

UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA FORMATO DE
PROYECTOS DE GRADO

Nº DE RADICACIÓN: _____

INFORMACIÓN EJECUTORES

Ejecutor 1

Nombre (s):	ANDRES	
Apellido (s):	PEREZ GAMBOA	
Código:	20112375016	
E-mail:	aperezgam@gmail.com	
Teléfono fijo:	(57 +1) 4500157	
Celular:	(57) 3144170197	

INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Título del Proyecto:	Modelamiento matemático para establecer las transformaciones de fase para un acero AISI 1045 templado desde temperaturas intercríticas	
Duración (estimada):	6 meses	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	
	Prestación y Servicios Tecnológicos	
	Otro	X
Modalidad del Trabajo de Grado:		
Línea de Investigación de la Facultad*:	Optimización de procesos industriales	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Materiales y procesos de manufactura	
Grupo de Investigación:		
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:		

INFORMACIÓN PASANTÍA

Nombre de la empresa:	
Dirección:	
Teléfonos:	
Correo electrónico:	
Página Web:	

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Director: (Vo. Bo.)	
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)	
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)	

CONTENIDO

	PÁG.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	5
1.1 ESTADO DEL ARTE.	8
1.2 JUSTIFICACIÓN.	19
2. OBJETIVOS.	20
2.1 Objetivo general.	20
2.2 Objetivos específicos.	20
3. MARCO TEÓRICO.	21
3.1 Material.	21
3.2 Temple.	21
3.3 Dureza.	22
3.4 Tratamiento térmico y diagrama TTT.	22
3.5 Modelos matemáticos y ecuaciones.	24
3.5.1 Ecuación de Hollomon.	24
3.5.2 Ecuación de Yuan.	25
3.6 Transferencia de calor.	26
4. METODOLOGIA.	26
4.1 Investigación exhaustiva.	26
4.1.1 Revisión y acopio de métodos para el análisis de datos.	26
4.2 Aplicación de la norma ASTM E 562.	27
4.2.1 Prueba de dureza.	27
4.3 Análisis experimentales.	27
4.3.1 Análisis estadístico.	27
4.3.2 Análisis de coherencia.	27
4.4 Implementación del análisis regresional.	27
4.4.1 Análisis regresional en MATLAB.	28
4.5 Formulación del modelo matemático.	28

<i>4.6 Validación del modelo</i>	28
<i>4.6.1 Validación experimental</i>	28
<i>4.2.3 Análisis por elementos finitos</i>	28
5 CRONOGRAMA.	29
6 PRESUPUESTO.	29
7 BIBLIOGRAFIA.	30

INDICE DE FIGURAS

	PÁG
<i>Fig.1. Variación de fracción volumétrica en función de temperaturas intercríticas.</i>	10
<i>Fig.2. Curva esfuerzo-deformación, a. acero convencional b. acero de fase dual.</i>	11
<i>Fig.3. Microestructuras, a. acero convencional b. acero de fase dual.</i>	12
<i>Fig. 4 Grafica esfuerzo- deformación a diferentes fracciones volumétricas de martensita, a. 3.6Vm b. 46.8Vm c.70.6Vm.</i>	14
<i>Fig.5 Variación de la elongación uniforme y elongación total de reducción (TEL) y energía de fractura con fracciones volumétricas de martensita.</i>	16
<i>Fig.6. Tratamiento térmico intercrítico.</i>	22
<i>Fig.7. Diagrama TTT</i>	23
<i>Fig.8 .Diagrama esfuerzo-deformación para una fracción volumétrica de martensita mayor a 50%</i>	25
<i>Fig.9 Cronograma de actividades</i>	29

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla.1. Composición química del acero AISI 1045.</i>	21
<i>Tabla.2. Presupuesto</i>	29

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial la producción de aceros de doble fase se ha convertido en el estándar de fabricación en los últimos años, debido a la necesidad de diseñar partes (de automóviles principalmente) más livianas, con una alta resistencia y buena formabilidad¹, por lo cual se ha convertido en un reto para los investigadores, dentro de los desafíos de la ingeniería a investigar está el poder encontrar un método no convencional como la regla de la palanca para poder determinar las cantidades de fase, ya que estas no corresponden a las cantidades reales, siendo esta la única herramienta matemática por medio de la cual se determinan cuantitativamente las cantidades de fase presentes en determinado acero, las cuales a su vez sirven para determinar la dureza final del mismo.

Actualmente, uno de los campos en el cual se están desarrollando considerables avances es en el estudio de la microestructura generada a partir del tratamiento térmico intercrítico (procedimiento por el cual se obtienen aceros de fase dual) y su relación con las propiedades mecánicas obtenidas

Hacia el año 2008 equilibrar la elevada calidad de los productos con la factibilidad de su fabricación era uno de los desafíos de la industria siderúrgica (Informe de sustentabilidad de la Industria Siderúrgica Mundial World Steel Association, 2008).

Los materiales pertenecientes a la familia de los HSLA (High Strength Low Alloys, o también llamados aceros fase dual) han sido ampliamente demandados en los últimos años debido al creciente interés en reducir el peso de los componentes mecánicos sin comprometer su resistencia mecánica; en esta categoría se encuentran los aceros Dual Phase (DP), cuya microestructura, consistente en ferrita y martensita y eventualmente bainita, lo cual les confiere una alta razón entre el esfuerzo máximo a la tracción y el límite de fluencia (UTS/YS).²

Aproximadamente el 85% de aceros avanzados, esto es, aceros con alta resistencia y buena ductilidad llamados AHSS (Advanced High Strength Steels), son fabricados para partes de vehículos con el objetivo de reducir hasta un 25% en peso en comparación con los modelos comunes (S. Sodjit, 2012). Los aceros de fase dual (DP steels) son

¹ La formabilidad puede definirse como una medida de la cantidad de deformación que un material puede experimentar en un proceso de formado sin que falle, tal como adelgazamiento localizado o fractura. Gedney R, Adv. Mater. Process. 2002; Pag 33-36.

² Producción en laboratorio de acero dual phase laminado en caliente, para la fabricación de cilindros de gas licuado, Artigas, Colás, Toledo, Barra, Pizarro, Carvajal, Monsalve, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Diciembre 2012.

aceros de tipo AHSS (Aceros avanzados de alta resistencia), este tipo de acero es de relevancia para la industria siderúrgica, porque satisfacen los requerimientos de una alta resistencia y buena deformación, propiedades que son debidas a la microestructura característica de los aceros de tipo fase dual. Para poder controlar las propiedades de los aceros, es necesario realizar estudios metalográficos en los que se analiza la microestructura en cuanto a características morfológicas, las cuales muestran la distribución de las fases y, también, en cuanto a las cantidades de fase para, posteriormente, relacionar estos análisis con las propiedades mecánicas finales en el acero.

La mayoría de los aceros pueden ser tratados térmicamente para mejorar sus propiedades, incluyendo los aceros de medio contenido en carbono como el AISI 1045, cuya demanda es alta debido a su bajo costo y aplicabilidad, sin embargo, su uso está limitado por sus propiedades mecánicas, es decir, para aplicaciones donde se requiere una alta resistencia a la indentación (dureza) y mayor resistencia a la tensión se debe prescindir de su uso. Los aceros de medio contenido de carbono, como el AISI 1045, son usados para aplicaciones tales como piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches³. Lo anterior implica que para un acero como el AISI 1045, se da la necesidad de establecer cantidades de fase óptimas de ferrita y martensita, tratándolo térmicamente para convertir su estructura en la de un acero DP, obteniendo, así, un desempeño máximo con la menor cantidad de material posible. Para obtener estas cantidades de fase es necesaria la manipulación de las temperaturas intercríticas en un tratamiento térmico, por lo que la temperatura intercrítica es la variable de entrada para la obtención de la microestructura deseada, y su efecto es el encargado de activar los mecanismos para que ocurran las transformaciones de fase.

En Colombia debe hacerse uso de la norma internacional ASTM 562 para la determinación de estas cantidades de fase de modo experimental para cualquier acero tratado térmicamente en la zona intercrítica. (Icontec, 2013)

Por lo anteriormente mencionado hasta acá, surge como necesidad de investigación dentro de la universidad Distrital Francisco José de Caldas, en el marco de desarrollo de sus Semilleros de Investigación, en especial su Semillero de Investigación de materiales de Ingeniería el plantearnos la pregunta: ¿Cómo determinar las transformaciones de fase en un acero AISI 1045 templado desde temperaturas intercríticas, de forma rápida y económica?

³ AISI 1045, <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>

Para intentar dar solución a la pregunta ¿Cómo determinar las transformaciones de fase en un acero AISI 1045 templado desde temperaturas intercríticas, de forma rápida y económica?, se plantea la posibilidad de implementar un modelo matemático que relacione la temperatura de tratamiento térmico intercrítico con la relación de transformación de fase obtenida en el acero AISI 1045 luego de ser templado desde estas temperaturas, para así evitar realizar pruebas y procedimientos metalográficos de forma repetitiva, los cuales resultan costosos y demorados.

1.1 ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial, existen algunas investigaciones entre las cuales se cuentan la realizada en Irán hacia el 2009, la cual, se basa fundamentalmente en el efecto que se produce sobre las propiedades mecánicas a tensión de los aceros del tipo DP tratados desde temperaturas intercríticas, según sus variaciones en fracciones volumétricas de martensita y ferrita⁴. Otro de los temas abordados es el del comportamiento mecánico a la fricción y la corrosión en aceros de baja aleación de carbono del tipo DP, el cual fue publicado por el Instituto de Tecnología en Roorkee, en India en el 2010, en este proyecto se buscaba determinar la incidencia en la fracción volumétrica de ferrita-martensita frente a la corrosión⁵.

Se han conseguido resultados importantes frente al tema de la predicción del comportamiento esfuerzo-deformación en aceros de fase dual, este estudio reciente es realizado por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad King Mongkut's de Tailandia hacia el 2012, en el que por medio de micrografías y análisis de elementos finitos en la microestructura se pretende determinar la curva esfuerzo-deformación para aceros de fase dual sometidos a endurecimiento por deformación⁶.

Respecto a la importancia de los aceros de fase dual, las investigaciones anteriormente mencionadas llegan al mismo punto: los aceros de fase dual son un tipo especial de aceros caracterizados por poseer una microestructura que consiste en una matriz de ferrita con islas, ya sea de martensita o de perlita, las cuales son obtenidas por medio del tratamiento térmico intercrítico y se determinan, de acuerdo a su fracción volumétrica y forma de distribución en la matriz, las propiedades mecánicas finales del acero. Igualmente se coincide en que la fase de ferrita es la que principalmente concede la ductilidad y puede aumentar la resistencia última a la tensión (UTS), en contraste con la fase de martensita, cuya fracción volumétrica es proporcional a la

⁴ The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets, P. Movahed, S. Kolahgar, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari, N. Parvin, University of Technology, Tehran, Iran, 2009.

⁵ Mechanical and corrosion behavior of plain low carbon dual-phase steels, Lakshmana Rao Bhagavathi, G.P. Chaudhari, S.K. Nath, Indian Institute of Technology, Roorkee, India, 2010.

⁶ Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels, Sawitree Sodjit, Vitoon Uthaisangsuk, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University Technology Thonburi, Bangkok Tailandia, 2012.

dureza y que con fracciones volumétricas superiores al 50% reduce la ductilidad, por lo cual los comportamientos de la microestructura, en cuanto a cantidad y forma de la fase, no son de fácil predicción, ya que dependen de múltiples variables y del efecto que provoca una fase sobre la otra, por ejemplo, la recristalización temprana de la ferrita hace que la austenita se distribuya a lo largo de la matriz ferrítica y no en forma de nódulos o bandas como sucedería si se consigue la recristalización incompleta de la ferrita con altas tasas de transmisión de calor. También se indica una relación proporcional de la temperatura intercrítica con la fracción volumétrica de martensita, lo que quiere decir que al realizar el tratamiento con temperaturas intercríticas más elevadas, se consigue la transformación de mayor cantidad de austenita en martensita y, en cuanto al proceso de formación de la austenita se reconocen tres etapas por varios de los autores, entre los cuales se cuenta K. Palaniradja (2010), quien plantea dentro de sus investigaciones la formación de la austenita en muestras de acero con 1.5% en peso de Mn (manganeso) y 0.06 a 0.2% en peso de carbono y se tienen las siguientes etapas:

1. (1) rápido crecimiento de la austenita dentro de la perlita hasta disolverla completamente,
2. (2) crecimiento lento de la austenita entre la ferrita, debido a la difusión del carbono en la austenita,
3. (3) un balance muy lento de la austenita y la ferrita controlado por la difusión del manganeso en la austenita.

Al tratar con el tema directamente del modelamiento matemático existe un sistema integrado para simular el campo electromagnético generado durante el proceso de calentamiento que sirve para determinar las fracciones volumétricas de martensita y otros micro-constituyentes, pero tiene la limitación de ser muy complicado, debido a que se posee el modelo matemático, y otros, se debe hacer un análisis de la interacción de la curva de continuo enfriamiento con el diagrama TTT⁷, para lograr obtener las fracciones volumétricas de los constituyentes, y cabe recordar que la curva de enfriamiento continuo es difícil de obtener, porque no es fácil reproducir las condiciones exactas de laboratorio con este fin.

Movahed dentro de sus investigaciones encontro que la fracción volumétrica de la martensita incrementa al incrementar la temperatura de tratamiento térmico intercrítico, la cual hace que se disminuya el contenido de carbono presente en la fase de martensita también, de acuerdo con la regla de las mezclas, y a modo de deducción se encuentra que los aceros de fase dual con las mismas cantidades de fases de ferrita

⁷ Diagrama tiempo-temperatura- transformación que relaciona estas variables dentro del proceso tratamiento térmico en el acero

y martensita, presentan las propiedades mecánicas óptimas, en términos de resistencia última a la tensión (UTS), ductilidad y energía de fractura. La resistencia a la tensión, la deformación y la energía de fractura se incrementan con la fracción volumétrica de martensita V_m , teniendo un pico cuando la fracción V_m es alrededor del 50%, al igual también se analizó el comportamiento de endurecimiento por trabajo y se evidenció una doble etapa los contenidos de martensita superiores al 50%.

La siguiente gráfica muestra la relación entre la fracción volumétrica de martensita y las temperaturas intercríticas de tratamiento:

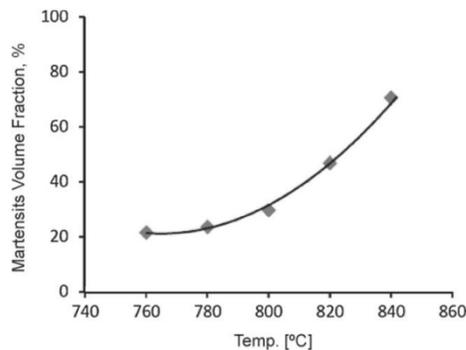


Fig.1. Variación de fracción volumétrica en función de temperaturas intercríticas⁸.

Algunos efectos se encontraron en la distribución espacial y la morfología de la fase austenítica debido a las tasas de calentamiento. Fundamentalmente, la tasa de calentamiento afecta la nucleación y el crecimiento de la austenita para el caso cold rolled low-carbon (laminado en frío de bajo carbono). La interacción entre la recristalización de la ferrita y la formación de la austenita es fuerte, y no sólo afecta la cinética de la formación de la austenita sino también la distribución espacial y la morfología de la austenita. La morfología de la micro estructura final es de particular interés, ya que la distribución altamente anisotrópica, es producida siempre con altas tasas de calentamiento en materiales laminados en frío, por lo cual entonces se espera que afecte significativamente las propiedades mecánicas finales del material⁹.

Son fundamentales las pruebas experimentales en las investigaciones realizadas, por ejemplo la realizada en la Universidad de Navarra, en Gipuzkoa, España, titulada

⁸ Imagen tomada de <http://www.scielo.br/img/revistas/si/v16n2/a09fig01.jpg>.

⁹ Heat Treatment of Cold- Rolled low carbon Si-Mn Dual phase Steels, L J Juan, SHI Wen, HUANG Qun-fei, LI Lin, Material Science and Engineer College, Universidad de Shanghai, Shanghai China, 2010.

estudio de la contribución de las fases a las propiedades mecánicas en aceros con estructuras mixtas, realizada por R. Rodríguez e I. Gutiérrez.

Estas pruebas experimentales se utilizan para poder comparar y analizar con evidencias el comportamiento, tanto microestructural, como mecánico en el acero, luego, en los diferentes enfoques de las investigaciones se utilizaron ensayos de tensión, pruebas de dureza, análisis metalográficos y especialmente tratamientos térmicos de recocido en hornos de aislamiento con su respectivo temple. La mayoría de los procedimientos se estructuraron de la siguiente manera:

1. Determinación de la composición para hallar las temperaturas intercríticas,
2. Seguimiento de pruebas metalográficas del acero sin tratar térmicamente,
3. Medición de V_m por medio de la norma ASTM E562, después de realizar la examinación microscópica,
4. Pruebas de dureza en la máquina de ensayos para dureza Rockwell C u otra escala de dureza,
5. Ensayos de tensión con 50mm de sección calibrada en la probeta de 200mm de longitud total, con 20mm de ancho en la sección de agarre y 12.5mm en la sección reducida, aplicado en máquina para ensayos de tensión INSTRON a una tasa de deformación de 10mm/min a temperatura ambiente de acuerdo con la norma ASTM E8M. Por último se realiza el tratamiento térmico intercrítico y se practican todos los ensayos experimentales anteriormente mencionados, para luego comparar los resultados y concluir al respecto.

Para tener mayor claridad frente al tema de los aceros de fase dual respecto a los aceros convencionales, a continuación se presentan las curvas de esfuerzo deformación a modo de comparación, primero la curva convencional para un acero no tratado y luego las curvas características de tres aceros de fase dual:

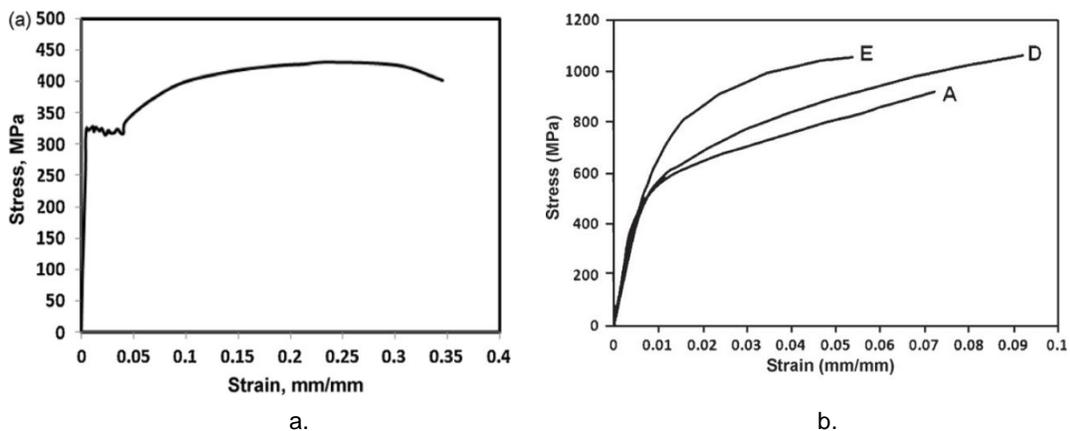


Fig.2. Curva esfuerzo-deformación, a. acero convencional b. acero de fase dual¹⁰.

¹⁰ Imagen tomada de <http://www.scielo.br/img/revistas/si/v16n2/a09fig01.jpg>.

En estas curvas obtenidas a partir de ensayos de tensión se evidencia el comportamiento continuo de fluencia en los aceros DP y el comportamiento irregular característico de un acero no tratado térmicamente, e igualmente las diferencias de las resistencias últimas a la tensión obtenidas en los dos tipos de aceros.

A continuación se muestra las microestructuras de un acero no tratado térmicamente y un acero sometido a tratamiento térmico intercrítico :

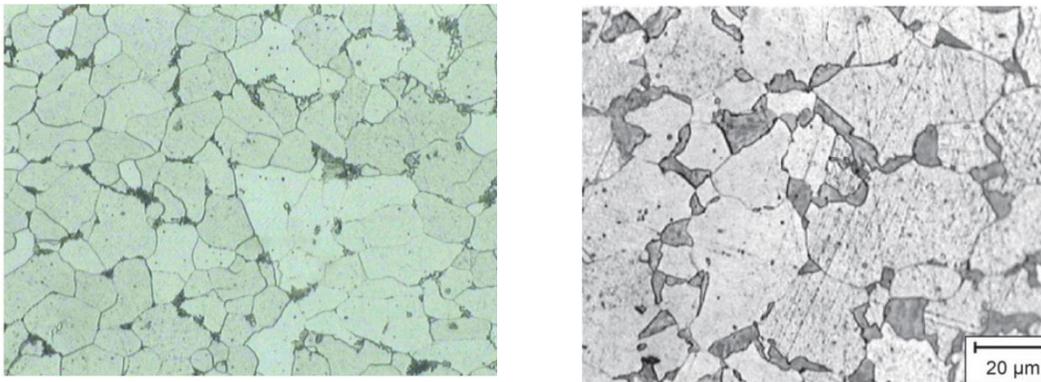


Fig. 3 Microestructuras, a. acero convencional b. acero de fase dual¹¹.

Se puede ver en la figura 3 a la derecha las fracciones volumétricas de martensita (parte oscura) embebidas en la matriz de ferrita.

La mayoría de las investigaciones mencionadas previamente utilizaron pruebas experimentales combinadas con ecuaciones reconocidas y generalmente aceptadas por el campo académico, como lo son la ecuación de Jiankun Yuan y la ecuación de Hollomon, La ecuación de Hollomon también se define como el lugar geométrico de todos los valores posibles que puede alcanzar el límite de fluencia de un metal mediante deformación plástica¹². Las cuales permiten relacionar las variables de un proceso que el investigador quiere analizar, con las variables de un proceso anterior o posterior que guardan interdependencia. Por ejemplo en el caso de la dependencia o relación que hay entre la V_m (fracción volumétrica de martensita) y las variables de entrada en un tratamiento térmico específico como: la velocidad de escaneo, la potencia por unidad superficial requerida y la velocidad del flujo de enfriamiento, entonces, a partir de una ecuación para la V_m como la ecuación de Jiankun Yuan (2003) se procede a relacionar los datos experimentales obtenidos con la ecuación anterior. Uno de estos métodos de

¹¹ Imagen tomada de <http://www.scielo.br/img/revistas/si/v16n2/a09fig01.jpg>.

¹² Material Properties and Manufacturing Processes, Datsko J. New York (EE.UU.): John Wiley & Sons, 1991.

investigación se realizó de la siguiente manera:

- 1) Separación en dos grupos las muestras de análisis según el contenido de carbono, G1 con contenido en carbono de 0.35% y G2 con un contenido de C entre 45 y 55%.
- 2) Establecimiento de las condiciones de operación, en este caso, niveles alto, medio y bajo, en las variables energía potencial (KW/ln^2), velocidad de escaneo (m/min), tasa de flujo del temple (Litros/min).
- 3) Aplicación de las pruebas de dureza en escala HRA
- 4) Relacionamiento de las variables del proceso con su correspondiente dureza y aplicación de un análisis de regresión, utilizando MATLAB
- 5) Establecimiento de las ecuaciones para cada tipo de acero, en función de las variables del proceso.
- 6) Utilización del modelo matemático de Jiankun Yuan como paso intermedio para relacionar las variables del proceso con la dureza y el porcentaje de martensita.
- 7) Validación del modelo, comparación con los resultados experimentales. De acuerdo con la ecuación de Koistinen se hallan las V_m (experimentales), se comparan con las V_m teóricas a partir del modelo desarrollado y para las durezas se procede análogamente.
- 8) Tabulación y comparación de los resultados teóricos hallados por medio del modelo desarrollado.
- 9) Porcentajes de error y conclusiones de la investigación.

Otra de las investigaciones hizo uso de la ecuación de Hollomon para relacionar el trabajo de endurecimiento con la deformación unitaria del material, es decir, el comportamiento de fluencia. Esta investigación fue realizada en Dezful, Irán y titulada “the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets” (2009)

Ahora bien, el uso de esta ecuación se hace con el propósito de determinar las etapas de endurecimiento del material, por medio de datos de tensión y deformación, las cuales son indicadores de diferentes mecanismos de endurecimiento por deformación y conllevan a las siguientes proposiciones:

- 1) La primera etapa de endurecimiento por deformación puede estar relacionada con la deformación plástica de la ferrita
- 2) La segunda etapa puede estar relacionada con la deformación simultánea de las dos fases, ferrita y martensita.

La ecuación de Hollomon es la siguiente:

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Donde K y n son constantes y son generalmente llamadas: coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación respectivamente. Lo que se hace es graficar la curva esfuerzo-deformación en escala logarítmica y fijar una línea sobre los datos pertenecientes a esta curva, luego, la pendiente de esta línea recta es el exponente (n) y la sección transversal de la línea calculada con $\varepsilon=0$ es el coeficiente de resistencia (K). Así:

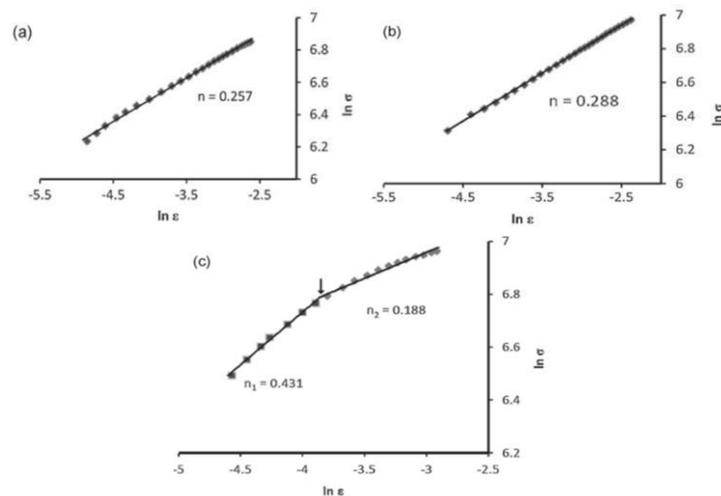


Fig. 4 Grafica esfuerzo- deformación a diferentes fracciones volumétricas de martensita, a. 3.6Vm b. 46.8Vm c.70.6Vm.¹³

La interpretación de estas constantes es la siguiente: el exponente de endurecimiento por deformación (n) es un buen indicador de la capacidad del material a endurecerse por deformación, esto significa que entre más alto sea el valor de n, entonces mayor es la tasa o velocidad del material a endurecerse por deformación y este material es más apropiado para utilizar en aplicaciones que envuelvan o impliquen deformación plástica, donde también se evidenciaría un estiramiento del material mayor antes de que apareciesen cuellos de estricción.

Desde esta metodología, el análisis también permite relacionar las Vm (fracciones volumétricas de martensita) con respecto a las etapas de endurecimiento, entonces se indica que con $V_m < 50\%$ hay solo una etapa de endurecimiento, y con Vm

¹³ Grafica tomada del artículo "the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets" (2009)

superiores al 50%, y más específicamente 70.6% (porcentaje del experimento), el endurecimiento obedece a un mecanismo de dos etapas.

Más sin embargo investigaciones realizadas por el departamento de ingeniería de minas y metalurgia de la universidad de tecnología Amirkabir en Irán¹⁴, muestran que no hay una relación lineal entre la V_m y la (resistencia a la tensión).

Lo anterior se puede explicar con dos efectos contradictorios y que son el factor principal por el cual la V_m no es proporcional a la resistencia a la tensión:

- (i) El incremento en la V_m incrementa la resistencia a la tensión, debido al incremento en la fase más dura del acero.
- (ii) El contenido de carbono en la martensita disminuye al aumentar la V_m (fracción volumétrica de la misma martensita), y se sabe que el contenido de carbono es el constituyente en la martensita que le concede la propiedad de dureza¹⁵.

En aceros de alto contenido en martensita se evidencian las condiciones anteriores y por lo tanto se concluye, que altos incrementos en el contenido de martensita $V_m > 50\%$, generan disminución de la resistencia a la tensión debido a la disminución en el contenido de carbono de la fase de martensita y un incremento en el camino libre medio de la fase de ferrita¹⁶.

En el artículo titulado “the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets” (2009), se investigó, por un lado, como varía la ductilidad (en términos del porcentaje de elongación) con respecto al porcentaje de martensita y se encontró la relación representada en la siguiente gráfica:

¹⁴ Estas investigaciones fueron publicadas en un artículo titulado: “the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets” en el año 2009.

¹⁵ Dato obtenido en

<http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>

¹⁶ La teoría sobre el camino libre medio de la ferrita y la martensita para explicar el comportamiento a la tensión inusual en los aceros de fase dual con alto contenido en martensita ha sido desarrollado por A. Bag y K.K. Ray (2001)

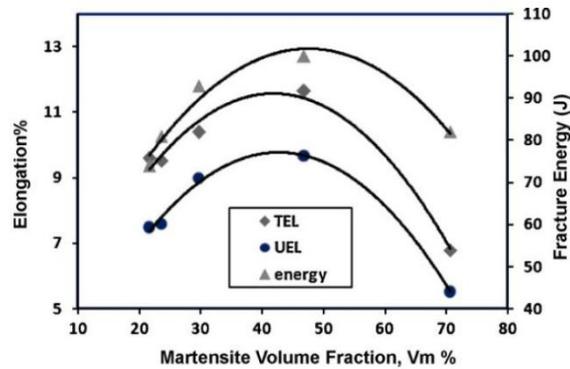


Fig.5 Variación de la elongación uniforme y elongación total de reducción (TEL) y energía de fractura con fracciones volumétricas de martensita.¹⁷

La cual al ser interpretada muestra que la ductilidad incrementa al incrementar el porcentaje de martensita, llegando a un valor máximo de 50% Vm, después de lo cual con valores superiores de Vm se empieza un proceso de decrecimiento en los valores de UEL y TEL.

G. Garmong, R.B. Thompson (1973) entre otros realizaron investigaciones donde muestran que UEL y TEL disminuyen cuando se aumenta el porcentaje de martensita Vm, mas sin embargo la mayoría de las investigaciones realizadas por G. Garmong, R.B. Thompson (1973), están de acuerdo con el comportamiento descrito por la gráfica anterior y el cual se explica de la siguiente manera para entender lo que sucede con $V_m > 50\%$:

- (i) El contenido de carbono afecta significativamente la ductilidad de la martensita, entonces como ya se ha dicho, al incrementar Vm el contenido de carbono en la fase de martensita disminuye y esto conlleva el incremento de la ductilidad en la misma, por ende se incrementa la ductilidad total en el acero de fase dual.
- (ii) T.S Byun y I.S. Kim (1993) analizaron los esfuerzos internos de rango largo resultante de la incompatibilidad plástica no relajada en aceros de fase dual, es decir los esfuerzos producidos entre fases en las fronteras a nivel microestructural, y sus resultados mostraron que el esfuerzo promedio con porcentajes de martensita cercanos al 50% es cero. Lo que contribuye a la deducción de que las mayores UEL'S y TEL'S se dan cuando Vm está alrededor del 50%.

¹⁷ Gráfica tomada del artículo "the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets" (2009)

Para resaltar se tiene la publicación realizada en España en el año 2011, titulada “Caracterización de aceros dual-phase obtenidos por laminación en caliente.Characterization of dual-phase steels obtained by hot-rolling”, realizada por A. Monsalve G, A. Artigas A, F. Castro C, R. Golas E Y. Houbaert, en la cual se tomaron muestras de acero al C-Mn-Si disponible en el mercado y mediante un proceso de laminación en caliente y bobinado, se obtuvo acero Dual Phase con microestructura y propiedades mecánicas dentro del rango teórico esperado de este material. El proceso termomecánico consistió en producir una fuerte reducción a temperaturas mayores a A_3 , mediante pasadas de laminación sucesivas, para posteriormente enfriar el acero durante aproximadamente 5 s, (a una velocidad de 20 °C/s) en el rango de equilibrio $\alpha+\gamma$. La temperatura A_3 , medida mediante calorimetría diferencial de barrido, fue de 890 °C. A continuación se realizó un temple en el rango de temperaturas de bobinado (550-675 °C), enfriando posteriormente las muestras de acuerdo a una curva pre establecida, que corresponde a la curva de enfriamiento real de una bobina. La caracterización microestructural de las muestras obtenidas, se realizó mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica. Adicionalmente se realizó una medición de texturas mediante difracción de rayos X, para el estudio de las orientaciones resultantes, producto de la variación de la temperatura de término de laminación (TTL) y la temperatura de bobinado (TB), determinándose cómo afectan estas variables a las distintas componentes de texturas. Se complementó la información microestructural con los valores de los índices de anisotropía normal y planar, medidos de acuerdo a la norma ASTM E-517. Se correlacionaron las intensidades de las componentes de texturas encontradas con los valores de los índices de anisotropía, encontrándose que sólo es posible producir leves mejoras en el índice de anisotropía normal, a través de una combinación apropiada de las temperaturas de término de laminación y de bobinado.

En Latinoamérica se han hecho algunas investigaciones en el tema de los aceros fase dual, entre las cuales se cuentan la realizada en la universidad de Santiago de Chile, en el año 2011, por Alfredo Artigas, Rafael Colás, Sebastian Toledo, Froilan Barra, Felipe Pizarro, Linton Carvajal y Alberto Monsalve, en la cual se obtuvo un acero Dual Phase mediante un proceso de laminación en caliente y bobinado, a partir de un acero al C-Mn-Si AWS 70S-6 producido por la Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH), el cual se usa para fabricar electrodos para la industria de la soldadura. Su microestructura consiste en martensita en una matriz ferrítica. Esta información fue complementada con ensayos de tracción y anisotropía. Se determinó que las condiciones óptimas para la obtención de la microestructura Dual Phase, a partir del acero inicial, están dadas por una temperatura de término de laminación seguida por un temple hasta el rango óptimo de temperaturas de bobinado (550 – 600 °C) y posterior

enfriamiento en el horno. Adicionalmente, se tomaron tres muestras del acero para someterlas a distintos tratamientos térmicos con el objetivo de obtener una estructura dual phase en la primera probeta; ferrita, bainita y perlita en la segunda, y perlita en una matriz ferrítica en la tercera. Posteriormente se procedió a soldar las probetas con un proceso de soldadura MIG. En todos los casos, las propiedades mecánicas de la zona afectada térmicamente no se diferenciaron grandemente de sus respectivos metales base. Se puede concluir que este acero fase dual cumple con los requerimientos mecánicos, de embutibilidad y de soldabilidad que se exigen en la norma Chilena NCh 214 de fabricación de cilindros de gas, y posee mayor resistencia que el acero A45 GL usado actualmente, por lo que se presenta como un material alternativo para la fabricación de cilindros más livianos.

Las investigaciones alrededor de los aceros de fase dual en cuanto a propiedades, microestructura, transformaciones de fase, tratamiento térmico intercrítico, comportamiento frente al endurecimiento inducido, y variables del tratamiento térmico intercrítico como tal, entre otros, han descrito y caracterizado cualitativamente el proceso en gran medida, pero en cuanto al planteamiento matemático las soluciones son pocas y las herramientas tecnológicas variadas, por tanto aun el tema debe estudiarse y definirse más precisamente en términos matemáticos aceptados a nivel global.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto es importante ya que en los últimos años, la búsqueda y aplicación de nuevos materiales avanzados ha estado en alta demanda por la industria automotriz. El concepto de desarrollo de partes para vehículos está ligado, por un lado a las expectativas de la demanda (los clientes) en cuanto a diseño, bajo consumo de combustible, seguridad y rendimiento; y por otro lado, a los requerimientos legales en cuanto a normas de choque, características de seguridad pasiva y bajas emisiones de CO₂.

Dentro del área de los materiales de ingeniería el acero 1045 es uno de los más utilizados para aplicaciones simples, como ejes, engranes, tornillos, entre otras, su contenido nominal de carbono está entre de 0.43% y 0.45% (medio carbono) y generalmente se le aplica un tratamiento térmico para obtener endurecimiento superficial. Con el desarrollo del proyecto se podría ampliar su rango de aplicaciones, ya que está limitado por el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, como la dureza, la ductilidad y la resistencia a la tensión. Los aceros de fase dual son un tipo de aceros muy importantes dentro de los aceros de alta resistencia-baja aleación (HSLA steels) que se pueden obtener por tratamiento térmico, cuya característica principal es la de poseer microestructuras donde coexisten dos fases, una fase denominada ferrita (matriz) y la otra martensita (refuerzo), proveyendo al acero propiedades mecánicas superiores con respecto a los aceros tratados térmicamente por métodos convencionales.

Dentro del ámbito académico el desarrollo del proyecto apoya la metodología planteada por la universidad Distrital Francisco José de Caldas, en el marco de desarrollo de sus Semilleros de Investigación, en especial su semillero de investigación de materiales de ingeniería.

Por eso, se hace tan importante desarrollar dicho modelo, el cual permitirá obtener resultados rápidos sin depender de pruebas o ensayos experimentales, que a su vez son costosos y demorados.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un modelo matemático para establecer las transformaciones de fase en un acero AISI 1045 templado desde temperaturas intercríticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Establecer una relación matemática de acuerdo a la norma ASTM E562 de la fracción volumétrica de martensita y ferrita en función de la temperatura intercrítica con los datos obtenidos del tratamiento térmico.

- Establecer el modelo de transformaciones de fase para el tratamiento seleccionado y generar una aplicación de software en el programa MATLAB, para así dar uso al modelo matemático desarrollado.

- Realizar pruebas experimentales de dureza y metalográficas para verificar el modelo planteado.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Material

Para realizar el modelo matemático que me permita determinar las transformaciones de fase del acero AISI 1045, se debe tener claro las características del material, el concepto de tratamiento térmico y su relación con la dureza.

El acero AISI 1045 está dentro del grupo de los aceros de media aleación, (debido a su porcentaje de carbono), es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada¹⁸, su composición química se puede observar en la Tabla.1.

%C	%Mn	%P	%S
0.43-0.5	0.60-0.90	0.04 máx.	0.05 máx.

Tabla.1. Composición química del acero AISI 1045.

Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria

3.2 Temple desde temperaturas intercríticas

Para mejorar la dureza de un acero, se utiliza un proceso llamado templado el cual se emplea por medio de un incremento de su temperatura y posterior enfriamiento a altas velocidades, como se muestra en la figura 6 donde también se puede visualizar los rangos de A_1 y A_3 los cuales nos indican las temperaturas intercríticas que a su vez se relacionan con la zona de austenización parcial ($\alpha+\gamma$) como se observa en el diagrama de fase, con el fin de generar una dureza mejorada ya que la presencia de martensita en su estructura cristalina es mayor.

¹⁸ Información obtenida en <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>, consultada el 27 de febrero de 2013

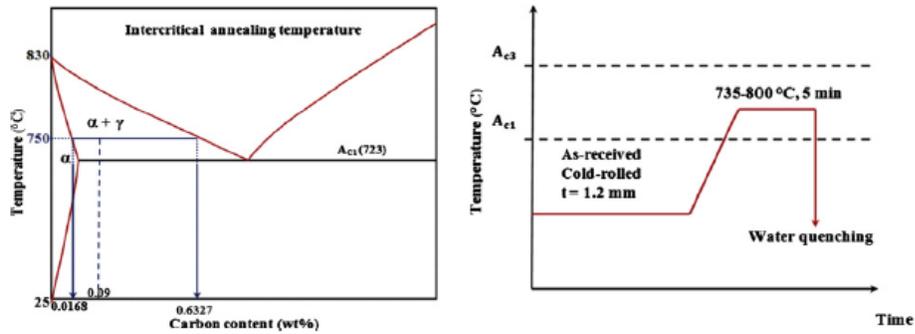


Fig.6. Tratamiento térmico intercrítico.¹⁹

3.3 Dureza

La dureza en el acero es la propiedad que me permite oponer todo tipo de penetración, abrasión y rayado en el material. La dureza se mide en diferentes escalas y cada una depende del método de medición, entre estas escalas las más conocidas son la dureza BRINELL, la cual emplea como punta una bola de acero templado o carburo de Wolframio, para materiales duros es poco exacta pero fácil de aplicar, a su vez es poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor.

Se encuentra también la dureza ROCKWELL que es utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. La dureza rockwell se clasifica en varias escalas (A, B, C,...) las cuales dependen directamente de las cargas aplicadas y el tipo de penetrador.

3.4 Tratamiento térmico y diagrama TTT.

En el tratamiento térmico es muy importante contar con los diagramas TTT (Transformación, Temperatura, Tiempo) los cuales me indican la formación de estructuras cristalinas a partir de una determinada temperatura y tiempo. Este diagrama también es conocido como diagrama de transformaciones isotérmicas donde se muestra el progreso de transformación de fases a través de una familia de curvas (figura.7).

¹⁹ Figura tomada del artículo Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase

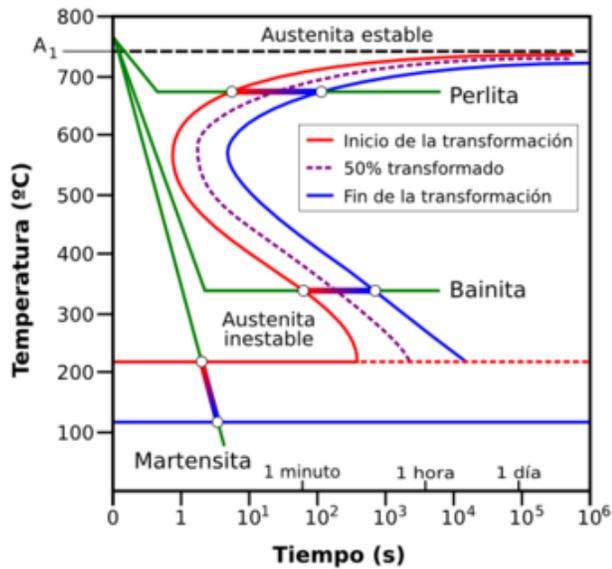


Fig.7. Diagrama TTT

Las curvas rojas y azules señalan el tiempo necesario para que, fijada una temperatura constante cualquiera (proceso isotermo), la austenita se transforme en otra fase.

Las líneas verdes se obtienen utilizando una serie de probetas de un determinado tipo de acero calentadas hasta que han alcanzado la temperatura superior a la de temperatura de austenización y mantenidas en esa temperatura el tiempo suficiente como para que toda la probeta se haya austenizado completamente.

A continuación se comienza a enfriar cada una de las probetas a distintas velocidades y se van observando los microconstituyentes que se van obteniendo.

Se forman líneas que corresponden con un enfriamiento lento. Como producto final se obtiene como una perlita de poca dureza (láminas gruesas).

También podemos observar que a medida que las velocidades de enfriamiento van aumentando se van obteniendo diferentes productos de microconstituyentes como:

- La trostita, la cual es una combinación de la cementita y ferrita. Esta se obtiene mediante un enfriamiento en la zona de 600 y 650 °C desarrollando así durezas entre los 250^a 400 Brinell.
- La bainita la cual es obtenida a partir de la austenita por medio de transformaciones isotérmicas está compuesta por una matriz ferrítica

Hay que tener en cuenta que para templar el acero, lo que se pretende es que toda la austenita se transforme en martensita. Es por ello que el enfriamiento ha de realizarse a una velocidad tal que no tengan tiempo de producirse los procesos difusivos de descomposición de la austenita en la región superior de temperaturas de enfriamientos rápidos. A la velocidad mínima de enfriamiento, para que se forme martensita a partir de la austenita se le denomina velocidad crítica de temple (V_C). Por lo tanto para templar un acero es necesario que se enfríe con una velocidad mayor que la crítica, de lo contrario se obtendrían productos perlíticos, principalmente troostita o bainita, lo que disminuirá la dureza del material tratado.

3.5 Modelos matemáticos y ecuaciones.

Un modelo matemático se define como una descripción desde el punto de vista de las matemáticas de un hecho o fenómeno del mundo real. El objetivo del modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno y tal vez predecir su comportamiento en el futuro. De tal manera se debe utilizar un modelo el cual me permita definir las transformaciones de fase del acero AISI 1045 a diferentes temperaturas intercríticas, para ello existen modelos lineales y no lineales.

Los modelos lineales son aquellos de forma $y = f(x) = mx + b$ donde m representa la pendiente de la recta y b la ordenada al origen (el punto en el que la recta interfecta al eje de las "y").

Los modelos no lineales como los polinomios y se representan a partir del grado del primer término Los polinomios de grado uno son de la forma: $P(x) = mx + b$, y son funciones lineales.

3.5.1 Ecuación de Hollomon

El comportamiento del flujo de la mayoría de las aleaciones y metales se puede describir por la ecuación de Hollomon siguiente Ecuacion.

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Dónde:

K = Coeficiente de fuerza

n = Exponente de endurecimiento por deformación.

Para la determinación de estos coeficientes es necesario desarrollar un gráfico tensión-deformación a escala logarítmica para el material en el cual se esté interesado, el exponente de endurecimiento (n) es la pendiente de esa línea y su sección transversal

está definida por $\varepsilon=1(\ln \varepsilon=0)$ para el coeficiente de fuerza (K).

El exponente de endurecimiento (n) es quien me indica la templabilidad de trabajo, entre más alto sea este exponente mayor será la velocidad de endurecimiento del material lo cual implica una preferencia para los procesos de deformaciones plásticas, a su vez el aumento de este exponente influirá directamente en las deformaciones presentadas antes de la estricción del material.

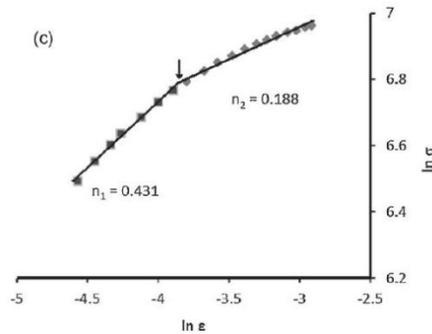


Fig.8 .Diagrama esfuerzo-deformación para una fracción volumétrica de martensita mayor a 50%

Para los ejemplos mostrados en la figura 9 se obtiene que los aceros de fase dual con fracciones volumétricas de martensita menores del 50%, son lineales.

3.5.2 Ecuación de Yuan

Para la determinación de fracciones volumétricas de martensita por endurecimiento inducido en los materiales, se ha establecido un modelo matemático por Yuan et (2003) a través de un trabajo de investigación mediante FEM con el fin de simular el campo electromagnético del endurecimiento inducido en el proceso de calentamiento de la austenita y procesos de temple. Este modelo a su vez cuenta con una restricción debido a la relación que tiene con el análisis de las curvas de enfriamiento de los materiales y su difícil obtención por el endurecimiento inducido.

$$HRC = afm^2 + bfm^2 + c$$

Donde a, b y c son constantes que dependen exclusivamente del contenido de carbón en los aceros. Para los aceros endurecidos por inducción normalmente

cuentan con una dureza entre 56 a 65 HRC y con fracciones volumétricas de martensita que oscilan entre 0,9 y 1.

3.6 Transferencia de calor

La transferencia de calor en procesos térmicos como lo son los tratamientos térmicos influye directamente en la formación de estructuras del acero a tratar, ya que depende de la forma como se conduzca el calor y la variación de dichas temperaturas en el tratamiento térmico.

$$\rho cT = \nabla \cdot (\nabla \lambda T) + Q$$

Donde:

ρ = Densidad

c = Calor específico

λ = Conductividad térmica

Q = Fuente interna de calor debido al calor latente.

4. METODOLOGIA

La Investigación propuesta es de tipo cuantitativo y experimental, debido a que se parte de un problema con objetivos claramente definidos, y para lograrlos se depende de resultados experimentales.

4.1 Investigación exhaustiva

Ya se ha realizado una investigación preliminar que permitió delimitar el tema del problema detectado, pero es necesario investigar a fondo los modelos matemáticos desarrollados para los aceros de fase dual, lo cual involucra la revisión metodológica y analítica que conduzca a la deducción o deducciones utilizadas por el investigador para llegar a determinar ese modelo matemático.

4.1.1 Revisión y acopio de métodos para el análisis de datos

Se trata de comparar los métodos matemáticos y otras ayudas computacionales, normalmente utilizados para las investigaciones realizadas en aceros de fase dual, con métodos matemáticos existentes que cumplan la misma función.

4.2 Aplicación de la norma ASTM E 562

Para la recolección de los datos experimentales se aplica esta norma, la cual por medio del método de conteo de puntos en un campo discreto lleva a la determinación, de forma sistemático-manual, de las cantidades de la fase martensita con respecto al total de la fase dual.

4.2.1 Pruebas de durezas y metalográficas

Se deben realizar las pruebas de dureza para las condiciones de temperatura intercrítica impuesta a cada una de las muestras, las cuales deben ser por lo menos cinco. El instrumento utilizado es un durómetro INNOVATEST Nexus 7000 series.

4.3 Análisis de datos experimentales

Con los datos de durezas, temperaturas y fracciones volumétricas del tratamiento térmico intercrítico del acero AISI 1045, se procede a relacionar las variables en una gráfica que permita analizar el comportamiento de las V_m con la temperatura y análogamente el comportamiento de la dureza.

4.3.1 Análisis estadístico

Con el fin de dar mayor confiabilidad sobre los datos obtenidos se aplican análisis de varianza por medio de alguno de los métodos estadísticos, como el método “t student” o el método “ X^2 -test” (prueba X^2).

4.3.2 Análisis de coherencia

En los tratamientos térmicos intercríticos ya se han evidenciado resultados característicos del comportamiento a nivel microestructural del acero, por lo cual se deben tener en cuenta estos resultados junto con el análisis anterior y el conocimiento de las variables que pueden afectar los resultados, para discriminar aquellos que representen un error de procedimiento.

4.4 Implementación del análisis regresional

Con este tipo de análisis se pretende correlacionar las variables de entrada del tratamiento térmico intercrítico (temperaturas intercríticas) con las fracciones volumétricas de martensita y con las durezas, se hace uso de los análisis estadísticos previos y de un coeficiente de correlación que determina el comportamiento de las variables dureza y fracción V_m de martensita en las líneas de regresión.

4.4.1 Análisis regresional en MATLAB

Con los datos obtenidos de las pruebas de dureza se realiza un análisis regresional en Matlab en el cual se obtienen los coeficientes de correlación entre variables.

4.5 Formulación e implementación del modelo matemático

A partir del análisis regresional en MATLAB se halla la ecuación de regresión para el acero AISI 1045, luego se procede a relacionar esta ecuación con otras como la ecuación de Jiankun Yuan, que describen matemáticamente y de forma parcial parte del proceso de tratamiento térmico intercrítico, para finalmente plantear el modelo definitivo.

4.6 Validación del modelo

4.6.1 Validación experimental

Con las variables de entrada del proceso, se comparan los resultados obtenidos experimentalmente para la dureza con los datos teóricos esperados, que se hallan a partir del modelo matemático planteado. Además se utiliza la función que relaciona las temperaturas intercríticas con las fracciones volumétricas de martensita, obtenida anteriormente relacionando los datos experimentales, luego de lo cual se hace uso de la ecuación de Jiankun Yuan (haciendo análisis del diagrama TTT y la curva de enfriamiento continuo) para comparar los resultados de durezas con los obtenidos a partir del modelo matemático desarrollado para el acero AISI 1045.

4.6.2 Análisis por elementos finitos

Simulando el proceso de transferencia de calor en ANSYS se pueden analizar los cambios estructurales por medio de la generación de los diagramas de fase y el diagrama TTT, los cuales sirven como soporte para validar el modelo.

5 CRONOGRAMA

El presente proyecto se realizara basándose en la siguiente distribución de actividades:

FASE	ACTIVIDAD	DURACIÓN (semanas)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
INVESTIGATIVA	Investigación exhaustiva	■	■	■	■																
EXPERIMENTAL	Aplicación de la norma ASTM E 562				■	■	■														
	Análisis de datos experimentales							■	■	■											
FORMULACIÓN	Implementación del análisis regresional										■	■	■								
	Formulación del modelo matemático													■	■	■	■				
EVALUACIÓN	Validación del modelo																			■	■

Fig.9 Cronograma de actividades

6 PRESUPUESTO

El costo total del proyecto se estima teniendo en cuenta valores máximos en las pruebas, materiales y programas utilizados.

Tabla (2) Presupuestos totales

Costo asociado a materiales:	\$200.000
Costo asociado a pruebas (Dureza, micrografías, otros)	\$300.000
Costos de papelería	\$ 100.000
Otros costos	\$ 50.000

Presupuesto total estimado
\$ 650.000

*No se especifican los costos asociados a licencias de software como ANSYS y MATLAB, de \$ 14'000 000 y \$ 2'000 000 aproximadamente, porque se hará uso de las licencias académicas en la instalaciones de la universidad.

Bibliografía

- [1] Artigas, Colás, Toledo, Barra, Pizarro, Carvajal, Monsalve, Producción en laboratorio de acero dual phase laminado en caliente, para la fabricación de cilindros de gas licuado, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Diciembre 2012.
- [2] SAMPERE López José Carlos, Zinalco: Una Visión Económica de la Vinculación y la Innovación, Octubre de 2001.
- [3] Demir. B, E. M. The hardenability of austenite with different alloy content and dispersion in dualphase. journal of materials processing technology , 75–84, (2008).
- [4] Gedney R, Adv. Mater. Process. 2002; Pag. 33-36.
- [5] <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>.
- [6] P. Movahed, S. Kolahgar, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari , N. Parvin, The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets, University of Technology, Tehran, Iran, 2009.
- [7] L J Juan, SHI Wen, HUANG Qun-fei, LI Lin, Heat Treatment of Cold-Rolled low carbon Si-Mn Dual phase Steels, Material Science and Engineer College, Universidad de Shanghai, Shanghai China, 2010.
- [8] <http://www.scielo.br/img/revistas/si/v16n2/a09fig01.jpg>.
- [9] the effect of intercritical heat treatment temperature on tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steels sheets” en el año 2009.
- [10] <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>, consultada el 27 de febrero de 2013
- [11] <http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>
- [12] Lakshmana Rao Bhagavathi, G.P. Chaudhari , S.K. Nath , Mechanical and corrosion behavior of plain low carbon dual-phase steels, Indian Institute of Technology, Roorkee, India, 2010.

[13] Sawitree Sodjit, Vitoon Uthaisangsuk, Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University Technology Thonburi, , Bangkok Thailand, 2012.

[14] Datsko J. New York, Material Properties and Manufacturing Processes, EE.UU. John Wiley & Sons, 1991.