estimación de 15 seg a 740 °C y 12 seg a 780 °C; para los aceros con 0,12 a 2% C de 30 seg a 2 min con una temperatura de 740 °C.
- Crecimiento lento de la austenita en zonas en regiones con ferrita, se tiene que a temperaturas mayores a 850 °C es controlada la etapa por la difusión del carbono en la austenita con un tiempo de 2-9 seg, o se puede controlar por la difusión del manganeso a temperaturas entre 740 – 780 °C, pero con un tiempo de 4-24 horas de proceso.
- Crecimiento de austenita en equilibrio a una velocidad controlada por la difusión de elementos de aleación en austenita, esta etapa de crecimiento es 3 veces más lenta que en la ferrita con un tiempo de 2000-4000 horas.

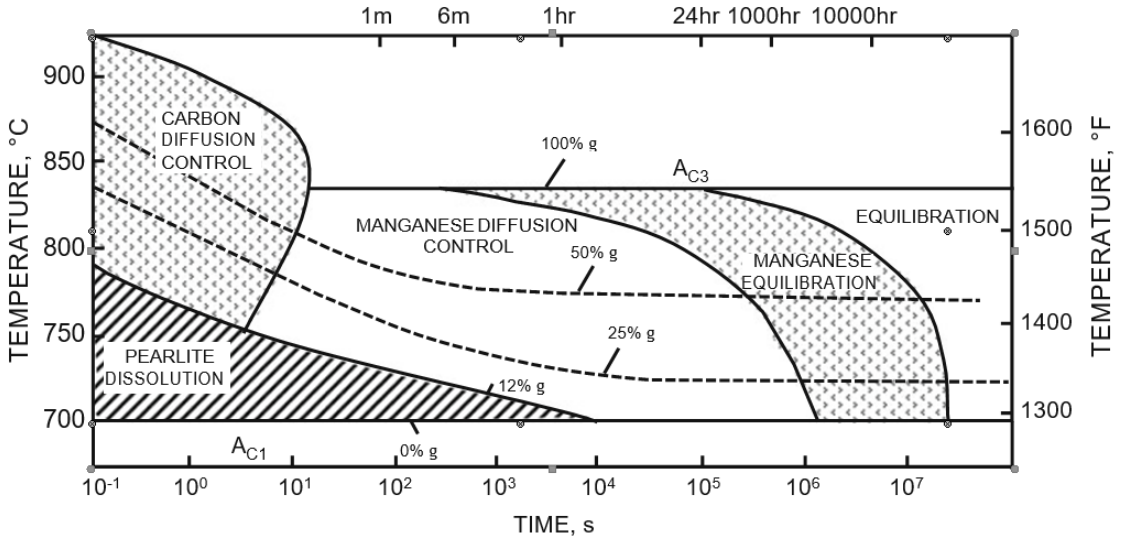

Ilustración 1. Diagrama para acero de 0,12 C - 1,5 Mn que ilustra las etapas de austenización según la temperatura y el tiempo (Fostein, 2015).

En la primera etapa de austenizacion el aumento inicial en la austenita se debe a la transformación de la perlita sin cambiar la cantidad de ferrita, a pesar de esto, cierta cantidad de perlita puede estar retenida en la etapa dos el crecimiento austenitico, en esta

etapa en los límites de la interface de ferrita-perlita y el crecimiento de grano de austenita emergen más temprano en ferrita, se producen simultáneamente.

“Un estudio detallado mostró que en los aceros de medio carbono (0.36-0.47% C), la transformación de perlita a austenita puede, a su vez, proceder en uno o dos pasos dependiendo de la velocidad de calentamiento. A una velocidad de calentamiento muy baja (0.05 °C / s), las placas de ferrita y cementita se transforman simultáneamente. A mayor velocidad de calentamiento (20 °C / s), se observó un proceso de dos pasos: la ferrita dentro de un grano de perlita se transforma primero en austenita y luego las laminillas de cementita comienzan a disolverse (Savran et al., 2007)”.

Las curvas de austenización isotérmica para aceros con diversos contenidos de carbono (0.06, 0.12 y 0.20%) se resumen en la ilustración 2. Como se puede observar, al acercarse a la "cantidad de equilibrio de austenita" se nota solo a bajas temperaturas de la región intercrítica y solo para aceros con 0.06 y 0.12% C y requiere un tiempo de más de 15 minutos para lograr esa cantidad de austenita.

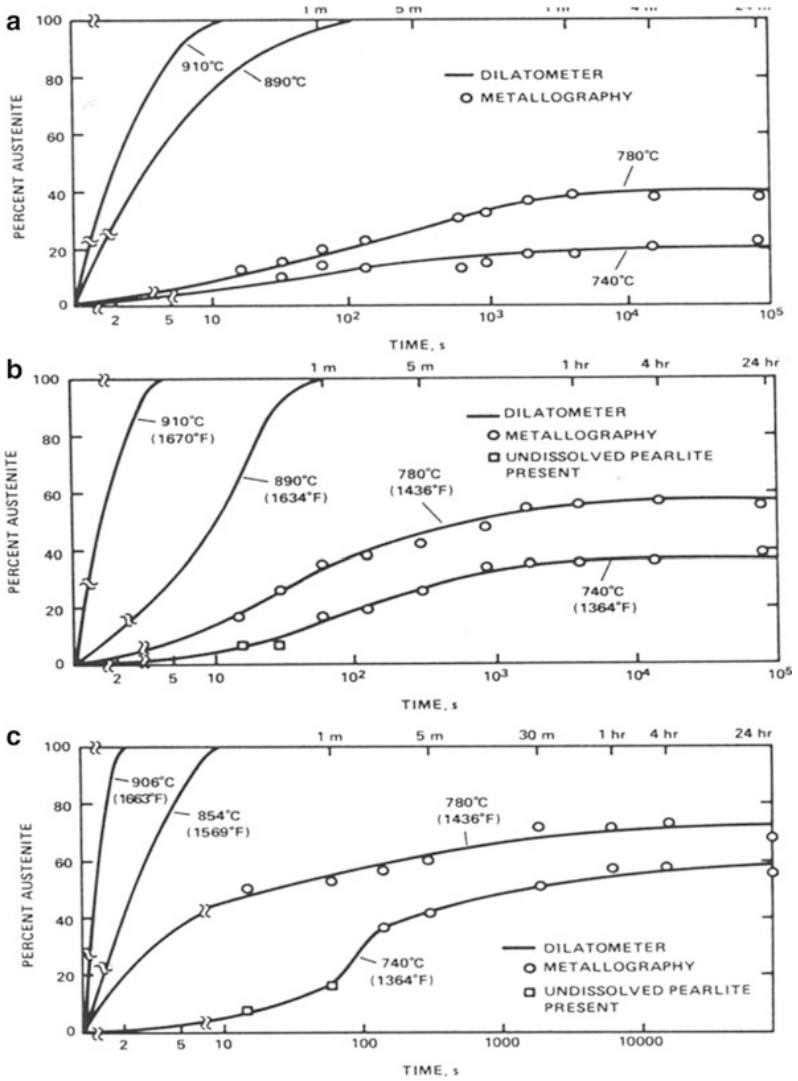

Ilustración 2. Cinética de la austenización isotérmica a diferentes temperaturas: (a) acero 0.06C-1.5Mn, (b) acero 0.12C-1.5Mn; (c) acero 0.20C-1.5Mn (Fostein, 2015).

5.2. EFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO SOBRE LA ENERGIA DE ACTIVACION (*Q*)

El efecto de la composición del acero en el proceso de austenización abarca una serie de factores: los cambios en la energía de activación de la transformación de fases, la difusividad del carbono, la actividad termodinámica del carbono en austenita, los gradientes de concentración de carbono entre las fases, así como los valores de temperaturas críticas de Ae, A1 y A3.

En cuanto a la energía de activación, según Bernhard es un valor que depende intrínsecamente de la composición química del carbono en el artículo Bernhard menciona y determina como la composición química de los aceros puede establecer matemáticamente una expresión que permita hallar esta variable, teniendo en cuenta el contenido de carbono especifico equivalente del acero establecido por la expresión (Christian Bernhard, 2008):

$$C_p = mass\ pct\ C - 0{,}14 * \ mass\ pct\ Si + 0{,}04 * mass\ pct\ Mn \qquad \text{(Ec. 4)}$$

Decide establecer un modelo matemático del crecimiento de grano austenitico en un proceso de colada continua en láminas de diferentes aceros con bajo contenido de carbono basándose en la composición química del material, como factor determinante en el desarrollo del crecimiento de grano austenitico.

Bernhard define a Q_{app} energía aplicada como la energía de activación Q necesaria para el crecimiento de grano austenitico en su modelo matemático y fue utilizada como un parámetro de ajuste. Lo que determino que para un acero con un porcentaje de 0.17 C en el rango de temperaturas de 1050-1150 °C un valor de Q_{app} igual a 180.2 [kJ/mol].

Puesto que Q_{app} fue utilizado como un parámetro de ajuste para el modelo planteado por Bernhard ecuación 5, para diferentes C_p se estableció el tamaño de grano promedio obtenido de los datos experimentales como se muestra en la ilustración 4 medidos en la superficie de las láminas y 10 mm por debajo de esta superficie con base en los contenidos de carbono equivalente de la ilustración 3 mostrados a continuación:

	Composición quimica Aceros								Media Tamaño Grano (mm)	
Acero	C	Si	Mn	Al	Nb	Ti	N	c_p	$\bar{D}_0$	$\bar{D}_{10}$
A	0.168	0.21	1.50	0.032	0.001	0.002	0.0033	0.20	0.98	1.78
B	0.185	0.22	0.69	0.036	0.001	0.002	0.0080	0.18	0.71	1.65
C	0.530	0.24	0.86	0.042	0.002	0.005	0.0050	0.53	0.58	0.66
D	0.210	0.22	1.45	0.047	0.001	0.003	0.0036	0.24	0.84	1.52
E	0.152	0.02	1.09	0.039	0.001	0.001	0.0070	0.19	—	1.49
F	0.210	0.19	1.54	0.048	0.003	0.002	0.0060	0.25	—	1.57
G	0.171	0.44	1.54	0.039	0.022	0.004	0.0038	0.17	0.59	1.79
H	0.174	0.16	1.47	0.031	0.028	0.001	0.0028	0.21	—	1.76

Ilustración 3. Composición química de diferentes aceros, contenido de carbono equivalente y el diámetro medio medido del grano. (Christian Bernhard, 2008)

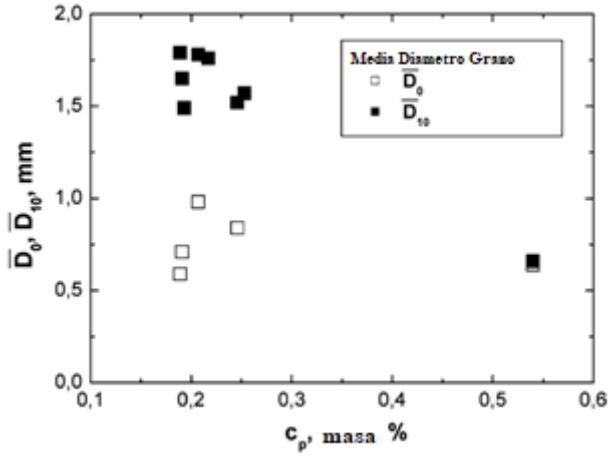

Ilustración 4. Diámetro medio de grano en la superficie y 10 mm por debajo la superficie, (D10) vs contenido equivalente de carbono CP para losas según la ilustración 3. (Christian Bernhard, 2008)

Teniendo en cuenta estos datos experimentales medidos sobre las láminas de acero utilizadas en el proceso experimental de Benhard, plantea un modelo matemático para el crecimiento de grano donde Q es el valor de ajuste que define en función del C_p y los tamaños de granos obtenidos que se muestran en la ilustración 4, además de las temperaturas utilizadas y los tiempos de mantenimiento.

$$\overline{D}(t+\Delta t) = \overline{D}(t) + M_0^* * \exp\left(\frac{-2Q_{app}}{R(T_i+T_{i+1})}\right) * \left(\frac{1}{\overline{D}(t)}\right) * \Delta t \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Donde, M_0^* es la constante cinética que describe la movilidad del límite de grano en [m^2/s] asumido como 4*10^{-3} [m^2/s], $\overline{D}$ diámetro promedio del grano, t es el tiempo, T la temperatura aplicada, R la constante de los gases (8.314 [J/mol*K]) y Q_{app} es la energía de activación.

De esta forma se establece como se muestra en la ilustración 5 los valores de Q_{app} contra el contenido equivalente de carbono de los aceros mostrados en la ilustración 3. Aplicando el método de regresión lineal define una función que puede predecir la energía de activación en función del contenido equivalente de carbono en el acero para un contenido de carbono entre 0.05-0.70.

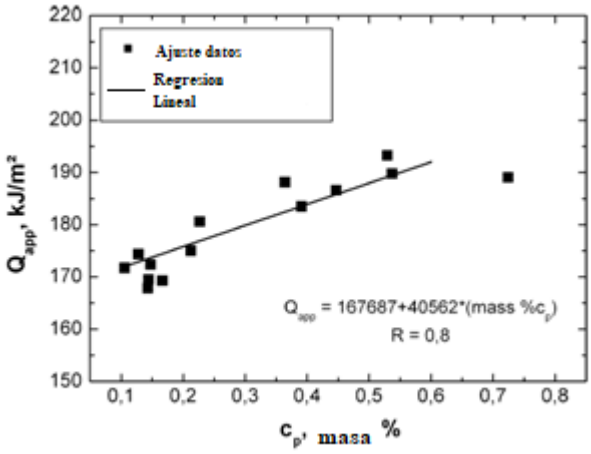

Ilustración 5. Energía de activación para el crecimiento del grano frente al contenido de carbono para todos los experimentos analizados. (Christian Bernhard, 2008)

Se obtiene la expresión descrita en la ecuación 6 para obtener la energía de activación en función del contenido equivalente de carbono en los aceros con base a los datos graficados en la ilustración 5.

$$Q_{app} = 167.686 + 40.562 * (masa\ pct\ C_p) \qquad \text{(Ec.6)}$$

Por ultimo Benhard concluye que la energía de activación para el crecimiento de grano Q_{app} sirvió como parámetro de ajuste en su modelo planteado para el crecimiento de grano ecuación 5, la correlación existente entre el contenido de carbono y Q_{app} facilita la obtención del valor correspondiente a la energía de activación dentro del rango de (0.05 a 0.70 masa C).

La energía de activación proporciona la fuente capaz de vencer la resistencia que oponen los límites de grano para aumentar su tamaño, al proporcionarles energía en forma de calor por medio de la temperatura aplicada en el tratamiento térmico, por lo tanto, es un factor que se debe tener en cuenta en cualquier modelo que pretenda predecir el aumento en el tamaño de grano. Con la relación que establece Bernhard de la energía de activación y la composición química del acero en su estudio; proporciona una herramienta útil en el cálculo de este parámetro.

5.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO

La temperatura de calentamiento es uno de los factores que controla la fracción de volumen de austenita en el acero, el contenido de carbono tiene un efecto sobre la estabilidad de la misma austenita y la microestructura final formada después del proceso de enfriamiento. La velocidad de crecimiento de la fase de austenita, *v* se puede describir con la siguiente ecuación:

$$v = D\frac{dC}{dx}\left(\frac{1}{\Delta C^{\gamma-\alpha}} + \frac{1}{\Delta C^{c-\alpha}}\right) \qquad \text{(Ec.7)}$$

Donde:

- D = difusividad del carbono en austenita con un valor para los aceros de 22.8 mm^2/s
- dc/dx = gradiente de concentración de carbono
- $\Delta C^{\gamma-\alpha}$ = concentración de carbono en la austenita-ferrita
- $\Delta C^{c-\alpha}$ = concentración carburo-austenita

Al aumentar la temperatura la disminución en el gradiente de concentración de carbono es mayor en austenita-ferrita que en la concentración de carburo-austenita, la velocidad de crecimiento de la austenita hacia la ferrita es mayor que en el carburo. Con el aumento en la temperatura de calentamiento en aceros con carburos estables puede conducir a un mayor número de carburos sin disolver dentro de la austenita (martensita después de enfriar).

5.4. EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA INICIAL

La microestructura inicial controla la cinética de austenizacion y la morfología de las fases de austenita y ferrita que finalmente se transforman en la microestructura final del acero luego del proceso de enfriamiento. Centrándose en la austenizacion el efecto directo de la microestructura original se manifiesta con un cambio de temperaturas críticas en las transformaciones de fase y también en la velocidad de crecimiento de austenita a una temperatura.

"Se encontró una velocidad de austenización más alta durante el recalentamiento de la microestructura inicialmente martensítica en comparación con la microestructura bainítica tratada en condiciones idénticas. La microestructura que contenía carburos esferoidizados demostró el mayor cambio en las temperaturas de Ac1 y Ac3 a valores más altos, así como la velocidad más lenta de austenización. Dado que la austenita generalmente se nuclea en interfaces de carburo / ferrita, la cantidad de fase γ y su velocidad de crecimiento aumentan al aumentar el área específica de las interfaces ferrita-carburo, es decir, con refinamiento de partículas de carburo y / o granos de ferrita (Law y Edmonds 1980)". (Fostein, 2015)

5.5. EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS

El tamaño del grano tiene un efecto mensurable en la mayoría de las propiedades mecánicas de los aceros, los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. Por ejemplo, a temperatura ambiente, la dureza, límite elástico, resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga y la resistencia al impacto aumenta con la disminución del tamaño del grano. La maquinabilidad también se ve afectada; el mecanizado en bruto favorece el tamaño de grano grueso, mientras que el mecanizado de acabado favorece el tamaño de grano fino. El efecto del tamaño de grano es mayor en las propiedades que están relacionadas con las primeras etapas de la deformación.

Por lo tanto, por ejemplo, el límite elástico depende más del tamaño del grano que la resistencia a la tracción. Los aceros de grano fino que no se endurecen se eliminan tan profundamente y tienen menos tendencia a agrietarse que los aceros de grano grueso de análisis similares. Además, los aceros de grano fino tienen una mayor resistencia a la fatiga, y un tamaño de grano fino promueve una tenacidad y una resistencia a los golpes algo mayores. Además, el trabajo en frío altera con frecuencia el tamaño del grano al promover un engrosamiento más rápido de los granos en áreas con estrés crítico. Sin embargo, las características originales del tamaño de grano generalmente pueden restablecerse mediante el alivio del estrés.

Los aceros de grano grueso tienen mejores propiedades de deformación por fluencia y tensión debido a que la difusión a altas temperaturas se ve impedida por la presencia de ángulo bajo en los aceros de grano grueso.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 1800 F o 982 C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano.

5.6. DUREZA

La dureza de un material es aquella propiedad de la capa superficial del material en este caso acero, de poder resistir toda deformación elástica, plástica o destrucción debido a la acción de esfuerzos de contacto locales originados por otro cuerpo (llamado indentador o penetrador), más duro, de determinada forma y dimensiones, el cual no sufre deformaciones residuales durante el contacto.

Por tanto, en general, se entiende por dureza a la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador sometido bajo carga, y en este sentido, la dureza se define como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada en su superficie.

Las propiedades como la dureza pueden verse afectadas de forma positiva o negativa dependiendo el valor del tamaño de grano, estudios realizados como el de Martínez (M.A. Martinez, 2005) definen que un acero de grano fino será más duro y más resistente que un material de grano grueso, puesto que en el último se tendrán más juntas de grano donde se acumularán mayores tensiones. Por todo lo anterior debe verificarse que la dureza es inversamente proporcional al tamaño de grano.

5.7. TRATAMIENTO TERMICO TEMPLE

Es un tratamiento térmico el cual se utiliza para aumentar la dureza y resistencia de los materiales, también es utilizado para la obtención de aceros martensítico, este proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura entre 725°C y 1000°C, en el cual la ferrita pasa a convertirse en austenita.

Existen 3 formas de enfriar el material después de haberlo sometido a las temperaturas deseadas:

AGUA: es uno de los medios más rápido para enfriar un material, además que se obtiene un temple más fuerte, aunque puede producir deformaciones y grietas.

ACEITE: es un enfriamiento más lento comparando con el agua, se obtiene un temple más suave y únicamente se utiliza para aceros aleados

AIRE: es el enfriamiento más lento q existe, alcanza a provocar casi aceros perliticos.

Al aumentar la temperatura en los hornos se está suministrando energía en forma de calor que interviene termodinámicamente para que los límites de grano se expandan y liberen toda esta energía aumentando el tamaño en el grano; con el enfriamiento rápido y

controlado se define la microestructura final del acero a la que llego durante el tiempo de mantenimiento en el horno.

5.8. NOMRA ASTM E112

El ASTM (American Society for Testing and materials) es una organización de normas internacionales que crea y publica normas técnicas para una amplia gama de materiales y productos. Esta norma describe diferentes métodos para poder realizar la medición del tamaño de grano al material deseado.

Los 3 procedimientos más utilizados para este procedimiento son:

- Procedimiento de comparación: consiste en comparar la estructura del grano con una cantidad determinada de imágenes graduadas
- Procedimiento planímetro: consiste en contar el número de granos dentro de un área determinada
- Procedimiento de intersección: consiste en realizar el conteo de los granos seguido del número de intersecciones de los bordes del grano.

Estableciendo de esta forma unas tablas de referencia para el tamaño promedio de grano con base a los procedimientos geométricos mencionados anteriormente.

6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización de la parte experimental se utilizaron varios equipos y componentes, para obtener datos confiables con los que se pueda realizar el debido análisis y planteamiento. Se decidió trabajar con un acero SAE 1020 conseguido en el mercado en una varilla de 19.05 mm por un metro de longitud, las probetas utilizadas fueron cortadas con una altura de 20 mm.

6.1. COMPOSICIÓN QUIMICA

Se saca una muestra para la realización del proceso de composición química del acero con el fin de obtener los porcentajes en masa de todos los elementos que se encuentran en la microestructura del material, se realizaron tres pruebas a la muestra del material para obtener el promedio de todos los porcentajes de masa de cada elemento como se muestra en la tabla 1 a continuación.

Elemento	Promedio del porcentaje en masa (%)	Composición química según norma SAE 1020
Fe	98.732	
Si	0.197	
Mo	0.009	
Al	0.037	
C	0.197	0,18 - 0,23
Cu	0.007	
W	0.023	
Nb	0.003	
Mn	0.716	0,30 - 0,60
Ni	0.014	
Co	0.003	
B	0.0005	
P	0.006	0,040 max
Cr	0.031	
Ti	0.002	
Pb	0.008	
S	0.010	0,050 max
V	0.002	
Sn	0.002	
Mo	0.000	

Tabla 1. Composición química acero SAE 1020.

Al observar la composición química del material y compararla con la norma SAE para un acero 1020 se puede establecer que el material se encuentra en el rango y cumple según la norma para los componentes más pertinentes como el carbono, manganeso, fosforo y azufre.

Teniendo los datos de composición química se procedió a calcular las temperaturas intercríticas que juegan un papel fundamental en el desarrollo del proyecto puesto que se tomaran dos temperaturas dentro del rango de A1 y A3 para realizar el tratamiento térmico a las probetas. Con el uso de las ecuaciones 6 y 7 se obtienen los valores de A1 y A3 en [°C] respectivamente.

$$A_1 = 723 - 7.08[Mn] + 37.7[Si] + 18.1[Cr] + 44.2[Mo] + 8.95[Ni] + 50.1[V] + 21.7[Al] + 3.18[W] + 297[S] - 830[N] - 11.5[C * Si] - 14.0[Mn * Si] - 3.10[Si * Cr] - 57.9[C * Mo] - 15.5[Mn * Mo] - 5.28[C * Ni] - 6.0[Mn * Ni] + 6.77[Si * Ni] - 0.80[C * Ni] - 27.4[C * V] + 30.8[Mo * V] - 0.84[Cr^2] - 3.46[Mo^2] - 0.46[Ni^2] - 28[V^2]$$

(Ec.8)

$$A_3 = 912 - 203 + 15.2[Ni] + 44.7[Si] + 104[V] + 31.5[Mo] + 13.1[W] - 30[Mn] - 11[Cr] - 20[Cu] + 700[P] + 400[Al] + 120[As] + 400[Ti]$$

(Ec.9)

Los resultados de las temperaturas intercríticas se observan en la tabla 2 con el uso de las ecuaciones 8 y 9 que tienen un error aproximadamente de 11°C.

A1 [°C]	A3 [°C]
727,804	830

Tabla 2. Temperaturas intercríticas.

Se cortaron 11 probetas de la varilla de acero SAE 1020 en la cortadora metalográfica, lo que era indispensable para no cambiar la microestructura del material.

Luego de tener cortadas las probetas se realiza el tratamiento térmico de temple en agua calentando las probetas a dos temperaturas definidas, 770 °C se escogió porque se quería trabajar cerca a la mitad de la región intercrítica y 820 °C se definió con el fin de conocer que sucede al acercarnos a la temperatura A3 de la región intercrítica; 5 probetas por cada temperatura variando el tiempo de permanencia en la mufla de 1 a 5 horas y extrayendo una por una cada hora para observar la influencia de la temperatura y el tiempo de mantenimiento en el crecimiento de grano.

Se procede a pulir las probetas haciendo uso de las lijas (del grano más grueso al grano más fino): 36, 120, 180, 240, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200,1500 y 2000 donde cada lija se usa aproximadamente de 3 a 5 minutos para poder eliminar todas las rayas que quedaron al momento de cortar el material. Posterior al lijado manual de cada probeta

llegando casi al brillo espejo se procede a terminar el proceso de lijado en la pulidora, con el uso de un paño para brillar y alúmina (oxido de aluminio) se hace girar a 350 revoluciones con un tiempo de permanencia de 8-10 minutos a cada probeta para darle el acabado final brillo espejo.

Ya obtenido el acabado final de las probetas se procede a realizar el ataque químico que nos revela la microestructura del material, con ácido nítrico al 2% preparado según la norma E 407-99. Según la norma se sumergen 5 segundos cada una de las probetas y luego de esto se pasan al alcohol para neutralizar el ataque y definir la microestructura del material.

Con el fin de conocer el tamaño de grano en todas las probetas se recurre al uso del microscopio que permite tomar fotografias a escalas muy pequeñas como micras y aumentos de hasta 1000 X, una por una son tomadas las fotograficas de todas las probetas y posterior a esto se realiza la medicion del tamaño de grano con el softhware del microscopio y se corrobora realizando un proceso mas largo que se muestra a continuacion en la ilustración 6. Se tomaron 15 datos de cada probeta y se obtuvo una media para su posterior uso en el modelo matematico de crecimiento de grano.

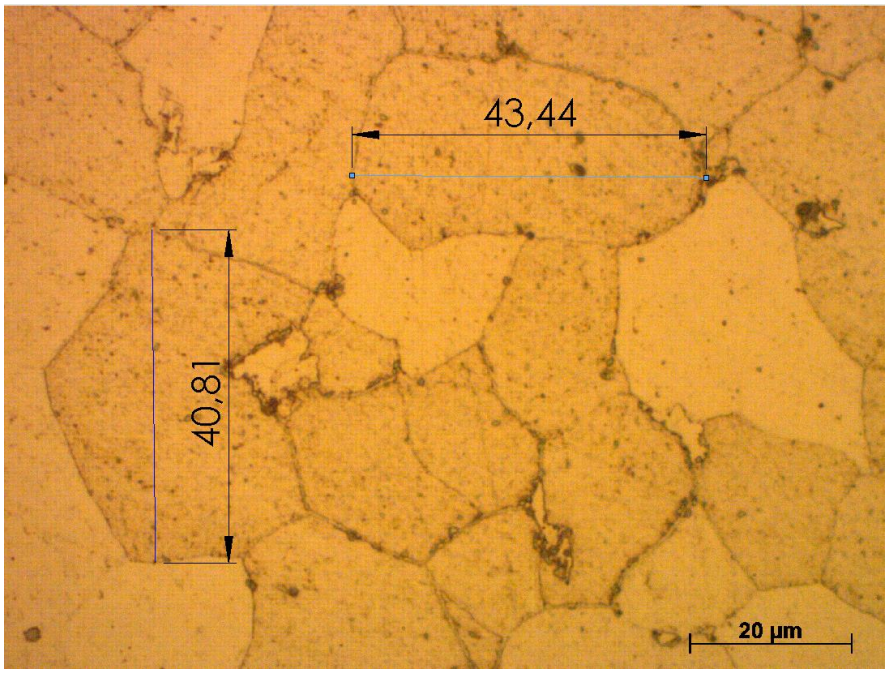

Ilustración 6. Proceso de medición tamaño de grano. Micrografía a 1000 aumentos.

Por ultimo ser realizan las mediciones de microdureza para cada probeta con el objetivo de recoger datos de las durezas en vickers (HV) de las dos fases observadas luego del tratamiento térmico de temple en este caso martensita y ferrita, para realizar el análisis de la influencia del tamaño de grano en el valor de la dureza. Se realizan alrededor de 5 tomas por cada fase es decir 10 tomas por cada probeta.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. MICROESTRUCTURA ACERO 1020 A 770-820 °C Y DIFERENTES TIEMPOS DE MANTENIMIENTO

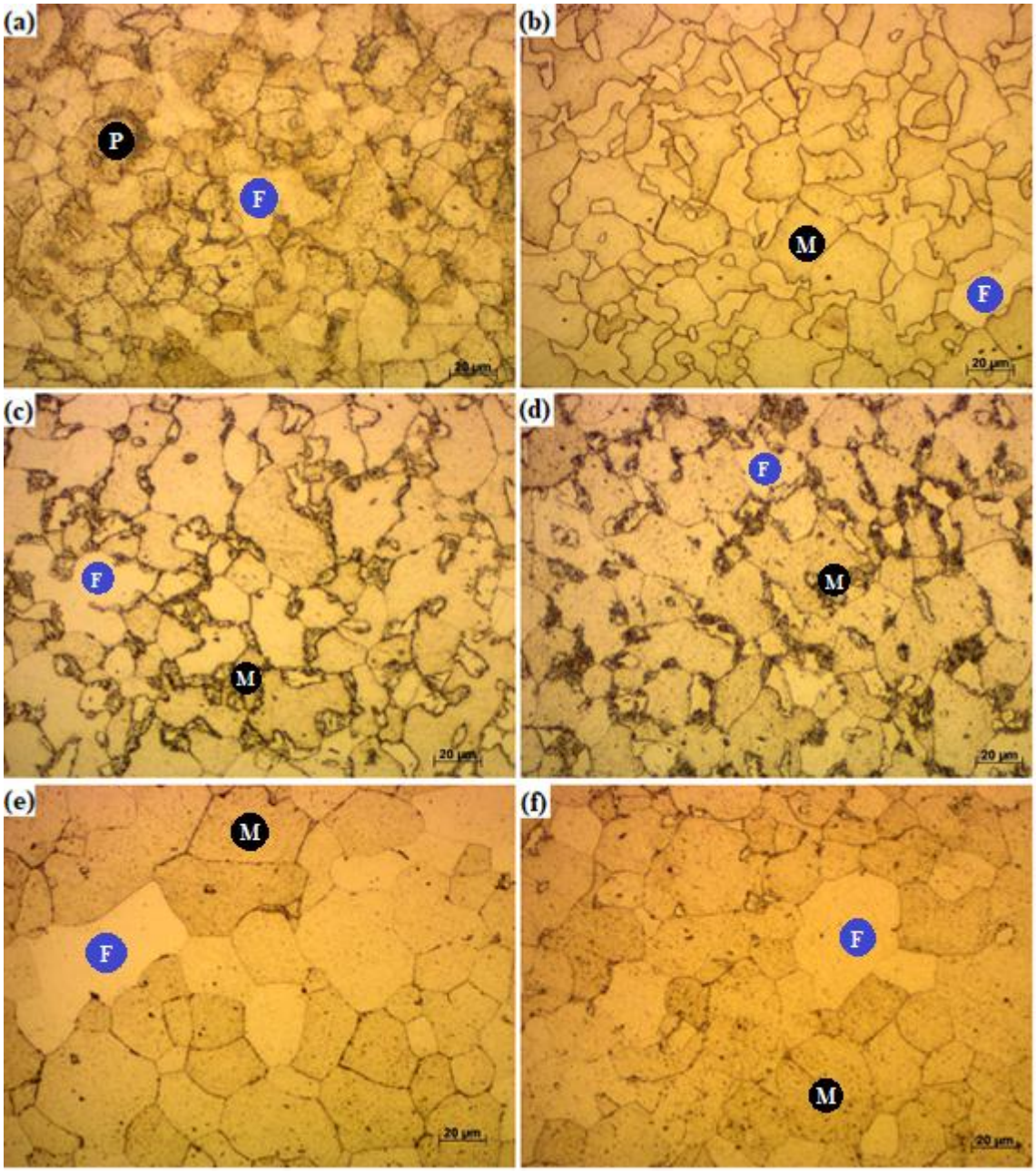

Ilustración 7. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 770 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 500 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita.

En la ilustración anterior se puede observar como aumenta el tamaño de grano austenitico al incrementar el tiempo de mantenimiento de las probetas a una temperatura constante como 770 °C. A partir de la segunda imagen (b) se puede ver un aumento progresivo hasta la última imagen (f) donde se presenta el mayor aumento en el tamaño de grano.

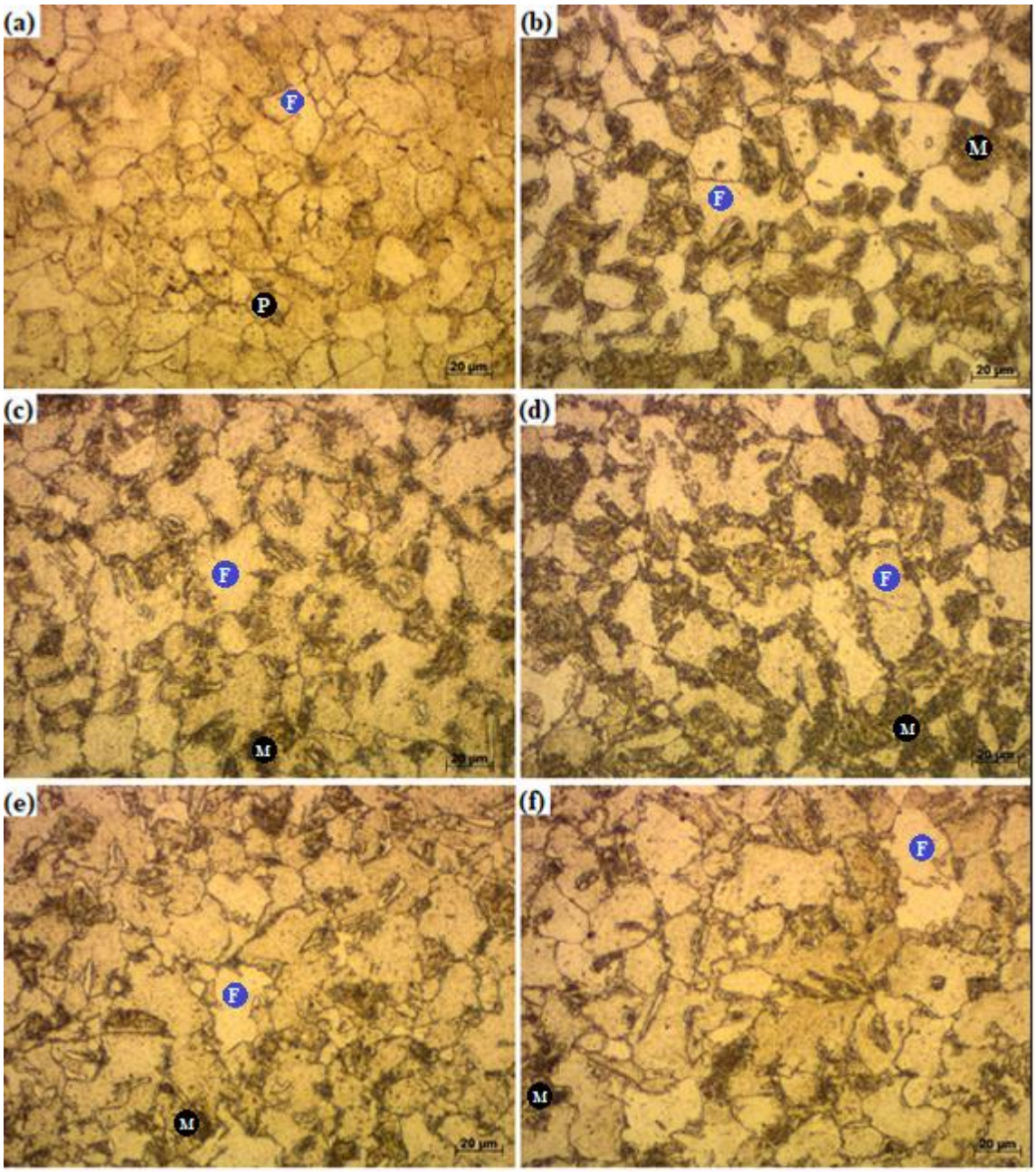

Ilustración 8. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 820 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 500 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita.

De igual forma para la ilustración 8 que muestra el tamaño de grano austenitico, este aumenta conforme aumenta el tiempo de mantenimiento en el horno, la temperatura utilizada en este caso es de 820 °C. Más adelante se verá que a esta temperatura el aumento en el tamaño de grano austenitico y en la fase ferritica es ligeramente mayor que a 770 °C.

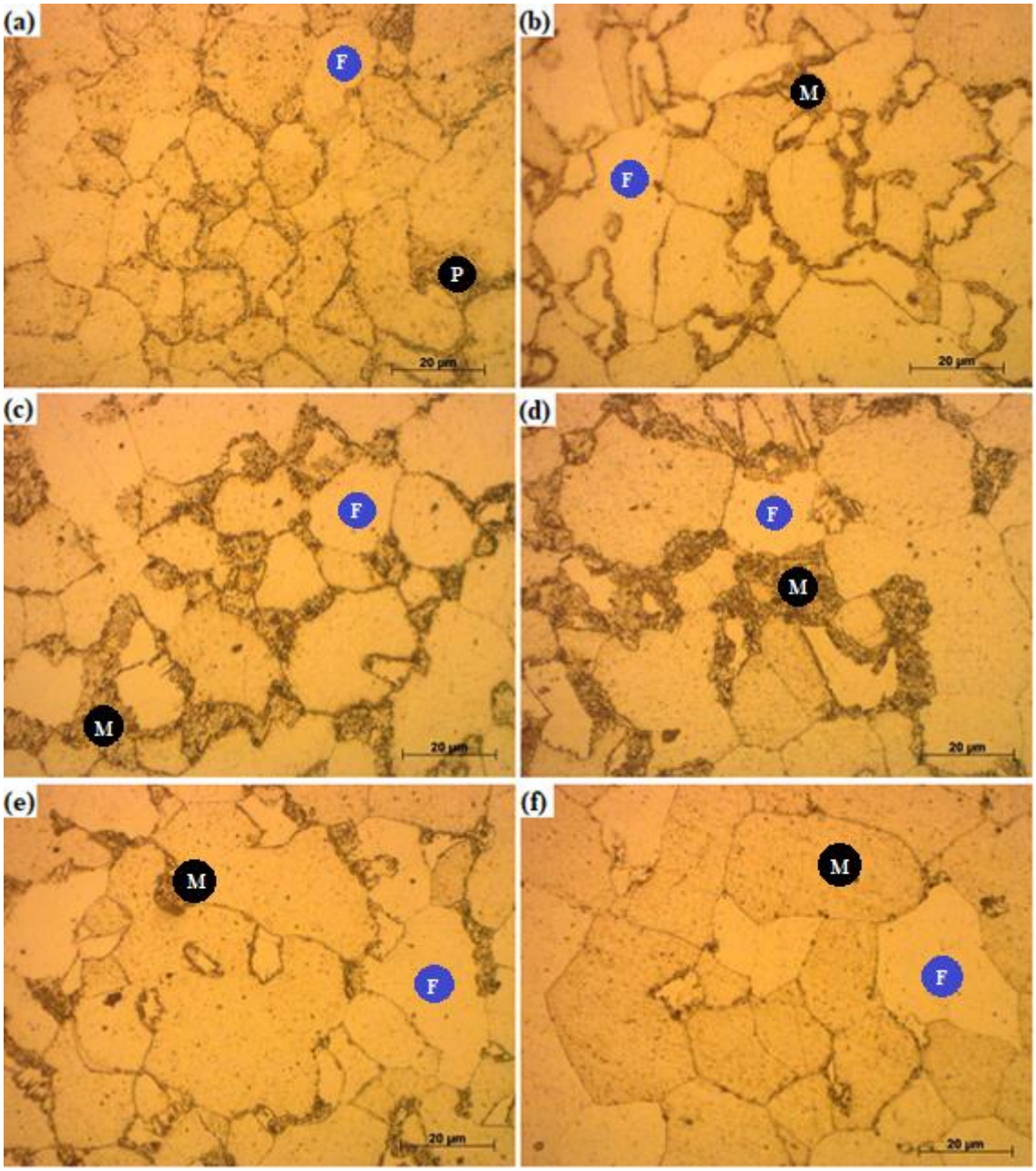

Ilustración 9. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 770 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 1000 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita.

Cuando se trabaja en la región intercrítica en un acero de bajo contenido carbono como el utilizado, la fase más estable es la ferrita y además de esto se tiene un microconstituyente como la perlita antes de realizar el tratamiento térmico, durante el proceso térmico esta perlita se transforma en austenita que luego al realizar el enfriamiento controlado rápidamente en agua se transforma en martensita; para obtener una estructura ferritico-martensitica lo cual es un acero de doble fase como se puede ver en las ilustraciones 9 y 10.

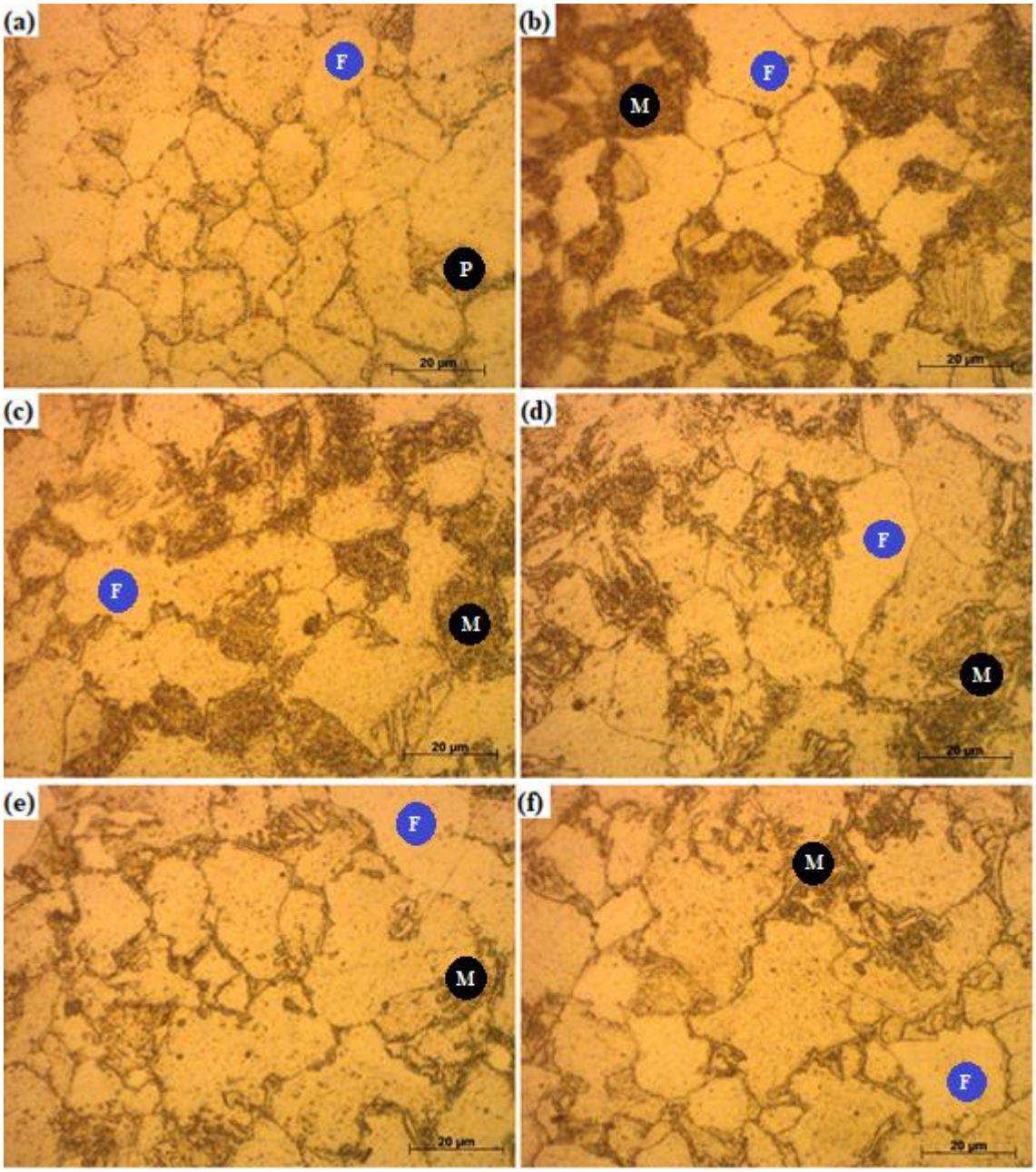

Ilustración 10. Efecto del tiempo de mantenimiento en el crecimiento del grano de austenita a 820 °C: (a) 0 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min; (e) 240 min; (f) 300 min. Micrografías a 1000 aumentos, (P) perlita, (F) ferrita, (M) martensita.

La transformación microestructural que se puede observar en las ilustraciones 9 y 10 desde la imagen (a) a la que no se le realizo un tratamiento térmico donde se presentan dos fases perlita y ferrita hacia las imágenes (b, c, d, e y f) que fueron tratadas térmicamente que presentan una microestructura de doble fase donde se observa martensita y ferrita nuevamente. Sin embargo, el crecimiento de grano es progresivo para ambas fases.

Según ilustraciones 9 y 10 el tamaño de grano aumenta a medida que el tiempo de mantenimiento se incrementa para 770-820 °C respectivamente, en ambas temperaturas que se encuentran en la zona de temperaturas intercríticas el aumento en el tamaño de grano es similar como se demostrara en la siguiente sección con los datos experimentales

obtenidos, aunque hay un leve incremento en las medidas del tamaño de grano austenitico a 820 °C comparadas con las obtenidas a 770 °C.

En las ilustraciones 9 y 10 para las micrografías (a, b) los granos se distribuyen homogéneamente y luego con el aumento del tiempo de mantenimiento la forma de los granos cambia ligeramente. En las micrografías (c, d) para ambas ilustraciones se puede ver que el aumento en el tamaño de grano va acompañado en la disminución en el número de granos por unidad de volumen. Finalmente, en las fotografías (d, e, f) en ambas ilustraciones el patrón de crecimiento de grano es similar y es donde se presentan los mayores cambios en cuanto al tamaño de grano con lo que se puede establecer una relación directa entre el tiempo de mantenimiento y el crecimiento de grano austenitico durante un tratamiento térmico como es el temple para este caso. Sin embargo, el mayor crecimiento de grano austenitico se presenta a las 5 horas de mantenimiento imagen (f) donde se tiene un tamaño medio de 45.6 y 46.3 µm a 770 y 820 °C respectivamente.

Se puede considerar que el crecimiento austenitico del grano transcurridas las 5 horas en el horno provoca el aumento más grande en el grano en un proceso isotérmico, como tal el proceso de engrosamiento ocurre a unos granos seleccionados aleatoriamente en dimensiones anormalmente grandes y los demás no pueden crecer hasta que ocurra una disolución adicional de la partícula; el crecimiento de grano presenciado podría afirmarse que es anormal puesto que no hay uniformidad en los granos de este acero y por lo tanto algunos granos pueden crecer excesivamente consumiendo a los más pequeños, la fuerza motriz para que se pueda presentar este crecimiento anormal del grano suele ser la reducción de energía del límite de grano. El factor que más interviene en un crecimiento anormal del grano son par las partículas de segunda fase como se presenta en este acero, bajo esta condición los granos que cuente con una ventaja de tamaño sobre los demás crecerán exponencialmente más rápido que los demás y los más pequeños entraran en el proceso de colisión con los límites de grano de los más grandes.

Con el uso de las micrografías mostradas anteriormente se tomaron 15 mediciones para el tamaño de grano por cada una de las probetas posterior al tratamiento térmico de temple aplicado y se determinó la media a utilizar en el modelo matemático como se muestra en la tabla 3.

	0 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min
770 [°C]	12,25	13,78	20,78	21,64	23,84	28,3
	12,64	14,44	23,8	23,45	26,11	30,32
	13,18	14,86	24,32	26,6	31,8	35,09
	15,4	16,52	26,13	26,86	33,57	37,5
	15,72	17,15	27,78	27,43	35,78	39,52
	18,58	22,14	28,3	30,03	38,18	41,88
	20,19	22,38	28,71	30,44	38,54	44,02
	23,32	24,73	30,19	32,47	40,85	45,62
	23,94	25,35	31,22	34,33	43,36	46,36
	24,11	25,7	33,39	35,93	43,82	47,31
	24,33	26,74	34,6	39,6	44,18	52,3
	27,09	27,8	40,24	46,29	47,23	57

	27,14	29,21	40,64	48,85	52,63	58,55
	28,99	30,9	41,27	54,89	56,73	59,85
	32,84	34,73	49,5	56,55	58,07	60,53
media 770 [°C]	21,31	23,10	32,06	35,69	40,98	45,61
820 [°C]	12,25	18,24	16,84	23,25	26,92	32
	12,64	21,4	17,03	25,84	31,39	33,47
	13,18	21,59	23,5	26,31	31,67	33,58
	15,4	22,01	26,92	28,99	34,34	37,48
	15,72	23,36	27,72	30,12	37,76	37,74
	18,58	23,37	28,33	31,68	40,89	41,51
	20,19	25,41	28,34	33,27	41,49	43,99
	23,32	25,96	30,86	37,08	42,74	45,55
	23,94	20,19	31,48	37,67	43,35	48,72
	24,11	20,15	32,21	40,57	44,23	50,02
	24,33	21,02	39,69	43,5	44,57	52,92
	27,09	22,01	40,35	44,01	48,29	53,04
	27,14	22,51	42,71	44,01	49,99	57,65
	28,99	37,79	44,17	46,34	57,42	62,05
	32,84	37,83	52,31	58,65	59,63	64,84
media 820 [°C]	21,31	24,19	32,16	36,75	42,31	46,30

Tabla 3. Medidas tamaño de grano en [µm] tomadas a 770 y 820 °C con diferentes tiempos de mantenimiento.

Con el fin de conocer la dispersión que puedieran tener los datos experimentales tomados de las micrografías se decide conocer la desviacion estandar de los datos, se calcula la desviación estandar de las medidas para ambas temperaturas, como se muestra a continuación en la tabla 4 con el uso de la ecaucion 10 (Ronald E. Walpole, 1999):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} |\bar{x} - x_i|^2}{m}} \qquad \text{(Ec. 10)}$$

	Deviación estándar en [µm]					
	0 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min
770 [°C]	6,25	6,29	7,64	10,81	9,78	10,11
820 [°C]	6,25	5,67	9,67	9,27	8,90	10,13

Tabla 4. Desviaciones estándar de las medidas de tamaño de grano.

Por lo tanto se puede definir que la desviacion estandar mas alta se presenta a las 3 y 5 horas de mantenimiento en el horno y la menor en la primera hora, esto confirma que se encuentra mayor dispersión en la medida del tamaño de grano al aumentar el tiempo de mantenimiento en el horno. Sin embargo teniendo en cuenta las medias de cada temperatura y su correspondiente tiempo de mantenimiento se encuentra que el valor mas alto para la desviacion estandar es de 10,81 [µm] y es el 19,11% del tamaño mas grande

de grano a los 180 min de tiempo de mantenimiento, por lo tanto se puede establecer que los datos tomados en cada una de las probetas son fiables y corroboran el crecimiento de grano austenitico luego del proceso de temple.

Con los datos recogidos de tamaño de grano a dos temperaturas 770 °C y 820 °C establecidas en la región intercrítica, se puede obtener una gráfica con las medias del tamaño de grano del acero 1020 a diferentes tiempos de mantenimiento como se muestra en la ilustración 11. Esto demuestra claramente que la velocidad de crecimiento de grano austenitico aumenta con el incremento de la temperatura y el tiempo de mantenimiento, de igual forma se puede definir según la ilustración 11 que el mayor aumento en el tamaño de grano austenitico se presentó en la segunda hora de mantenimiento para ambas temperaturas y a partir de ahí hay un crecimiento de grano constante y moderado hasta las 5 horas del tratamiento térmico aplicado, en todos los tiempos de mantenimiento se puede observar que tienen pendiente positiva por lo tanto se puede definir que hubo crecimiento de grano constante para todos los casos estudiados.

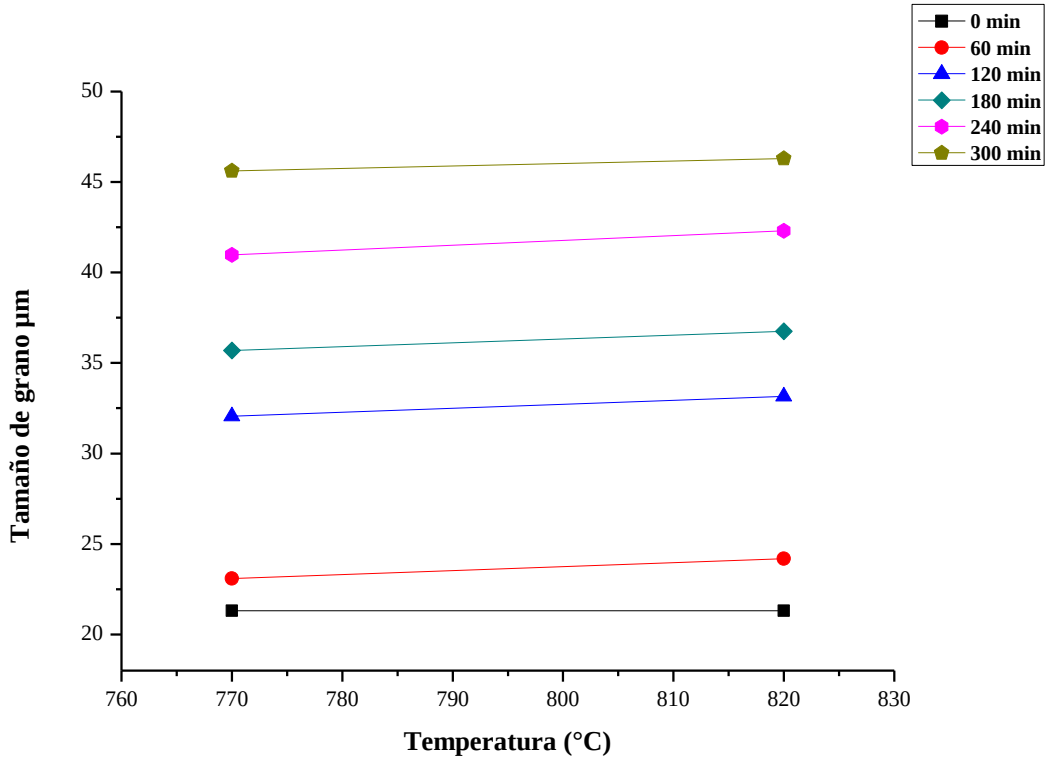

Ilustración 11. Tamaño de grano austenitico a diferentes temperaturas.

En la Ilustración 12 el tamaño de grano tiene un incremento considerable al finalizar el tratamiento térmico para ambas temperaturas, aproximadamente hubo un aumento de 24 µm para cada caso. Esto comprueba que la temperatura y el tiempo de mantenimiento juegan un papel importante en la velocidad de crecimiento de grano austenitico, generando un crecimiento en el 100% del valor inicial del grano al aplicar 5 horas de tratamiento de forma isotérmica (temperatura constante) en este caso para un acero 1020 certificado.

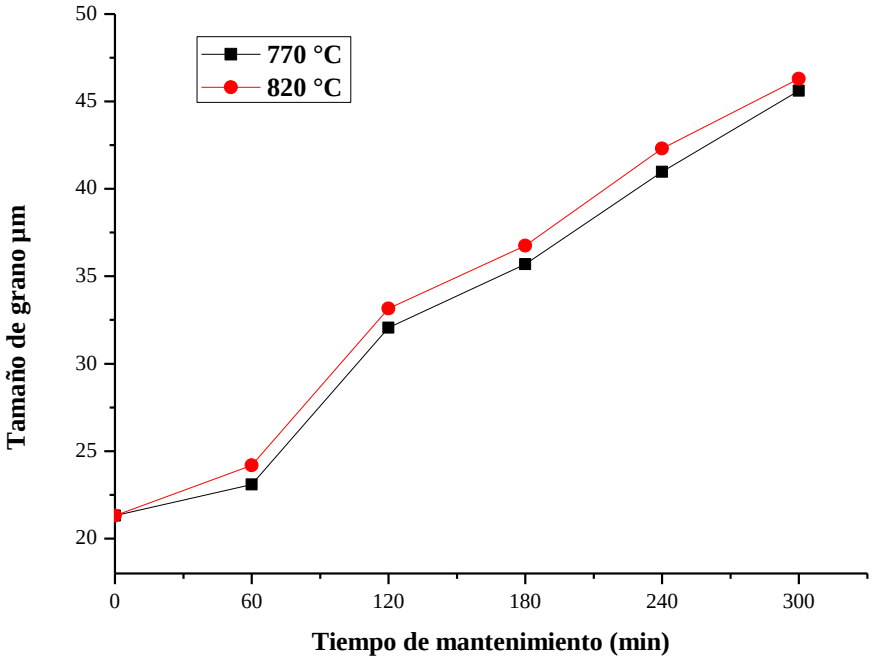

Ilustración 12. Tamaño de grano austenitico a diferentes tiempos de mantenimiento.

Por lo tanto, se puede definir que desde la primera hora de mantenimiento a 770 y 820 °C se encuentra un aumento en el tamaño de grano de forma gradual con mayor tiempo de mantenimiento aplicado.

A continuación, se encontrarán los datos correspondientes a las mediciones de microdurezas realizadas antes y después del tratamiento térmico para cada una de las probetas tablas 5 y 6.

Microdurezas sin tratamiento en vickers [HV]	
Perlita	Ferrita
212	153
220	167
228	193
237	195

Tabla 5. Microdurezas sin tratamiento en vickers.

	Microdurezas a 770 °C en vickers [HV]		Microdurezas a 820 °C en vickers [HV]	
	Martensita	Ferrita	Martensita	Ferrita
60 min	279	210	263	212
	275	216	289	238
	257	229	309	263
	263	235	352	289
120 min	288	220	254	210
	290	232	271	214
	252	217	275	219
	275	245	281	235
180 min	265	221	260	234
	270	228	272	239
	274	237	277	246
	308	243	293	258
240 min	227	178	236	195
	229	188	241	202
	233	191	252	220
	268	206	273	233
300 min	251	145	212	174
	267	175	222	194
	269	186	226	202
	279	187	228	205

Tabla 6. Microdurezas de las fases martensita y ferrita a 770 y 820 °C

Como se puede observar los valores de microdurezas que se tienen luego del tratamiento térmico tienden a disminuir conforme aumenta el tiempo de mantenimiento en el horno y por consiguiente con el aumento en el tamaño de grano, en ambas fases ocurre lo mismo, pero es más notorio en la fase ferritica. La disminución más alta se presenta en la fase ferritica con un valor de 145 HV y para la fase de martensita 212 HV, aunque los cambios de los valores no son tan grandes, si se puede deducir que el aumento del tamaño de grano afecta negativamente esta propiedad.

El aumento en el tamaño de grano afecta negativamente los valores de dureza, por lo tanto, se puede establecer que los granos gruesos disminuyen propiedades como la dureza en los aceros y por esta razón es más recomendable tener tamaños de grano pequeños los cuales nos garantizan mayor cantidad de límites de grano para obtener valores más altos de dureza.

8. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CRECIMIENTO DE GRANO AUSTENITÍCO

Al observar el análisis anterior se determinó que la temperatura y el tiempo de mantenimiento son dos factores influyentes en el crecimiento de grano para el acero 1020 por lo tanto se plantea un modelo que pueda predecir el incremento en el tamaño de grano teniendo en cuenta estos dos factores, como el siguiente:

$$d_t^n - d_0^n = At \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \qquad \text{(Ec. 11)}$$

Donde:

- d_t [µm] es el tamaño de grano promedio, luego del tiempo de mantenimiento y la temperatura aplicada en el tratamiento térmico.
- d_0 [µm] es el tamaño de grano inicial
- n es el índice de tamaño del crecimiento de grano
- t [s] el tiempo de mantenimiento
- T [K] es la temperatura aplicada
- R el gas molar constante con un valor de 8,314 [J/mol K]
- Q [J/mol] la energía de activación de crecimiento de grano
- A [µm/s] es un parámetro experimental de ajuste

Del cual se deriva el modelo final que determina el tamaño de grano:

$$d_t = \sqrt[n]{d_0^n + At \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \qquad \text{(Ec. 12)}$$

Para este modelo hay 3 parámetros desconocidos (n, A y Q) que se analizaran a continuación.

8.1. INDICE DE TAMAÑO DEL CRECIMIENTO DE GRANO (n)

Es un valor según la norma ASTM E112 denominado *G* que define la velocidad de crecimiento de grano en los materiales metálicos y aleaciones, los métodos utilizados para la determinación del tamaño de grano promedio en materiales metálicos son principalmente procedimientos de medición debido a su base puramente geométrica, son independientes del metal o aleación en cuestión con base en el uso de fotográficas metalográficas a diferentes aumentos. Se utilizan varios métodos para la estimación del tamaño de grano promedio con el que se definen tablas como la siguiente:

E112 – 10

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
	No./in.^{2} at 100X	No./mm^2 at 1X	mm^2	µm^2	mm	µm	mm	µm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Ilustración 13. Indicé del tamaño de crecimiento de grano en relación al tamaño promedio del grano.

Teniendo en cuenta las medias obtenidas de los datos experimentales tabla 7 se puede definir aproximadamente los valores de *n* que se ajustan a las medidas experimentales tomadas con el uso de la tabla generada por la norma E112 en la ilustración 13, lo que arroja diferentes valores de *n* como (6, 6.5, 7 y 7.5); por lo tanto, el parámetro de ajuste A puede ser hallado para diferentes valores de n lo cual se explicara más adelante.

	Media Tamaño de grano [µm] 770 °C	Media Tamaño de grano [µm] 820 °C
0 [min]	21,3147	21,3147
60 [min]	23,0953	24,1893
120 [min]	32,0580	33,1640
180 [min]	35,6907	36,7527
240 [min]	40,9793	42,3120
300 [min]	45,6100	46,3040

Tabla 7. Medias tamaño de grano en µm valor experimental a 770-820 °C con diferentes tiempos de mantenimiento.

8.2. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (*Q*)

Según Bernhard (Christian Bernhard, 2008) la relación existente que tiene la energía de activación y la composición química en los metales, más que esto el contenido equivalente de carbono en los aceros puede predecir que energía de activación se presenta en los bordes de los granos al momento de aumentar su tamaño y cambiar de fase por lo

tanto con el respectivo análisis es posible obtener un valor para Q que pueda ser utilizado en el modelo de crecimiento de grano plateado anteriormente.

El caculo del contenido de carbono equivalente está definido por la siguiente expresión (Christian Bernhard, 2008):

$$C_p = masa\ pct\ C - 0{,}14 * masa\ pct\ Si + 0{,}04 * masa\ pct\ Mn \qquad \text{(Ec. 13)}$$

En función de la composición química del acero 1020 es posible obtener el valor para el contenido de carbono equivalente de Cp = 0,19806 y posterior a esto utilizar la ecuación establecida por el análisis realizado en el trabajo de Bernhard, que establece una relación directa entre el contenido de carbono equivalente en un acero y la energía de activación en la ecuación siguiente:

$$Q_{app} = 167.686 + 40.562 * (mass\ pct\ C_p) \qquad \text{(Ec. 14)}$$

Obteniendo de esta forma un valor para la energía de activación en un acero 1020 con la composición química suministrada anteriormente de 175.719,7097 [J/mol] con un porcentaje de carbono de 0,197.

8.3. PARAMETRO DE AJUSTE (*A*)

Como se mencionó anteriormente el valor de A es un parámetro de ajuste para el modelo planteado en la ecuación 11, dependiente del valor de n que se utilice. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la variable faltante para el modelo es A esta puede ser obtenida de la ecuación 9 a diferentes valores de n y las medias tomatadas de los datos experimentales en la tabla 3, despejando de la ecuación 11 se tiene:

$$A = \frac{d_t^n - d_0^n}{t * \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \qquad \text{(Ec. 15)}$$

De esta manera es posible obtener el valor de A para cada temperatura y diferentes tiempos de mantenimiento, de igual forma es necesario tener una media de este parámetro para 770-820 °C puesto que se manejaron 5 tiempos de mantenimiento diferentes y el valor del parámetro se debe definir como uno solo para cada temperatura analizada.

		Media de A [µm/s]	
		770 °C	820 °C
Valores de n	5,0	5.742.881.366.141	3.182.234.590.556
	5,5	34.110.079.078.097	18.671.434.806.496
	6,0	204.216.392.492.553	110.395.324.708.186
	6,5	1.234.099.281.130.570	659.016.584.804.408
	7,0	7.532.856.158.690.080	3.976.963.591.322.320
	7,5	46.448.658.378.195.800	24.275.767.515.017.200
	8,0	289.238.113.312.315.000	149.890.279.399.428.000
	8,5	1.817.767.466.974.880.000	935.772.325.180.979.000

Tabla 8. Medias parámetro A para diferentes valores de n.

Con el valor de *A* establecido para diferentes valores de *n* es posible definir el modelo matemático ecuación 12 para calcular el tamaño de grano a diferentes tiempos de mantenimiento y valores de *n*, y de esta forma poder corroborar los resultados de la función de crecimiento de grano contra los datos experimentales tomados, como se muestra en la tabla 9 y 10.

	770 °C								
	Valor experimental	Valor de tamaño de grano calculado por el modelo a diferentes valores de n							
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
60 min	23,095	22,283	22,418	22,584	22,786	23,028	23,314	23,645	24,019
120 min	32,058	37,074	36,812	36,661	36,599	36,607	36,672	36,780	36,919
180 min	35,691	40,036	39,509	39,140	38,894	38,748	38,679	38,671	38,709
240 min	40,979	42,316	41,567	41,017	40,623	40,352	40,177	40,076	40,034
300 min	45,610	44,189	43,248	42,543	42,022	41,645	41,380	41,203	41,094

Tabla 9. Valores de tamaño de grano obtenidos por el modelo a diferentes valores de n para 770 °C.

	820 °C								
	Valor experimental	Valor de tamaño de grano calculado por el modelo a diferentes valores de n							
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
60 min	24,1893	22,627	22,783	22,970	23,195	23,461	23,771	24,125	24,520
120 min	33,1640	39,510	38,949	38,549	38,278	38,114	38,035	38,025	38,069
180 min	36,7527	42,717	41,836	41,178	40,695	40,353	40,124	39,985	39,917
240 min	42,3120	45,176	44,034	43,166	42,512	42,029	41,681	41,441	41,286
300 min	46,3040	47,194	45,826	44,780	43,982	43,380	42,933	42,608	42,380

Tabla 10. Valores de tamaño de grano obtenidos por el modelo a diferentes valores de n para 820 °C.

Por lo tanto, el modelo de crecimiento de grano se puede obtener bajo diferentes valores asignados de *n*. Sin embargo, surge la inquietud sobre qué valor de *n* nos proporciona el mejor ajuste en el modelo matemático de crecimiento de grano.

Por esta razón se introduce la función de error $ferror(n) = \sum_i^8 (d_i - d)^2$ (Raghunathan & Sheppard, 1989) para determinar la relación entre el error de suma cuadrada y *n*, donde d_i es calculado por el modelo de crecimiento de grano a diferentes valores de *n* y *d* es el valor experimental del tamaño de grano en micras a la temperatura y tiempo de mantenimiento correspondientes. En la ilustración 14 y 15 se muestra la relación entre el error de suma cuadrada (*n*) y la variación de *n* a 770 y 820 °C.

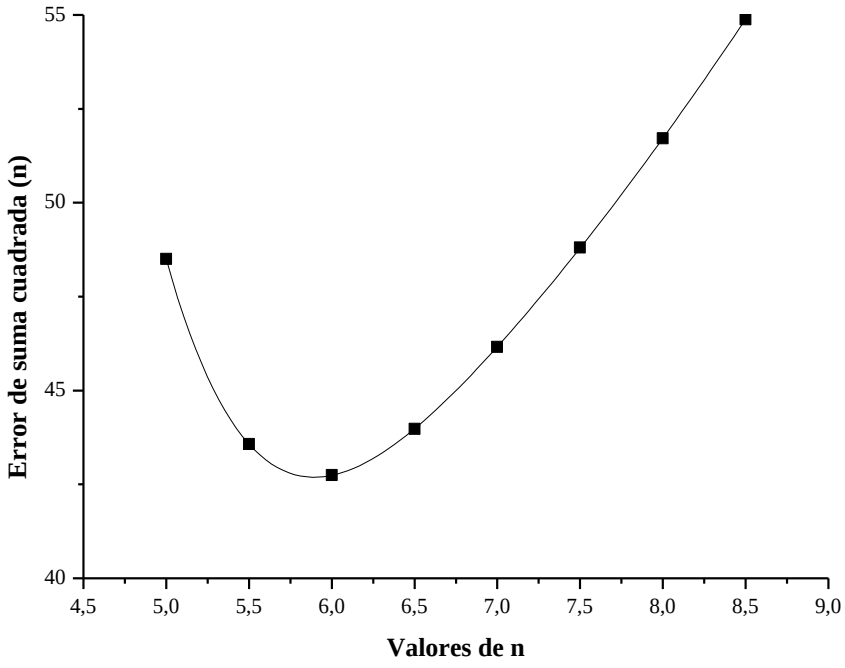

Ilustración 14. Relación entre el Error de suma cuadrada (n) y los diferentes valores de n para 770 °C.

Se usaron las ilustraciones 14 y 15 para graficar el error de suma cuadrada dado por la función de error anteriormente analizada y diferentes valores de *n* con el fin de establecer qué valor de *n* nos arroja el mínimo error de suma cuadrada con respecto a los tamaños de grano obtenidos por el modelo matemático planteado a 770 y 820 °C respectivamente.

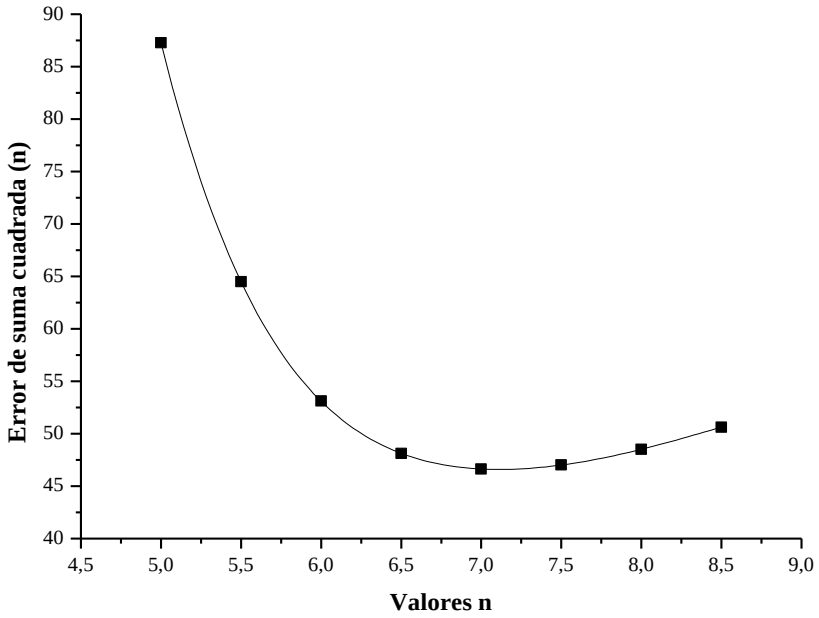

Ilustración 15.Relación entre el Error de suma cuadrada (n) y los diferentes valores de n para 820 °C.

Utilizando un polinomio de grado 5 que se ajuste a los datos de las ilustraciones 14 y 15, se obtiene el valor de *n* con el que se tiene el mínimo $ferror(n)$ donde se optimizaría el modelo. Según los datos de las ilustraciones se obtienen los siguientes polinomios de ajuste ecuación 16 y 17 respectivamente.

$$ferror(n) = 1942{,}429 - 1241{,}458\, n + 323{,}0872\, n^2 - 42{,}01773\, n^3 + 2{,}73866\, n^4 - 0{,}07145\, n^5$$

(Ec. 16)

$$ferror(n) = 4556{,}11833 - 2818{,}31079\, n + 711{,}30499\, n^2 - 90{,}63824\, n^3 + 5{,}82533\, n^4 - 0{,}15071\, n^5$$

(Ec. 17)

Por lo tanto, los valores *n* de optimización con los que se obtiene el mínimo error suma cuadrada (*n*) respectivamente para 770 y 820 °C son 5,88384 y 7,12121. Se define nuevamente el parámetro *A* para estos dos valores de *n* como se muestra en la tabla 11 a continuación.

Media de *A* [µm/s]	
770 °C con *n* = 5,88384	820 °C con *n* = 7,12121
134.643.383.195.648	6.159.446.483.915.940

Tabla 11. Medias parámetro A definidas con los valores de n que generan el mínimo error de suma cuadrada.

Teniendo definidas todas las variables desconocidas se procede a describir el modelo matemático de crecimiento de grano austenitico en este caso para las dos temperaturas analizadas 770 y 820 °C respectivamente como sigue:

$$d_t = \sqrt[5{,}88384]{d_0^{5{,}88384} + 134.643.383.195.648 * t \exp\left(-\frac{175.719{,}7097}{R * 1043{,}15}\right)}$$

(Ec.18)

$$d_t = \sqrt[7{,}12121]{d_0^{7{,}12121} + 6.159.446.483.915.940 * t \exp\left(-\frac{175.719{,}7097}{R * 1093{,}15}\right)}$$

(Ec. 19)

Definido el modelo matemático para ambas temperaturas se obtienen los siguientes resultados utilizando las ecuaciones 18 y 19, y se realiza la comparación con los datos experimentales tablas 12 y 13.

	Media experimental Tamaño de grano [µm] a 770 °C	Valor obtenido del modelo de tamaño de grano [µm] a 770 °C
0 min	21,315	21,315
60 min	23,095	22,542
120 min	32,058	36,688
180 min	35,691	39,213
240 min	40,979	41,130
300 min	45,610	42,689

Tabla 12. Tamaño de grano medio experimental vs tamaño de grano obtenido por el modelo a 770 °C y diferentes tiempos de mantenimiento.

	Media experimental Tamaño de grano [µm] a 820 °C	Valor obtenido del modelo de tamaño de grano [µm] a 820 °C
0 min	21,315	21,315
60 min	24,189	23,532
120 min	33,164	38,087
180 min	36,753	40,288
240 min	42,312	41,934
300 min	46,304	43,259

Tabla 13. Tamaño de grano medio experimental vs tamaño de grano obtenido por el modelo a 820 °C y diferentes tiempos de mantenimiento.

Las ilustraciones 16 y 17 muestran las comparaciones entre los valores experimentales y los valores de tamaño de grano obtenidos por el modelo matemático. Gráficamente ambas ilustraciones presentan el mismo patrón de crecimiento de grano a diferentes temperaturas y varios tiempos de mantenimiento, inicialmente el ajuste para los primeros 60 min tiene una transición suave y luego a los 120 min es el punto donde se genera el mayor error de ajuste por parte del modelo matemático seguido nuevamente de una transición más suave conforme aumenta el tiempo de mantenimiento hasta los 240 min donde se presenta nuevamente una transición suave como en la primera hora.

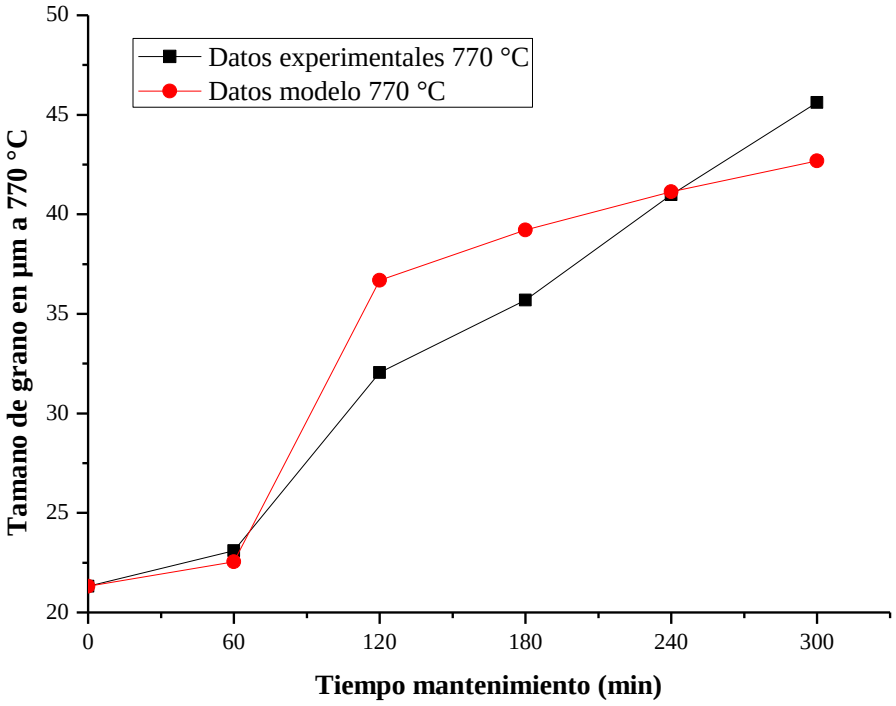

Ilustración 16. Valores experimentales vs valores obtenidos por el modelo matemático a 770 °C y diferentes tiempos de mantenimiento.

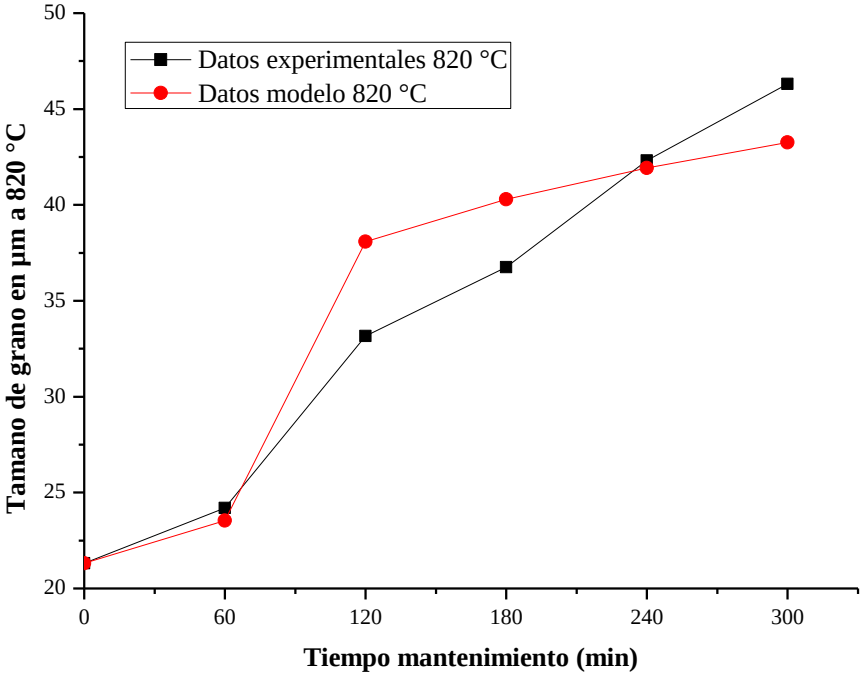

Ilustración 17.Valores experimentales vs valores obtenidos por el modelo matemático a 820 °C y diferentes tiempos de mantenimiento.

Teniendo en cuenta las ilustraciones 16 y 17 se puede observar que el modelo se ajusta a los datos experimentales tomados, con un error relativo que se calculara a continuación. Pero a simple vista se puede definir que es un modelo confiable para predecir el tamaño de grano austenitico en un acero SAE 1020.

8.4. ERROR ABSOLUTO Y REALITVO DEL MODELO

De acuerdo a los objetivos específicos planteados se realiza el cálculo del error relativo para el modelo matemático obtenido en ambas temperaturas 770 y 820 °C respectivamente, con el fin de establecer el grado de error del modelo y la confiabilidad que se puede tener en el mismo para predecir el tamaño de grano.

Con el uso de las ecuaciones 20 y 21 se obtienen los valores de error absoluto y relativo con base en los datos de las tablas 12 y 13.

$$E_a = |valor\ real - valor\ obtenido| \qquad \text{(Ec. 20)}$$

$$E_r = \frac{|valor\ real - valor\ obtenido|}{valor\ real} * 100 \qquad \text{(Ec. 21)}$$

Para obtener los siguientes valores de error para cada temperatura y tiempo de mantenimiento mostrados en las tablas 14 y 15 a continuación:

	770 °C	
	Ea [µm]	Er %
60 min	0,55	2,39
120 min	4,63	14,44
180 min	3,52	9,87
240 min	0,15	0,37
300 min	2,92	6,40
Media	2,36	6,70

Tabla 14. Error absoluto y relativo de datos experimentales vs datos calculados por el modelo a 770 °C.

	820 °C	
	Ea [µm]	Er %
60 min	0,66	2,72
120 min	4,92	14,85
180 min	3,54	9,62
240 min	0,38	0,89
300 min	3,05	6,58
Media	2,51	6,93

Tabla 15.Error absoluto y relativo de datos experimentales vs datos calculados por el modelo a 820 °C.

En promedio el error relativo es del 6,70 y 6,93 % respectivamente para ambos modelos planteados lo que sugiere que son fiables. Sin embargo, para ambos casos se observa que el mayor error relativo y absoluto se presenta a los 120 min de mantenimiento y los valores mínimos a los 240 min.

9. CONCLUSIONES

- Basándonos en los resultados obtenidos en las medidas del tamaño de grano, luego del tratamiento térmico realizado en la región intercrítica se corrobora que hay un crecimiento considerable, generando un aumento en el 100% del valor inicial del grano al aplicar 5 horas de tratamiento térmico en el tamaño de grano austenitico conforme aumenta el tiempo de mantenimiento en un proceso isotérmico como el que se realizó.

- Los factores determinantes en el crecimiento de grano fueron la temperatura y el tiempo de mantenimiento, sin embargo, la mayor influencia la da el aumento del tiempo de mantenimiento, ya que el proceso fue isotérmico y se puede definir que para este caso analizado el tiempo de mantenimiento inclina la balanza hacia un crecimiento de grano austenitico más que la misma temperatura.

- El análisis en la dureza que se realizó confirmo que el aumento del tamaño de grano afecta negativamente el valor de la dureza, más cuando el tiempo de mantenimiento se incrementa.

- Los dos modelos matemáticos obtenidos para 770 y 820 °C, respectivamente logran predecir el tamaño de grano austenitico de forma confiable y con un error relativo de tan solo 6,70 y 6,93 %, lo que nos permite conocer los tamaños de grano en estudios futuros para analizar la influencia que pueda tener en las propiedades mecánicas del material.

10. BIBLIOGRAFÍA

Anelli, E. (1992). Application of Trolled Cooling Mathematical of Wire Rods Modelling and Bars. 440-449.

ASTM. (n.d.). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Designation E 407-99, 11.

BAKER, N. G. (1998). Austenite Grain Growth Behaviour of Microalloyed Al-V-N and Al-V-Ti-N Steels. ISIJ International.

Beck, P., Holzworth, M., & Hu, H. (1948). Instantaneous Rates of Grain Growth. 526-527.

Christian Bernhard, J. R. (2008). A model for predicting the Austenite Grain Size at the surface of Continuously-Cast Slabs. The minerals, Metals and Materials Society.

DEBALAY CHAKRABARTI, C. D. (2008). Development of Bimodal Grain Structures in Nb-Containing. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International.

Dong, D., Chen, F., & Cui, Z. (2012). Modeling of Austenite Grain Growth During. ELSEVIER.

Fostein, N. (2015). Advanced High Strength Sheets Steels. Switzerland: Springer.

M.A. Martinez, J. O. (2005). Influencia del tamaño de grano en las propiedades mecanicas de los aceros inoxidables austeniticos. Revista de metalurgia.

Raghunathan, N., & Sheppard, T. (1989). Microstructural Development During Annealing of Hot Rolled. 542-549.

Ronald E. Walpole, R. H. (1999). Probabilidad y Estadistica para Ingenieros. Mexico: Pearson.

Turnbull, D. (1951). Theory of Grain Boundary Migration Rates. 661-668.

Whiteman, C. M. (1979). Recrystallization and grain growth in hot rolling .

Yaowen, X., Tang, D., Yong, S., & Pan, X. (2011). Prediction Model for the austenite grain growth in a hot rolled dual phase steel. ELSEVIER.