



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



# DISEÑO DE UN PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SELECCIÓN DE LAS SERIES EN EL TREFILADO DE ACEROS AL CARBONO.

Masias B. Veronica M.  
Pinto P. Alejandra V.

Naguanagua, 05 de Noviembre de 2009.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



# DISEÑO DE UN PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SELECCIÓN DE LAS SERIES EN EL TREFILADO DE ACEROS AL CARBONO.

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo  
para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**

*Ing. Sandra Cabello.*

**Autores:**

Masias B. Veronica M.

Pinto P. Alejandra V.

Naguanagua, 05 de Noviembre de 2009.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“DISEÑO DE UN PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SELECCIÓN DE LAS SERIES EN EL TREFILADO DE ACEROS AL CARBONO”**, presentada por los bachilleres: **Masias Biffi, Veronica María y Pinto Pernía Alejandra Vanessa**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **16.290.880** y **17.181.484**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

*Ing. Sandra Cabello.*

*Tutor Académico.*

---

*Ing. Argel Porrello*

*Miembro del jurado*

---

*Ing. Luis Sidorovas*

*Miembro del jurado*

En Naguanagua a los 05 días del mes de Noviembre de 2009.

# *Índice general*

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1            El Problema</b>	<b>3</b>
1.1 Situación problemática	5
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Justificación	7
1.4 Alcance	8
1.5 Limitaciones	8
1.6 Antecedentes	9
<b>CAPÍTULO 2            Marco Teórico</b>	<b>13</b>
2. Bases teóricas	15
2.1 Proceso de trefilado	15
2.2 Descripción de un dado típico	16
2.3 Variables que influyen en el proceso de trefilado	18
2.3.1 Grado de reducción en trefilado	18
2.3.2 Ángulo de la trefila	20
2.3.3 Fricción	21
2.3.4 Lubricantes usados	23

2.3.5	Enfriamiento adecuado de los dados	25
2.3.6	Velocidad de trefilado	26
2.4	Preparación del material para el proceso de trefilado	26
2.4.1	Tratamiento térmico de recocido	26
2.4.2	Limpieza del material	28
2.4.3	Afilado del material	28
2.5	Causas de roturas de alambres trefilados	29
2.6	Determinación de la fuerza de trefilado	30
2.6.1	Modelo de Schey (1987)	30
2.6.2	Modelo basado en análisis de fuerzas en estado estacionario (Sachs)	31
2.7	Programación Visual Basic	33
2.7.1	Variables	34
2.7.2	Programación modular	35
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Marco Metodológico</b>	<b>37</b>
3.1	Tipo de investigación	39
3.2	Diseño del proyecto de investigación	39
3.3	Recolección de información	40
3.4	Tipo de muestreo	41
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	44
3.6	Equipos e instrumentos utilizados	45
3.7	Procedimiento experimental	48
3.7.1	Material utilizado	48
3.7.2	Composición química	48
3.7.3	Ensayo de tracción	49
3.7.4	Análisis microscópico	54
3.7.5	Ensayo de microdureza	56
3.8	Parámetros obtenidos de los ensayos	57
3.9	Especificaciones del programa elaborado	58
3.10	Realización del algoritmo del programa	60
3.11	Aplicación del programa a un caso práctico	61
3.12	Flujograma metodológico	65

<b>CAPITULO 4</b>	<b>Resultados</b>	<b>69</b>
4.1	Ensayos de tracción	69
4.1.1	Valores de n y k para el cálculo de esfuerzo	75
4.2	Análisis microscópico	78
4.3	Ensayos de microdureza	83
4.4	Programa para la selección de las series en el trefilado	84
4.4.1	Datos de entrada de la serie	84
4.4.2	Resultados o datos de salida del programa	85
4.4.3	Imagen y cuadro informativo	86
4.4.4	Botones de operaciones	87
4.4.5	Módulo del programa	88
4.5	Comparación de resultados	89
<b>CAPITULO 5</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>95</b>
<b>CAPITULO 6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>103</b>
<b>CAPITULO 7</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>107</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>111</b>
	<b>Apéndice A</b>	<b>117</b>
	<b>Apéndice B</b>	<b>133</b>
	<b>Apéndice C</b>	<b>163</b>

# *Índice de tablas*

2.1 Ángulo del cono de reducción de los dados de trefilado según los materiales a deformar.	17
3.1 Muestras por tipo de acero para los ensayos de tracción.	41
3.2 Muestras por tipo de acero para los ensayos de microdureza y análisis microscópico.	42
3.3. Porcentaje de carbono de los aceros a estudiar e intervalos establecidos por tipo de acero.	49
4.1 Resultados de ensayos de tracción de los diferentes tipos de aceros al carbono.	74
4.2 Valores de $\sigma_0$ , n y k.	76
4.3 Resultados de los ensayos de microdureza. Muestras transversales y longitudinales.	83
4.4 Resultados de la serie proporcionada por la empresa trefiladora	90
4.5 Resultados de la serie obtenida por el programa diseñado	91

# *Índice de figuras*

2.1 Esquema del proceso de trefilado.	15
2.2 Secciones de una hilera típica.	17
2.3 Proceso de trefilado con varias reducciones sucesivas.	18
2.4 Representación del efecto de fricción.	22
2.5 Refrigeración de los dados en el proceso de trefilado.	25
2.6 Fuerzas actuantes en el proceso de trefilado.	31
3.1 Organización de las muestras en las baquelitas para los ensayos de microdureza y análisis microscópicos.	43
3.2 Maquina GALDABINI.	45
3.3 Embutidora Buehler.	45
3.4 Desbastadora Gruesa BG30.	46
3.5 Desbastadora Fina DS 20.	46
3.6 Pulidora GP 25.	47
3.7 Microdurometro Buehler.	47

3.8 Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman.	53
3.9 Ilustración de los datos de entrada introducidos en el programa diseñado	63
3.10 Ilustración de la serie arrojada por el programa.	64
4.1 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1006.	69
4.2 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1008.	70
4.3 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1023.	70
4.4 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1035.	71
4.5 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1060.	71
4.6 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1065.	72
4.7 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1075.	72
4.8 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Para los aceros estudiados.	73
4.9 Gráfico $\sigma_o$ vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	76
4.10 Gráfico factor n vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	77
4.11 Gráfico factor k vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	77
4.12 Microestructura longitudinal. Acero 1006 en centro. (200X).	79
4.13 Microestructura longitudinal Acero 1006 en borde. (200X).	79
4.14 Microestructura transversal. Acero 1006 en centro. (200X).	80

4.15 Microestructura transversal. Acero 1006 en borde. (200X).	80
4.16 Microestructura longitudinal. Acero 1075 en centro. (200X).	81
4.17 Microestructura longitudinal. Acero 1075 en borde. (200X).	81
4.18 Microestructura transversal. Acero 1075 en centro. (200X).	82
4.19 Microestructura transversal. Acero 1075 en borde. (200X).	82
4.20 Datos de entrada de la serie.	85
4.21 Resultados proporcionados por el programa.	86
4.22 Imagen y cuadro informativo antes de realizar la corrida.	87
4.23 Ejemplo de imagen y cuadro informativo con los datos proporcionados por el programa.	87
4.24 Botones de operaciones del programa.	87
4.25 Modulo del programa. Declaración de variables.	88
4.26 Modulo del programa. Programación Modular.	89
4.27 Gráficas de diámetro inicial vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	92
4.28 Gráficas de diámetro final vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	92
4.29 Gráficas de porcentaje de reducción vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	93
4.30 Gráficas de velocidad vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	93

# *Resumen*

---

---

En este trabajo se propone una herramienta para la selección de las series de trepila de aceros al carbono, la cual consiste en el diseño de un programa interactivo; para ello se realizó un estudio de los aceros 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 en condiciones de alambrón. Se determinaron las propiedades mecánicas de los mismos mediante ensayos de tracción, ensayos de microdureza y análisis microscópico. Estos resultados son almacenados para la alimentación del programa. Fue seleccionado Visual Basic como programa para la realización del algoritmo por su facilidad de manipulación además de ofrecer mayor seguridad frente a alteraciones accidentales de las líneas de comando.

Se determinó que para los aceros en condición de alambrón ensayados, las propiedades mecánicas de la resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia y microdureza aumentan con respecto al porcentaje de carbono presente en el material. El cambio microestructural en las muestras, es apreciable a medida que asciende el porcentaje de carbono. Por lo que se concluye, que para el intervalo de aceros ensayados, el porcentaje de carbono influye en las propiedades mecánicas, microdureza y en la microestructura del material. Al realizar una comparación de una serie proporcionada por el programa, con una suministrada por una empresa trepilarora, se observa una discrepancia la cual puede atribuirse a los modelos prácticos empleados por la industria.

# Introducción

---

Los procesos metalmecánicos relacionados con la deformación plástica de metales en frío han adquirido en los últimos años un apreciable desarrollo, que se manifiesta con la creación de nuevas industrias y crecimiento de las ya existentes, las cuales emplean estos procesos en la elaboración de una gran variedad de productos trabajados en frío y que son de uso muy frecuente en la actualidad.

El alambre de acero trefilado es un producto de gran interés industrial. Se emplea masivamente en las industrias pesqueras, automotriz y de construcción, entre otros. El proceso de trefilado con el que se obtienen estos alambres es una de las más antiguas operaciones de conformado de metales y consiste, esencialmente, en reducir la sección de una barra haciéndola pasar a través de una matriz por estirado en frío.

El conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales conduce al mejoramiento de los procesos y propiedades de los productos terminados mediante la deformación plástica, por lo que se ha seleccionado el proceso metalmecánico de trefilado de aceros como tema del presente trabajo, el cual será la base en la elaboración de un programa interactivo que facilitará a los operadores de máquinas trefiladoras realizar los cálculos para la selección de las series del acero al carbono al cual se le realizará el proceso de trefilado.

El programa se considera una herramienta de ayuda para el sector empresarial, ya que se fundamenta principalmente en la reducción del tiempo, costos y errores al momento de realizar los cálculos necesarios para obtener el producto final, determinando así un beneficio importante para la industria.

# CAPÍTULO 6

## Conclusiones

---

---

Se determinó que las propiedades mecánicas ( $S_u$ ,  $S_y$ ,  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ ), dependen principalmente del porcentaje de carbono al estudiar un material en condición de alambroón. Para mayores porcentajes de carbono, se obtienen menores valores de ductilidad, así como mayores valores de dureza y resistencia, además de ser un criterio de selección para controlar las velocidades al momento de trefilar debido a que mayor dureza y resistencia, menores valores de velocidad durante el proceso.

Para realizar el estudio del comportamiento de los materiales que son sometidos a elevadas deformaciones plásticas debido a la formación del cuello producido por el ensayo de tracción, es necesario realizar un método de corrección como el propuesto por Brighman para compensarlo y así obtener los valores de  $\sigma_f$  y  $\epsilon_f$ .

En el estudio de los parámetros  $n$  y  $k$ , se utilizó para modelar el comportamiento mecánico de los aceros las ecuaciones de Hollomon-Ludwik, verificando que el material estudiado presento un comportamiento elasto-plástico, corrigiendo así la discrepancia entre los valores calculados y los experimentales.

Los resultados obtenidos del análisis microscópico muestran que el porcentaje de carbono es un factor determinante del material. La importancia de este factor radica en la variación del tamaño de colonias perlíticas en una matriz ferrítica proeutectoide, lo cual a su vez, definen las propiedades de cada acero estudiado debido que al aumentar el porcentaje de carbono se incrementa la cementita presente en la perlita, y al ser la cementita más dura y frágil que la ferrita eutectoide se puede concluir que este comportamiento hace el material más duro, resistente y a su vez menos dúctil.

El tamaño del grano es un factor influyente en las propiedades mecánicas. Para mayores tamaños de granos se obtiene menor dureza, lo cual es consistente con la teoría de Hall Petch, ya que sus bordes restringen las dislocaciones evitando deslizamientos y aportando una dureza relativa.

Se seleccionó Visual Basic como programa para la realización del algoritmo para el diseño de la serie de trefilado en aceros al carbono, esto debido a que es una herramienta con menos probabilidades de ser alterada de manera accidental o intencional por los operadores que utilicen el software. Se consideró la facilidad y la interactividad con que funciona el programa a la hora de elegirlo.

La discrepancia encontrada entre los datos suministrados por la empresa trefiladora y los proporcionados por el programa son atribuidos a los modelos prácticos empleados por la industria, como la variación del porcentaje de reducción empleada por la empresa.

# CAPÍTULO 7

## Recomendaciones

---

---

Hacer uso de este programa diseñado para el cálculo de las series de trefilado, ya que es una herramienta de software factible que proporciona el resultado de una serie adecuada, evitando posibles errores humanos que se puedan producir en el cálculo de la misma.

Al calcular el número de pasadas de la serie, se recomienda variar el porcentaje de reducción en cada pasada, comenzando con el máximo porcentaje recomendado para aceros al carbono (25%). Esto con la finalidad de evitar la holgura del alambre en la posición anterior al cabrestante cuando se presenta una parada en la línea de trefilado, lo cual puede ocasionar rotura del alambre debido a la fuerza producida por la línea cuando ésta comienza a operar nuevamente.

Se recomienda llevar este programa a la industria del trefilado, con la finalidad de crear una retroalimentación continua para la mejora del programa adecuándolo a las necesidades de la empresa.

Incorporar más información a este programa, sobre otros materiales específicos como el acero inoxidable, el aluminio, entre otros; con la finalidad de poder calcular las series de trefilados de estos materiales mediante este mismo software, y facilitarlo a las empresas trefiladoras.

# Referencias

---

---

- Aparicio, G., Armas, H. D., & Ciaccia, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *INGENIERÍA UC*.
- Atienza, J. (2001). *Tensiones Residuales en Alambres de Aceros Trefilados*. Madrid: Universidad de Madrid.
- Cabello, S. (2006). Ensayos de compresion y torsion: una alternativa en la obtension de curvas esfuerzo-deformacion efectiva de materiales metalicos ductiles. *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales 200X*.
- Cabello, S. (2007). *Temas sobre Conformado de Metales*. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Callister, W. (1998). *Introduccion a la Ciencia e Ingenieria de los Materiales*. Caracas: Reverte.
- Castañeda, J. (2001). *Metodos de Investigacion II*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Cervo, A. L. (2001). *Metodologia Cientifica*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Clark, D. (1952). *Physical Metallurgy for engineers*. New Jersey: Van Nostrand.
- Cortes, J. (1999). *Visual Basic 6.0*. España: Tecnicas Marcombo.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. Massachusetts: Mc Graw Hill.

- Escalante, D. y. (2007). Influencia de la velocidad de trefilado en las propiedades mecánicas y cambios microestructurales del acero y aluminio. *Trabajo Especial de Grado* , Universidad de Carabobo.
- Foxall, G. (2006). *Programación Modular en Visual Basic*. New York: Publicaciones Navarra.
- Geoffrey, R. (1972). *Conformado de los metales* . Bilbao (España): Ediciones Urmo.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna* . Mexico: Prentice - Hall Hispanoamericana.
- Hernandez, R. (2001). *Metodología de la Investigación* . Mexico: Mc Graw Hill.
- Morales, A. (2002). *Ingeniería de planta para el control de procesos industriales en la fabricación de pernos, tuercas y afines*. Lima: Universidad Nacional de San Marcos.
- Pacheco, J. H. (2002). *Rediseño y puesta a punto de una trefiladora experimental*. Valencia: Trabajo especial de grado de la Universidad de Carabobo.
- Poon, V. W. (2000). *Evaluación del proceso de trefilado en un acero al carbono AISI 1008*. Caracas: Trabajo especial de grado de la Universidad Central de Venezuela.
- Santos, M. M. (2007). Influência dos parâmetros do processo de trefilção no empenamento de barras do aço SAE 9254. *XII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*.
- Sheffield, R. C. (2004). Decapado y Pasivado del Acero. *Euro The European Stainless Steel* , Bruselas, Belgica.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Traxit, I. (2006). Lubricantes para el Trefilado de Alambre . *Catálogo de Selección de Productos* , Alemania.

- Yriarte, P. (1997). Estudio de la influencia de los parámetros geométricos de la trefila sobre el esfuerzo de trefilado del alambre de acero AISI 1008. // *Jornada de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales* , Universidad Central de Venezuela.

# *Dedicatoria*

---

---

A Dios, por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

A mi madre Flor Biffi, ya que gracias a ella soy quien soy hoy en día. Siempre ha sido ejemplo de dedicación y constancia. Eres el bastón de todas las decisiones que he tomado en mi vida. ¡Te quiero mami!

A mi hermana María Alejandra, por estar conmigo, hacerme reír en esos momentos difíciles y por compartir todos esos secretos y aventuras que sólo se pueden vivir entre hermanos.

A mi hermano Carlos Martin, por los momentos satisfactorios compartidos en familia.

A mi tía María del Rosario. Aunque no estés a mi lado, siempre te recuerdo con un inmenso cariño, eres la estrella que más brilla.

A Jorge Molina, gracias por tu cariño y apoyo incondicional que me has brindado todo este tiempo de completa alegría y triunfos.

**Veronica M. Masias B.**

# *Dedicatoria*

---

---

En primer lugar quiero dedicar este gran logro de mi vida a Dios, por haber estado siempre presente en cada uno de mis pasos, por haberme premiado con una familia maravillosa que me han dado su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mis padres, Rafael Pinto y Ana Pernía, quienes me trajeron a este mundo, me educaron e inculcaron en mí todos los valores que hoy me definen como ser humano. No se puede explicar con palabras el agradecimiento que siento por todo el amor, dedicación, entrega y comprensión que me han brindado en todo momento de mi vida. Ustedes han sido mi modelo a seguir, mi fuente de inspiración y mi fortaleza para alcanzar el éxito profesional y personal. ¡Es una bendición tenerlos como padres! ¡No saben cuánto los admiro y los amo!

A mis adoradas hermanas, Angélica y Adriana, por brindarme su amor y apoyo incondicional. Ustedes son fuente de inspiración, orgullo y ejemplo a seguir en la vida ¡Las amo hermanitas!

A Verónica Masias, excelente persona, compañera y sobre todo gran amiga, especial agradecimiento por su paciencia, tolerancia, responsabilidad e inteligencia que permitió que en conjunto lográramos nuestra meta. Te quiero amiga. ¡Lo logramos!

A Nelson David, por haber estado presente en todo momento, brindándome su apoyo, amor y comprensión durante esta meta alcanzada.

A todos mis amigos que de una u otra forma siempre estuvieron presente durante este largo camino apoyándonos, animándonos y compartiendo grandes momentos y aventuras de nuestras vidas.

***Alejandra Vanessa Pinto Pernía***

# *Agradecimientos*

---

---

A Dios, por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

A mi madre Flor Biffi, ya que gracias a ella soy quien soy hoy en día. Siempre ha sido ejemplo de dedicación y constancia. Eres el bastón de todas las decisiones que he tomado en mi vida. ¡Te quiero mami!

A mi hermana María Alejandra, por estar conmigo, hacerme reír en esos momentos difíciles y por compartir todos esos secretos y aventuras que sólo se pueden vivir entre hermanos.

A mi hermano Carlos Martin, por los momentos satisfactorios compartidos en familia.

A mi tía María del Rosario. Aunque no estés a mi lado, siempre te recuerdo con un inmenso cariño, eres la estrella que más brilla.

A Jorge Molina, gracias por tu cariño y apoyo incondicional que me has brindado todo este tiempo de completa alegría y triunfos.

A mis amigos y amigas que me acompañaron a lo largo de mi carrera tanto dentro como fuera de la universidad, son tantos que me faltarían hojas para nombrarlos a todos, gracias por sus diferentes ayudas y amistad sincera, sin ustedes no hubiesen sido tan maravillosos esos días.

A las familias Pinto Pernia, Casas Hernández y Molina Pereira, gracias por abrirme las puertas de su hogar y brindarme el cariño y apoyo necesario para seguir adelante.

A Alejandra Pinto, gracias por ser mi compañera y por tu gran paciencia. Este trabajo no hubiese sido igual sin ti ¡lo logramos!

A nuestra tutora Sandra Cabello, por su ardua colaboración, guía y dedicación en la realización de este proyecto. Gracias por todos sus conocimientos y experiencias. Por su apoyo y paciencia.

A Luis Martínez, por su gran colaboración y ayuda desinteresada.

**Veronica M. Masias B.**

# *Agradecimientos*

---

Ante todo gracias a Dios por habernos permitido lograr esta importante meta, por acompañarnos, protegernos y guiarnos por el camino correcto llevándonos siempre hacia el éxito.

A mi familia y la familia Biffi, gracias por brindarnos todo su apoyo y colaboración incondicional para lograr nuestros sueños, por darnos ese impulso que nos faltaba para continuar luchando por nuestras metas. Por ser personas tan especiales y maravillosas que sin su ayuda no lo hubiéramos podido lograr.

Especial agradecimiento a nuestra tutora, Sandra Cabello, por toda la paciencia, apoyo, colaboración y guía para el logro de esta tesis. Gracias por toda la dedicación y enseñanza que han sido un pilar para este éxito.

A la empresa Vicson, gracias por toda su colaboración y consejos para la elaboración de este proyecto.

A Luis Martínez y Jorge Molina, gracias por su gran colaboración, indispensable para la culminación de éste proyecto.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, con quienes compartimos años de nuestras vidas y que hicieron del transcurso de nuestra carrera una experiencia inolvidable.

***Alejandra Vanessa Pinto Pernía***

# *Lista de símbolos*

---

---

A	Área
$A_1$	Área de entrada del alambre
$A_2$	Área de salida del alambre
D	Diámetro
$D_0$	Diámetro inicial
$D_f$	Diámetro final
$D_1$	Diámetro de entrada del alambre
$D_i$	Diámetros intermedios
$D_2$	Diámetro de salida del alambre
$D_{\text{cabrestante}}$	Diámetro del cabrestante
E	Módulo elástico
e	Deformación nominal o de ingeniería
$e_u$	Deformación a máxima carga
F	Fuerza
$F_i$	Carga aplicada
$f_k$	Fuerza cinética
k	Esfuerzo para una deformación natural igual a uno
$L_c$	Longitud de contacto del material con el dado
$L_0$	Longitud inicial de la muestra

$n$	Coeficiente de endurecimiento por deformación
$N$	Fuerza normal
Pot	Potencia
$r$	Reducción de área
$S$	Esfuerzo nominal o ingenieril
$S_u$	Esfuerzo último
$S_y$	Esfuerzo de fluencia
$V$	Velocidad lineal
$W$	Velocidad angular
$\bar{Y}$	Esfuerzo de fluencia promedio
$\Delta$	Factor de deformación
$\mu$	Coeficiente de fricción cinética
$\alpha$	Semi-ángulo de la matriz
$\sigma$	Esfuerzo verdadero
$\sigma_e$	Esfuerzo de estirado
$\sigma_f$	Esfuerzo verdadero a la fractura
$\Phi$	Factor de corrección para deformación no homogénea
$\varepsilon$	Deformación verdadera
$\varepsilon_f$	Deformación verdadera a la fractura
$\varepsilon_u$	Deformación verdadera a máxima carga

# *Resumen*

---

---

En este trabajo se propone una herramienta para la selección de las series de trepila de aceros al carbono, la cual consiste en el diseño de un programa interactivo; para ello se realizó un estudio de los aceros 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 en condiciones de alambrón. Se determinaron las propiedades mecánicas de los mismos mediante ensayos de tracción, ensayos de microdureza y análisis microscópico. Estos resultados son almacenados para la alimentación del programa. Fue seleccionado Visual Basic como programa para la realización del algoritmo por su facilidad de manipulación además de ofrecer mayor seguridad frente a alteraciones accidentales de las líneas de comando.

Se determinó que para los aceros en condición de alambrón ensayados, las propiedades mecánicas de la resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia y microdureza aumentan con respecto al porcentaje de carbono presente en el material. El cambio microestructural en las muestras, es apreciable a medida que asciende el porcentaje de carbono. Por lo que se concluye, que para el intervalo de aceros ensayados, el porcentaje de carbono influye en las propiedades mecánicas, microdureza y en la microestructura del material. Al realizar una comparación de una serie proporcionada por el programa, con una suministrada por una empresa trepilar, se observa una discrepancia la cual puede atribuirse a los modelos prácticos empleados por la industria.

# *Índice de figuras*

2.1 Esquema del proceso de trefilado.	15
2.2 Secciones de una hilera típica.	17
2.3 Proceso de trefilado con varias reducciones sucesivas.	18
2.4 Representación del efecto de fricción.	22
2.5 Refrigeración de los dados en el proceso de trefilado.	25
2.6 Fuerzas actuantes en el proceso de trefilado.	31
3.1 Organización de las muestras en las baquelitas para los ensayos de microdureza y análisis microscópicos.	43
3.2 Maquina GALDABINI.	45
3.3 Embutidora Buehler.	45
3.4 Desbastadora Gruesa BG30.	46
3.5 Desbastadora Fina DS 20.	46
3.6 Pulidora GP 25.	47
3.7 Microdurometro Buehler.	47

3.8 Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman.	53
3.9 Ilustración de los datos de entrada introducidos en el programa diseñado	63
3.10 Ilustración de la serie arrojada por el programa.	64
4.1 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1006.	69
4.2 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1008.	70
4.3 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1023.	70
4.4 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1035.	71
4.5 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1060.	71
4.6 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1065.	72
4.7 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Acero 1075.	72
4.8 Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera. Para los aceros estudiados.	73
4.9 Gráfico $\sigma_o$ vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	76
4.10 Gráfico factor n vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	77
4.11 Gráfico factor k vs. % carbono. Para los aceros estudiados.	77
4.12 Microestructura longitudinal. Acero 1006 en centro. (200X).	79
4.13 Microestructura longitudinal Acero 1006 en borde. (200X).	79
4.14 Microestructura transversal. Acero 1006 en centro. (200X).	80

4.15 Microestructura transversal. Acero 1006 en borde. (200X).	80
4.16 Microestructura longitudinal. Acero 1075 en centro. (200X).	81
4.17 Microestructura longitudinal. Acero 1075 en borde. (200X).	81
4.18 Microestructura transversal. Acero 1075 en centro. (200X).	82
4.19 Microestructura transversal. Acero 1075 en borde. (200X).	82
4.20 Datos de entrada de la serie.	85
4.21 Resultados proporcionados por el programa.	86
4.22 Imagen y cuadro informativo antes de realizar la corrida.	87
4.23 Ejemplo de imagen y cuadro informativo con los datos proporcionados por el programa.	87
4.24 Botones de operaciones del programa.	87
4.25 Modulo del programa. Declaración de variables.	88
4.26 Modulo del programa. Programación Modular.	89
4.27 Gráficas de diámetro inicial vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	92
4.28 Gráficas de diámetro final vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	92
4.29 Gráficas de porcentaje de reducción vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	93
4.30 Gráficas de velocidad vs. N° de pasadas. Resultados de la empresa y el programa	93

# *Índice general*

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1            El Problema</b>	<b>3</b>
1.1 Situación problemática	5
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Justificación	7
1.4 Alcance	8
1.5 Limitaciones	8
1.6 Antecedentes	9
<b>CAPÍTULO 2            Marco Teórico</b>	<b>13</b>
2. Bases teóricas	15
2.1 Proceso de trefilado	15

2.2 Descripción de un dado típico	16
2.3 Variables que influyen en el proceso de trefilado	18
2.3.1 Grado de reducción en trefilado	18
2.3.2 Ángulo de la trefila	20
2.3.3 Fricción	21
2.3.4 Lubricantes usados	23
2.3.5 Enfriamiento adecuado de los dados	25
2.3.6 Velocidad de trefilado	26
2.4 Preparación del material para el proceso de trefilado	26
2.4.1 Tratamiento térmico de recocido	26
2.4.2 Limpieza del material	28
2.4.3 Afilado del material	28
2.5 Causas de roturas de alambres trefilados	29
2.6 Determinación de la fuerza de trefilado	30
2.6.1 Modelo de Schey (1987)	30
2.6.2 Modelo basado en análisis de fuerzas en estado estacionario (Sachs)	31
2.7 Programación Visual Basic	33
2.7.1 Variables	34
2.7.2 Programación modular	35
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>Marco Metodológico</b>	<b>37</b>
3.1 Tipo de investigación	39

3.2	Diseño del proyecto de investigación	39
3.3	Recolección de información	40
3.4	Tipo de muestreo	41
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	44
3.6	Equipos e instrumentos utilizados	45
3.7	Procedimiento experimental	48
3.7.1	Material utilizado	48
3.7.2	Composición química	48
3.7.3	Ensayo de tracción	49
3.7.4	Análisis microscópico	54
3.7.5	Ensayo de microdureza	56
3.8	Parámetros obtenidos de los ensayos	57
3.9	Especificaciones del programa elaborado	58
3.10	Realización del algoritmo del programa	60
3.11	Aplicación del programa a un caso práctico	61
3.12	Flujograma metodológico	65
<b>CAPITULO 4</b>	<b>Resultados</b>	<b>69</b>
4.1	Ensayos de tracción	69
4.1.1	Valores de n y k para el cálculo de esfuerzo	75
4.2	Análisis microscópico	78
4.3	Ensayos de microdureza	83

4.4 Programa para la selección de las series en el trefilado	84
4.4.1 Datos de entrada de la serie	84
4.4.2 Resultados o datos de salida del programa	85
4.4.3 Imagen y cuadro informativo	86
4.4.4 Botones de operaciones	87
4.4.5 Módulo del programa	88
4.5 Comparación de resultados	89
<b>CAPITULO 5</b> <b>Análisis de Resultados</b>	<b>95</b>
<b>CAPITULO 6</b> <b>Conclusiones</b>	<b>103</b>
<b>CAPITULO 7</b> <b>Recomendaciones</b>	<b>107</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>111</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>117</b>
<b>Apéndice B</b>	<b>133</b>
<b>Apéndice C</b>	<b>163</b>

# *Índice de tablas*

2.1 Ángulo del cono de reducción de los dados de trefilado según los materiales a deformar.	17
3.1 Muestras por tipo de acero para los ensayos de tracción.	41
3.2 Muestras por tipo de acero para los ensayos de microdureza y análisis microscópico.	42
3.3. Porcentaje de carbono de los aceros a estudiar e intervalos establecidos por tipo de acero.	49
4.1 Resultados de ensayos de tracción de los diferentes tipos de aceros al carbono.	74
4.2 Valores de $\sigma_0$ , n y k.	76
4.3 Resultados de los ensayos de microdureza. Muestras transversales y longitudinales.	83
4.4 Resultados de la serie proporcionada por la empresa trefiladora	90
4.5 Resultados de la serie obtenida por el programa diseñado	91

# Introducción

---

Los procesos metalmecánicos relacionados con la deformación plástica de metales en frío han adquirido en los últimos años un apreciable desarrollo, que se manifiesta con la creación de nuevas industrias y crecimiento de las ya existentes, las cuales emplean estos procesos en la elaboración de una gran variedad de productos trabajados en frío y que son de uso muy frecuente en la actualidad.

El alambre de acero trefilado es un producto de gran interés industrial. Se emplea masivamente en las industrias pesqueras, automotriz y de construcción, entre otros. El proceso de trefilado con el que se obtienen estos alambres es una de las más antiguas operaciones de conformado de metales y consiste, esencialmente, en reducir la sección de una barra haciéndola pasar a través de una matriz por estirado en frío.

El conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales conduce al mejoramiento de los procesos y propiedades de los productos terminados mediante la deformación plástica, por lo que se ha seleccionado el proceso metalmecánico de trefilado de aceros como tema del presente trabajo, el cual será la base en la elaboración de un programa interactivo que facilitará a los operadores de máquinas trefiladoras realizar los cálculos para

la selección de las series del acero al carbono al cual se le realizará el proceso de trefilado.

El programa se considera una herramienta de ayuda para el sector empresarial, ya que se fundamenta principalmente en la reducción del tiempo, costos y errores al momento de realizar los cálculos necesarios para obtener el producto final, determinando así un beneficio importante para la industria.

# CAPÍTULO 1

## *El Problema*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

En Venezuela existen empresas que fabrican y comercializan alambres, productos de alambre y derivados, para el mercado nacional e internacional, a fin de satisfacer las necesidades y expectativas de sus clientes, con valor agregado que genere confianza, identificación y fidelidad.

Uno de los pasos que conforman el proceso productivo de estas empresas es el trefilado. Este proceso consiste en la reducción sucesiva del diámetro del alambrón, (producto semi-elaborado proveniente de laminación en caliente) el cual constituye la materia prima. El proceso es de conformación en frío, por lo que el material experimenta endurecimiento por deformación. Para esto se dispone de una máquina trefiladora, la cual tiene como accesorio de trabajo un trompo sobre el que se coloca el rollo del alambrón. Para la reducción del diámetro del alambrón se utilizan matrices o dados de diferentes medidas (diámetros), de acuerdo a los requerimientos del producto final. Los dados están fabricados usualmente de carburo de tungsteno.

Teóricamente, se ha estimado el porcentaje de reducción máximo posible cerca del 63%, sin embargo, motivado a efectos de fricción, trabajo redundante, efecto de calentamiento asociado al trabajo de deformación; el porcentaje de reducción práctico llega a descender a 25% aproximadamente, especialmente para aceros. Por tanto, cuando el grado de reducción total es muy grande (mayor a 25%) se deben realizar varios pasos de trefilados que implica seleccionar una serie (varios pasos con diámetros de salida sucesivamente más pequeños). Los grados de reducción y sus secuencias varían de trefilería en trefilería. Como regla general, es conocido que el primer y último paso deben tener reducciones menores al promedio, el tercer y cuarto deben tener las primeras reducciones por encima del promedio, y los demás pasos deben tener reducciones en el promedio. De este modo se distribuye mejor la generación de la acritud y se consiguen reducir el número de roturas. (Rowe, 1972).

Por lo general, el cálculo de la serie de trefilado (número de pasadas, diámetros asociados y verificación de factibilidad de deformación bajo condiciones adecuadas) se realiza empíricamente, estimando una serie para un producto determinado sin un procedimiento regularizado, lo que involucra elevados costos de producción por inadecuada selección de la serie, además de pérdidas de tiempo. Todo lo anterior, aunado al desconocimiento de riesgos de sobrecalentamiento del material y formación de defectos en el alambre (como “estallido central (central bursting)”) hacen de esta actividad de selección de la serie una ardua tarea, que podría ser simplificada en la medida en que se cree una rutina para reproducir el procedimiento. Es por ello que se ha planteado la posibilidad de diseñar un programa interactivo con el propósito de facilitar el trabajo de selección de la serie de trefilado, para el caso particular de aceros al carbono. Lo anterior proporcionaría mejoras en el

proceso ya que eliminaría pruebas repetitivas en busca de la serie adecuada, optimizando recursos: tiempo y dinero.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar un programa interactivo para determinar las series de trefilas de aceros al carbono.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las propiedades mecánicas de los aceros al carbono en condición de alambón.
- Evaluar la micrografía de los aceros al carbono en la condición de alambón.
- Crear una base de datos con los resultados obtenidos de los ensayos de tracción a los diferentes aceros al carbono.
- Seleccionar el programa de computación a utilizar.
- Elaborar el programa para el diseño de la serie de trefilado en aceros al carbono.

## **1.3 Justificación**

En el ámbito educativo, se hará un aporte en las investigaciones relacionadas al trefilado de aceros al carbono; evaluando la micrografía y determinando las propiedades mecánicas; con el fin de crear una base de datos que además de servir de soporte para la elaboración del software,

permitirá generar una referencia válida del comportamiento de estos materiales de amplio uso industrial.

En el aspecto industrial se pretende lograr aportes económicos al poner en funcionamiento el programa de computación que ahorrará tiempo y dinero, puesto que se facilitará la selección de la serie (número de pasadas, diámetros asociados y verificación de factibilidad de deformación bajo condiciones adecuadas) requeridos para el trefilado de los aceros al carbono empleados en la industria.

## **1.4 Alcance**

El programa diseñado seleccionará la serie de trefilado para aceros al carbono, especificando número de datos contenidos en la serie, reducción por pase (diámetros de salida en cada pase), porcentaje de reducción por pasada, velocidad lineal y angular de los tambores de acumulación, incremento de temperatura y tendencia a la formación de “estallido central (central bursting)”.

## **1.5 Limitaciones**

- Las propiedades de los aceros, incluidas en el programa se obtendrán por extrapolación a partir de ensayos realizados a los aceros: SAE 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075.
- La convalidación de resultados se hará con base en la comparación del perfil de deformación (porcentajes de reducción por pase) asociados a la serie generada por el programa y el perfil correspondiente a una serie en funcionamiento en una empresa de trefilado.

## 1.6 Antecedentes

El trefilado de aceros es un proceso que ha sido estudiado ampliamente por Yriarte y Puchi, (1997), quienes estudiaron la influencia de los parámetros geométricos de la trefila sobre el esfuerzo de trefilado del alambre de acero A.I.S.I. 1008. El estudio contempla la evaluación experimental a partir de un ensayo de trefilado desarrollado en una máquina de tracción universal, determinando la fuerza longitudinal de trefilado para las distintas geometrías de la trefila para los lubricantes seleccionados. Se realiza un análisis comparativo entre los datos experimentales, los obtenidos a partir de ecuaciones teóricas propuestas por otros investigadores y la solución teórica para el esfuerzo longitudinal de trefilado obtenida al integrar numéricamente la ecuación diferencial que rige el proceso, agregándole el término de Whitton, de manera de contemplar el trabajo redundante no previsto en la ecuación diferencial. Se aplicó un análisis estadístico de acuerdo al método de diseño factorial en dos niveles para evaluar la relevancia de los parámetros involucrados.

Otro aspecto abordado fue la simulación mediante el método de elemento finito del proceso de trefilado a partir del "software" Ansys versión 5.7. Este algoritmo permitió determinar la distribución de los esfuerzos y deformaciones, tanto del material a trefilar como de la trefila. Se establecieron comparaciones entre los resultados experimentales y los resultados de la simulación.

Por otra parte, se evaluó la influencia de los parámetros ángulo de trefila y porcentaje de reducción de área sobre los cambios microestructurales del material una vez trefilado. Se evaluaron los cambios en la orientación y en el tamaño del grano, como indicadores del grado de deformación alcanzado. Además, se realizó un análisis comparativo de la influencia del grado de

deformación sobre la densidad de dislocaciones del material trefilado, a partir de microscopía electrónica de transmisión. (Yriarte, 1997)

Santos et al., (2007) estudiaron la influencia de los parámetros del proceso de trefilado de barras de acero SAE 9254. El objetivo era mejorar las condiciones del proceso de trefilado de dicho acero. Se optimizaron variables como la geometría de la hilera, velocidad de trefilado, presión y ángulo de medidores para enderezar las trefilas de 12,50 y 14,03 mm de diámetro. Los resultados obtenidos permitirán mejorar los niveles de empeno inicial, optimizando el proceso de trefilado y la calidad del acero. De esta forma son establecidos los valores límites para las variables críticas del proceso estudiado, atendiendo así las cualidades exigidas por el cliente, para que las mismas sean respetadas. (*Santos, 2007*)

Pacheco y Hernández, (2002), realizaron estudios para el rediseño y la puesta a punto de una trefiladora experimental, para lo cual fue necesario la construcción del sistema de portadados y adaptación de un sistema de medición de fuerzas. El diseño final lo determinaron tras el análisis de varias opciones, utilizando acero 1020 como material base para la determinación de fuerzas teóricas a través de ensayos de tracción para la selección de la celda de carga y para los cálculos de rediseño de los demás componentes de la máquina.

Diseñaron y construyeron un sistema para apuntalar el extremo de los alambres que permitía introducirlo en el dado o trefila de una manera fácil. Realizaron las prácticas necesarias de trefilado y se compararon las fuerzas experimentales y las fuerzas teóricas y la diferencia entre ambas estuvo en el orden del 10%. Propusieron también una práctica de trefilado de alambre en el laboratorio de con el objetivo de comparar la fuerza teórica con la experimental. (*Pacheco, 2002*)

Escalante y Vera, (2007), realizaron un estudio de la influencia de la velocidad de trefilado en las propiedades mecánicas y cambios microestructurales del acero y aluminio, el trabajo consistió en evaluar las propiedades mecánicas y cambios microestructurales al trefilar alambre de acero 1008 y aluminio 6201 a diferentes velocidades. Los ensayos de trefilado se realizaron en la máquina de ensayos de tracción universal GALDABINI que se encuentra en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo, con el acople de un dispositivo que sostiene el dado para realizar el proceso de trefilado. Una vez trefilado el material recocido para aliviar las tensiones, se procedió a realizar ensayos de tracción, microscopía y microdureza, para evaluar las propiedades mecánicas y compararlas con las que tenía el material inicialmente sin haber sido trefilado. Se determinó que para ambos materiales en el intervalo de velocidades ensayadas la propiedad mecánica de la resistencia a la tracción y fluencia aumentan con respecto a la condición inicial de recocido y una vez trefiladas a las diferentes velocidades ensayadas 25, 50, 75, 100 y 150 mm/min, tienden a ascender levemente a medida que se incrementa la velocidad de trefilado. Por lo que se concluye, que para el intervalo de velocidades ensayadas la velocidad de trefilado influye en las propiedades mecánicas y microdureza de los materiales ensayados, mas no en la microestructura del material. *(Escalante, 2007)*

Poon et al., (2000) realizaron la evaluación del proceso de trefilado en un acero al carbono AISI 1008, donde evaluaron el proceso de trefilado a nivel experimental empleando muestras de acero al carbono AISI 1008. El proceso se simuló en una máquina universal de ensayos mecánicos, variando el ángulo de ataque de la trefila (6, 8, 10,15 y 20 grados), el porcentaje de reducción de área de la sección transversal (10,20 y 25 por ciento) y el lubricante utilizado (grasa grafitizada y estearato de calcio). Se ensayaron 63

probetas recocidas de acero AISI 1008 en 15 trefilas de acero de herramienta (AMUTTIT S) templada y revenidas, diseñadas en función de los cinco tipos de ángulos de ataque y los tres porcentajes de reducción de área de sección transversal mencionados anteriormente. Se realizaron tres ensayos para cada trefila. El lubricante de grasa grafitizada (bisulfuro de molibdeno mas grafito) se evaluó en todas la trefilas, mientras que el estearato de calcio solo se ensayo en las series de 8 y 15 grados. La probetas se diseñaron bajo las restricciones dimensionales del recorrido de la máquina y de la geometría de las trefilas. Para evaluar las propiedades mecánicas iniciales del acero AISI 1008 se realizaron ensayos de dureza y tracción uniaxial, y para las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de dureza y compresión axial. Con los resultados obtenidos de los ensayos de trefilado se evaluaron las ecuaciones empíricas propuestas por Sachs (1927) y Whitton (1957) para determinar el coeficiente de fricción de los lubricantes durante el proceso de trefilado de las barras. Mediante este estudio se determinó que las condiciones óptimas para el trefilado de este acero se alcanzan empleando un ángulo de ataque de 8 grados para porcentajes de reducción de área de sección transversal entre 10 y 25 por ciento, siendo el estereato de calcio el lubricante más adecuado para el proceso. *(Poon, 2000)*

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

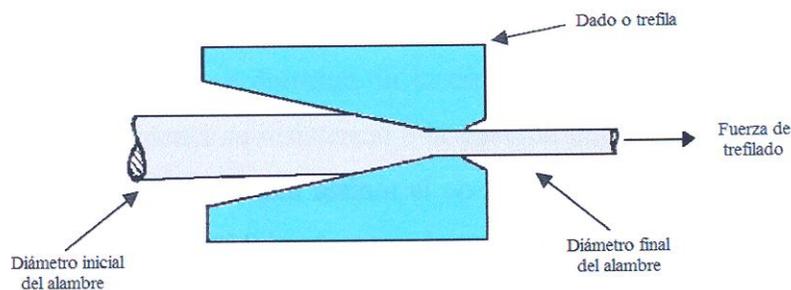
---

---

### 2. Bases Teóricas

#### 2.1. Proceso de trefilado.

El trefilado es un proceso de conformación en frío mediante el cual se consigue reducir la sección transversal de un alambroón o alambre. Para ello, se dispone de una máquina trefiladora, la cual consta de un conjunto de matrices o dados dispuestos en serie para llevar a cabo la deformación de manera gradual. Los dados son fabricados usualmente de carburo de tungsteno, con lo que adquiere propiedades mecánicas superiores a la del material a trefilar. El proceso de trefilado se hace posible mediante la aplicación de una fuerza uniaxial delantera de tracción, tal como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1. Esquema del proceso de trefilado.**

Para insertar el alambre por primera vez en el dado, se debe realizar un despunte en el extremo delantero del mismo, hasta tener una longitud tal que permita que el material sea sujetado por unas mordazas y halado desde un cabezal estirador o un tambor de acumulación cuya fuerza motriz es proporcionada por un motor

En la reducción del diámetro del alambre se utilizan dados de diferentes medidas, de acuerdo al diámetro final que se requiera obtener. Durante este proceso también se cuenta con un lubricante, por lo general en estado sólido, para disminuir el efecto de fricción entre el dado y el alambre, además de un líquido refrigerante (usualmente agua) para controlar la temperatura del dado y el material de trabajo. (Dieter, 1986)

## **2.2. Descripción de un dado típico.**

El dado es el elemento del equipo de trefilado donde se produce la deformación del alambre. Un dado típico; como la mostrada en la figura 2.2, consta de las siguientes secciones:

**Sección de entrada (a):** Determinada por el ángulo que debe ser lo suficientemente grande, con el objeto de que pueda pasar el lubricante empleado en el proceso, aminorando el efecto de fricción y, en consecuencia, las considerables elevaciones de temperatura producidas por las fuertes deformaciones.

**Sección de trabajo (b):** En esta sección se produce la reducción real de la sección del alambre. Esta sección es de forma cónica y su ángulo de la entrada está comprendido generalmente entre 6° y 10°.

**Sección de apoyo (c):** Sirve de guía cuando el alambre sale del dado, no interviniendo en la deformación plástica del material.

**Sección de salida (d):** Esta sección no tiene influencia en el diámetro final del alambre y su función principal es la de facilitar la salida de los restos de lubricante, así como también, evitar roturas del alambre cuando la máquina deja de funcionar.

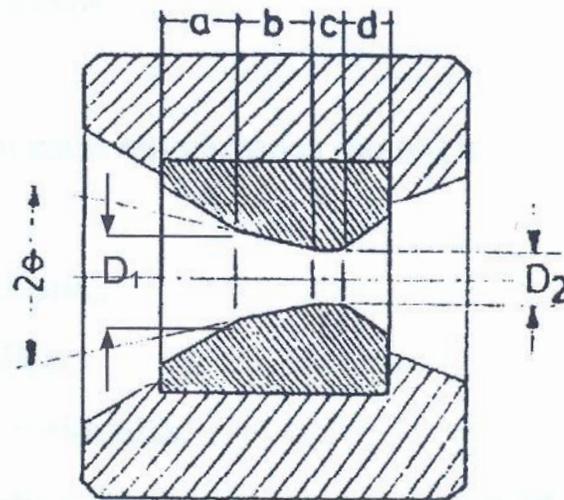


Figura 2.2. Secciones de una hilera típica. (Dieter, 1986)

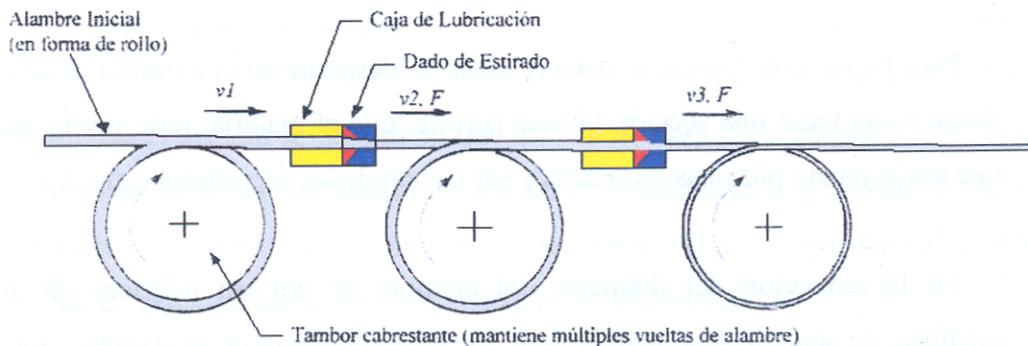
Tabla 2.1. Ángulo del cono de reducción de los dados de trefilado según los materiales a deformar. (Geoffrey, 1972)

<b>MATERIALES</b>	<b>GRADOS</b>
Aceros suaves	12 – 16
Aceros duros	14 – 18
Latones pobres	4 – 5
Cobre	12 – 16
Aluminio	16 - 20

## 2.3. Variables que influyen en el proceso de trefilado.

### 2.3.1. Grado de reducción en trefilado.

Teóricamente, se ha estimado el porcentaje de reducción máximo posible cerca del 63%, sin embargo, motivado a efectos de fricción, trabajo redundante, efecto de calentamiento asociado al trabajo de deformación; el porcentaje de reducción práctico llega a descender a 25% aproximadamente, especialmente para aceros. Por tanto, cuando el grado de reducción total es muy grande (mayor a 25%) se deben realizar varios pasos de trefilado que implica seleccionar una serie (varios dados con diámetros de salida sucesivamente más pequeños), como se muestra en la *figura 2.3*.



**Figura 2.3. Proceso de trefilado con varias reducciones sucesivas. (Groover, 1997)**

Los grados de reducción y sus secuencias varían de trefilería en trefilería. Como regla general, es conocido que el primer y último paso deben tener reducciones menores al promedio, el tercer y cuarto deben tener las primeras reducciones por encima del promedio, y los demás pasos deben tener reducciones

en el promedio. De este modo se distribuye mejor la generación de la acritud y se consiguen reducir el número de roturas. (Geoffrey, 1972)

Un grado de reducción promedio bastante razonable es de 20% por paso o dado. Establecido este criterio la secuencia dependerá del diámetro inicial y final, lo cual determinará el número de pases.

En el trefilado el grano se deforma en la dirección de la fuerza aumentando su acritud, con lo cual aumenta su resistencia a la tracción pero disminuye su ductilidad.

Paralelamente, un metal con más acritud es menos dúctil y menos deformable. Por ello, conforme al grado de reducción aumenta, el metal se hace más difícil de trefilar, hasta que la operación de trefilado en casos extremos genere la rotura del alambre; antes de que esto se produzca debe realizarse un recocido. El recocido es más frecuente en aceros al carbono.

El porcentaje de reducción se da según la siguiente expresión:

$$\% \text{ Reducción} = \left[ \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} \right] * 100 = \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^2 \right] * 100 \quad (2.1)$$

El grado de reducción depende de la composición química y microestructura inicial. Los aceros de bajo carbono pueden soportar reducciones más severas.

En la práctica, el valor del porcentaje de reducción oscila generalmente entre 10% y 50%. Para alambres finos se usan preferiblemente valores entre 15%

y 25%; y para alambres gruesos se prefiere el comprendido entre 20% y 45%. (Groover, 1997)

### 2.3.2. Ángulo de la trefila.

Un parámetro importante para caracterizar el trabajo redundante (para el caso específico del alambre), es el factor de deformación  $\Delta$ .

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} [1 + (1 - r)^{1/2}]^2 \quad (2.2)$$

Donde:

$\alpha$  = Semiángulo en radianes

$r$  = Fracción de reducción de trefilado

En el trefilado comercial de alambres se emplea con frecuencia valores de  $\alpha$  en el intervalo de 6 a 10° y reducciones de 20% por lo que  $\Delta$  toma valores de 2 a 3. Altos valores de  $\Delta$  corresponden a reducciones pequeñas y ángulos grandes, mientras que, bajos valores de  $\Delta$  corresponden a reducciones grandes y ángulos pequeños.

El valor óptimo de  $\alpha$  corresponde a la mínima energía total de deformación o esfuerzo de trefilado. También puede ser expresado en términos del factor de deformación óptimo, por la siguiente expresión:

$$\Delta_{\text{óptimo}} \approx 4,9 \left[ \frac{\mu}{\ln\left(\frac{1}{1-r}\right)} \right]^{1/2} \quad (2.3) \text{ (Cabello, 2007)}$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de fricción cinética.

### 2.3.3. Fricción.

La fricción en el sistema matriz-metal es un parámetro que se debe controlar para aumentar la eficiencia del proceso, debido a que su incremento trae como consecuencia el aumento en las cargas de trabajo y una disminución de las propiedades físicas y mecánicas de la superficie del metal trefilado.

El coeficiente de fricción cinética es el que se aplica en la mayoría de los procesos, porque generalmente se presenta movimiento relativo entre las superficies involucradas. Esta se define como:

$$f_k = \mu \times N \quad (2.4)$$

Donde:

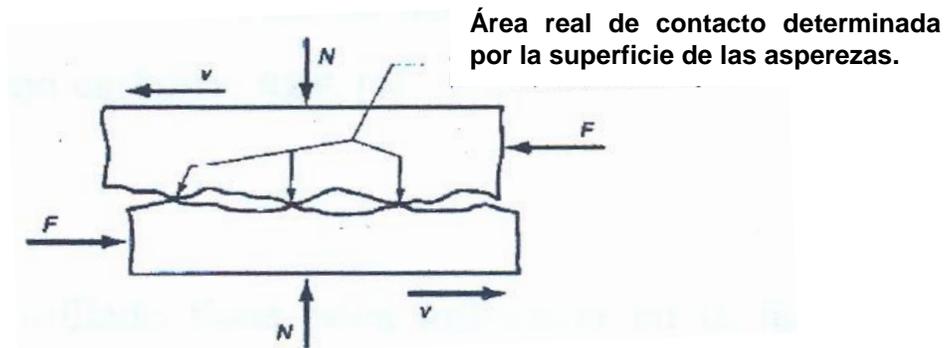
$\mu$  = coeficiente de fricción cinética.

$f_k$  = fuerza cinética (aproximadamente el 75% de la fuerza estática).

$N$  = fuerza normal.

Realmente no está comprobado porque ocurre la fricción o cual es su origen. Hoy en día la explicación de la fricción aceptada comúnmente es la teoría de la adhesión, la cual sostiene que dos superficies deslizantes (no lubricadas) están en contacto uno con otro sólo en una pequeña fracción del área aparente entre ellas. Esto es verdad aún cuando las superficies sean bastantes lisas. Cuando se observan en una vista muy ampliada, cada superficie se caracteriza por asperezas microscópicas que hacen contacto entre dos superficies, como se

aprecia en la figura (2.4) a causa de que el área real soporta la carga normal, los esfuerzos involucrados en estos puntos de contacto son muy altos y conducen a deformaciones plásticas y adhesión (pegado o enlace) en algunos casos. Debido a la naturaleza aleatoria de las superficies, algunas asperezas experimentan esfuerzos más grandes que otros, de manera que la adhesión ocurre solamente en los puntos donde los esfuerzos son muy altos y hay un contacto físico muy estrecho.



**Figura 2.4. Representación del efecto de fricción.** (Atienza, 2001)

Los resultados publicados en la literatura señalan que los valores aproximados para este coeficiente, en el caso del trefilado, pueden variar entre 0,2 y 0,57. La lubricación, velocidad con que se realiza el proceso y la composición de los materiales involucrados son parámetros importantes que deben tomarse en cuenta en la fricción. La fuerza de trefilado disminuirá mientras mayor sea la capacidad del lubricante e disminuir el coeficiente de roce existente entre la matriz y el metal. (Atienza, 2001).

#### 2.3.4. Lubricantes usados.

El proceso de trefilado es aplicado a diversos materiales, por lo que se debe seleccionar el lubricante adecuado dependiendo del material con que se va a trabajar.

Para el trefilado de alambre de bajo carbono, ya sea decalaminado o decapado, normalmente se recomienda utilizar un lubricante cálcico con bajo o medio contenido en grasa. Si se necesita un alambre muy limpio, para un posterior proceso de electroplastia o cobreado, entonces debería utilizarse un jabón sódico soluble en agua, al menos en los últimos pasos.

Para el trefilado de *alambre de alto carbono*, es preciso contemplar los tres pretratamientos principales:

**Primero:** decapado más recubrimiento (cal, bórax, sales ZEL).

**Segundo:** decapado más fosfatado y recubrimiento (cal, bórax, ZEL).

**Tercero:** decalaminado más capa de recubrimiento (Zel, bórax) en línea.

Para estas aplicaciones, son necesarios jabones cálcicos con un contenido en grasa medio o alto. Un factor importante al seleccionar el lubricante correcto es también si van a utilizarse dados de presión. Debido a la relación entre jabones cálcicos y sódicos en el proceso, la combinación de estos jabones influye en la velocidad de la línea.

Para el trefilado de *alambre de acero inoxidable*, durante la última década ha habido muchos cambios en el uso de jabones cálcicos. Se ha aumentado el intervalo de jabones sódicos con mayor estabilidad frente a la presión y la temperatura. Se han mejorado los recubrimientos para proteger las aleaciones ferríticas frente a la corrosión. Lubricantes sintéticos protegen el alambre durante

los fuertes procesos de deformación subsiguientes. Una gran innovación consiste en utilizar una emulsión, basada en aceite vegetal para alambre austenítico en máquinas multipasos. El resultado es un brillo óptimo y facilidad de limpieza.

El jabón y el recubrimiento utilizado para aceros de alta resistencia consumidos en el *sector neumático*, deben tener facilidad de limpieza y dejar poco residuo después del tratamiento térmico. Esta industria está contemplando un cambio en el pretratamiento, del decapado y decalaminado para lo que se necesitan diferentes jabones para conseguir una calidad óptima.

El alambre fibra en el *sector cemento* se produce principalmente en líneas de trefilado largas. Es necesario utilizar jabones sódicos con estabilidad térmica lo más alta posible y con una película de trefilado de larga duración. Pueden utilizarse con o sin dados de presión. Se disponen de combinaciones de jabones para alambre y cable con máxima resistencia al calor y agarre para proporcionar un color uniforme dejando poco residuo durante el proceso de recocido.

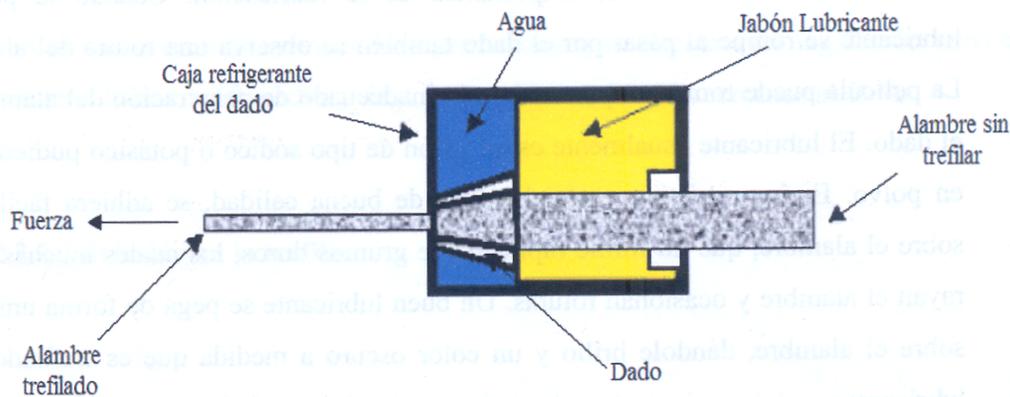
En el pretratamiento para preparar *hilo para soldadura Dióxido de Carbono* ( $CO_2$ ), el recubrimiento puede hacerse bien sea con sulfatos o con sales libres de sulfatos dependiendo de las necesidades. Para el trefilado, es normal utilizar una combinación de jabones cálcicos con fuerte adherencia en los primeros pasos con jabones sódicos en los últimos. No obstante se ofrecen jabones sódicos especiales con aditivos que pueden utilizarse en todos los pasos. Para el trefilado en húmedo, se han desarrollado emulsiones especiales para tener un rendimiento óptimo a bajas concentraciones limpiando a la vez el alambre del jabón cálcico residual y lubricar los dados.

Para los *alambres no ferrosos*, dado que la superficie del hilo es muy suave, es necesario utilizar jabones sódicos con alto contenido en grasa y sin productos de carga. La adherencia debe ser alta y los residuos después del recocido, bajos.

Se recomiendan emulsiones basadas en aceites vegetales y grasas con ingredientes sólidos en dispersión. Se disponen de diferentes tipos totalmente libres de espuma para utilizar en equipos mediante spray. (Traxit, 2006)

### 2.3.5. Enfriamiento adecuado de los dados.

Los dados usualmente tienen un sistema de enfriamiento por agua alrededor de ellos (en el portadados) como se muestra en la figura (2.5) y para refrigerar los tambores, ya que si el tambor está caliente éste aumenta la temperatura del alambre. Adicionalmente muchas trefiladoras colocan ventiladores en los tambores que enrollan el alambre trefilado después de pasar por cada dado, con el fin de contribuir al enfriamiento del alambre y del tambor. La velocidad de deformación del alambre es del orden de unos 30 m/min a la entrada del primer dado.



**Figura 2.5. Refrigeración de los dados en el proceso de trefilado.** (Geoffrey, 1972)

### **2.3.6. Velocidad de trefilado.**

La velocidad de trefilado depende del tamaño de la máquina, del metal a trefilar. Ésta variable tiene poca influencia en la fuerza requerida para realizar el proceso; sin embargo, para velocidades elevadas existirá un mayor aumento de temperatura y por lo tanto, será más difícil la lubricación, exigiéndose de esta forma, la utilización de lubricantes de alta calidad. (Dieter, 1986)

## **2.4 Preparación del material para el proceso de trefilado.**

### **2.4.1 Tratamiento térmico de recocido.**

El recocido es un tratamiento térmico cuyo objetivo principal es “ablandar” el material para facilitar su mecanizado posterior. También es utilizado para regenerar el grano o eliminar las tensiones internas. En el proceso de trefilado su función es incrementar la ductilidad del material, para posteriormente realizar la deformación durante el proceso. En algunos casos se necesitan pasos de recocido entre pasadas en el trefilado continuo.

El tratamiento del recocido consiste básicamente en un calentamiento hasta temperaturas de austenización seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la ductilidad, mientras que disminuye la dureza. Con el fin de poder apreciar detalles de la evolución microestructural correspondiente a este tratamiento, es necesario analizar el significado de los siguientes cuatro términos: acritud, restauración, recristalización y crecimiento del grano.

La acritud significa deformación mecánica de un material a temperaturas relativamente bajas. El área de acritud se define en relación a la reducción relativa

del área de la sección transversal del material causada por procesos como el laminado. A mayor grado de acritud, la dureza y resistencia del material será mayor. Este proceso se denomina endurecimiento por acritud, en el cual el material no experimenta un crecimiento del tamaño del grano por activación térmica sino que sufre la deformación de los granos como consecuencia del endurecimiento al cual fue sometido.

La restauración es la etapa más sutil del recocido. En esta etapa no existe ningún cambio en la microestructura. Sin embargo la movilidad de los átomos es la suficiente para disminuir la concentración de defectos puntuales en el interior de los granos y, en algunos casos, permitir el movimiento de las dislocaciones hacia posiciones menos energéticas. Este proceso lleva asociado una modesta disminución de dureza y puede ocurrir a temperaturas justo por debajo de las necesarias para producir cambios significativos en la microestructura.

La recristalización es el resultado desde el punto de vista microestructural de una permanencia de temperaturas en la cual la movilidad de los átomos es la suficiente para afectar a las propiedades mecánicas. Se nuclean nuevos granos equiaxiales y libres de esfuerzos en las regiones de la microestructura con acritud sometidas a elevadas esfuerzos. Estos granos crecen al mismo tiempo hasta que llegan a construir la totalidad de la microestructura. En esta etapa el tamaño de grano disminuye con el grado de acritud. En cuanto al crecimiento de grano, la microestructura que se obtiene durante la recristalización aparece de forma espontánea. Dicha microestructura es estable en comparación con la estructura correspondiente al estado original con acritud. Sin embargo, la microestructura de recristalización contiene una elevada concentración de bordes de grano. (Cabello, 2007)

### **2.4.2 Limpieza del material.**

La limpieza del material se realiza para prevenir daños en la superficie de trabajo y en el dado de trefilado. Esto involucra la remoción de los contaminantes de la superficie (por ejemplo, suciedades, aceites y corrosión), para ello se recurre a procesos químicos o mecánicos. En algunos casos se lubrica previamente la superficie de trabajo después de la limpieza. En el caso de la limpieza química, se utilizan tinas con ácidos a diferentes concentraciones, generalmente Ácido Clorhídrico (HCl). Los rollos de alambres son introducidos en las tinas para disolver los óxidos presentes en la superficie del alambre. Finalmente se introducen en tinas con agua para detener la reacción del ácido sobre el acero y evitar posteriores picaduras. Posteriormente, son pasadas por tinas con bórax, para neutralizar la superficie y acondicionarla para el uso de lubricantes durante el trefilado; por último son colocados en hornos de secado. Existe otro método para la remoción de óxidos y escoria superficial del alambre. Este procedimiento mecánico, conocido como decalaminado, consiste en hacer pasar el alambre a través de un conjunto de poleas convenientemente posicionadas, con el fin de flexionar el alambre en repetidas oportunidades hasta agotar la superficie oxidada y desprenderla. (Cabello, 2007)

### **2.4.3 Afilado del material.**

El afilado implica la reducción del diámetro del extremo inicial, de manera que pueda pasar a través del dado o matriz para iniciar el proceso, industrialmente se utiliza un “sacapunta” que lamina al material por medio de rodillos. El extremo afilado del material se sujeta a las mordazas de las correderas u otros dispositivos para iniciar el proceso de trefilado. (Geoffrey, 1972)

## 2.5 Causas de roturas de alambres trefilados.

Los mayores inconvenientes que surgen en una operación de trefilado lo constituyen las roturas del alambre en los dados. Estas roturas pueden deberse a las mala lubricación; baja resistencia, defectos internos del alambre; ángulo inadecuado de entrada del alambre en el dado, o la reducción excesiva en cada paso.

Ya se ha mencionado la importancia de la lubricación. Cuando la película lubricante se rompe al pasar por el dado también se observa una rotura del alambre. La película puede romperse por un ángulo inadecuado de penetración del alambre en el dado.

Cuando el alambrón tiene muy baja resistencia a la tracción va a ser susceptible a fallar por la tracción generada en el proceso; recordemos que el acero es forzado a pasar entre los dados mediante estiramiento por tensión, con la fuerza que proporciona el motor del tambor.

La ovalidad del alambrón, un ángulo inadecuado de entrada del alambre o una reducción excesiva o desgaste irregular del dado pueden llevar a condiciones de rotura al generarse una mayor deformación en un lado del alambre que en el otro, generando un calentamiento localizado o una excesiva deformación, lo que lleva a la aparición de una zona fuertemente alterada y poco deformable en el alambre. La rotura en esta zona es inminente. (Morales, 2002)

## 2.6 Determinación de la fuerza de trefilado.

### 2.6.1 Modelo de Schey (1987).

$$\sigma_e = \bar{Y} \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \Phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (2.5)$$

Donde:

$\sigma_e$  = Esfuerzo de estirado.

$\bar{Y}$  = Esfuerzo de fluencia promedio.

$\mu$  = Coeficiente de fricción dado-material de trabajo.

$\alpha$  = Semiángulo del dado.

$\Phi$  = Factor de corrección para deformación no homogénea, determinado para una sección transversal redonda.

$$\Phi = 0,88 + 0,12 \frac{D}{L_c} \quad (2.6)$$

Siendo D el diámetro promedio de la pieza de trabajo durante el estirado y  $L_c$  la longitud de contacto del material con el dado de estirado. Los valores de D y  $L_c$  se pueden determinar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{D_o - D_f}{2} \quad (2.7)$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \operatorname{sen} \alpha} \quad (2.8)$$

Y la fuerza de estirado correspondiente, será entonces: el área de la sección transversal del material estirado, multiplicada por el esfuerzo de estirado, así:

$$F = A_f \sigma_s = A_f \bar{Y} \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (2.9)$$

Donde F es la fuerza de estirado, y los otros términos se definieron previamente. La potencia requerida en una operación de estirado es la fuerza multiplicada por la velocidad de salida de la pieza de trabajo.

### 2.6.2 Modelo basado en análisis de fuerzas en estado estacionario (Sachs).

En la figura 2.6 se muestra el estado de esfuerzos que actúan sobre un elemento estirado a través de una matriz cónica.

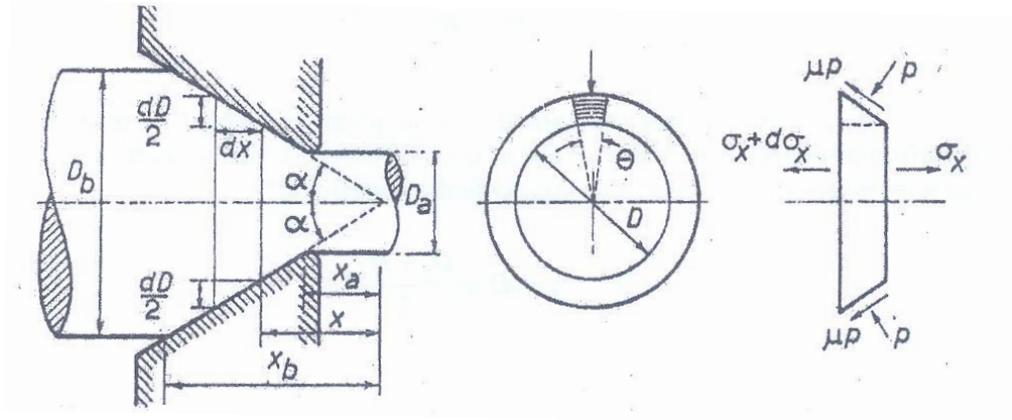


Figura 2.6 Fuerzas actuantes en el proceso de trefilado. (Cabello, 2007)

El endurecimiento por deformación considera tanto el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) como el semi-ángulo de la matriz ( $\alpha$ ) constante, y el esfuerzo de trefilado ( $\sigma_x$ ) que varía con la deformación.

Considerando un elemento infinitesimal de trabajo, las fuerzas que actúan en la dirección axial debido a la variación de tensión longitudinal, la acción de la presión de la trefila sobre el alambre, el roce del material con la trefila del equilibrio de fuerzas en la dirección axial, tomando el equilibrio radial y considerando que el material endurece con la deformación, obtenemos la siguiente expresión:

$$\int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_a} \frac{d\sigma_{xa}}{d\varepsilon} e^{B\varepsilon} d\varepsilon + \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_a} B \sigma_x e^{B\varepsilon} d\varepsilon = \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_a} \bar{Y} (1 + B) e^{B\varepsilon} d\varepsilon \quad (2.10)$$

Resultando:

$$\sigma_{xa} e^{B\varepsilon_a} - \sigma_{xb} e^{B\varepsilon_b} = (1 + B) \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_a} \bar{Y} e^{B\varepsilon} d\varepsilon \quad (2.11)$$

El valor de  $\sigma_{xb}$  es igual a cero debido a que no existe retracción durante el proceso. El valor de B se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$B = \mu * ctg(\alpha) \quad (2.12)$$

El valor de  $\varepsilon_a$ , se puede determinar por medio de la expresión:

$$\varepsilon_a = 2Ln\left(\frac{D_b}{D_a}\right) = Ln\left(\frac{1}{1 - W_{m\acute{a}x}}\right) \quad (2.13)$$

Para la primera pasada el  $\varepsilon_b$  será igual a cero, para la siguiente toma el valor de  $\varepsilon_a$  correspondiente a la pasada anterior.

$\bar{Y}$  es obtenido al considerar el esfuerzo de fluencia y la zona plástica del material modelada según Hollomon-Ludwik donde la expresión viene dada por:

$$\bar{Y} = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (2.14)$$

Al sustituir estos valores en la ecuación 2.11 se obtiene el valor de  $\sigma_{xa}$ . La carga de trefilado se logra del producto del esfuerzo  $\sigma_{xa}$  aplicado al área de salida según la siguiente expresión:

$$F_{xa} = \sigma_{xa} * \frac{\pi}{4} * D_a^2 \quad (2.15)$$

## 2.7 Programación Visual Basic.

Visual Basic es un lenguaje de programación visual, también llamado lenguaje de 4ª generación. Esto quiere decir que un gran número de tareas se realizan sin escribir código, simplemente con operaciones gráficas realizadas con el ratón sobre la pantalla. Visual Basic es también un programa basado en objetos, aunque no orientado a objetos como C++ o Java. Los elementos del entorno de desarrollo son:

- Barra de herramientas.
- Diseñador de formularios (Form).
- Cuadro de herramientas.
- Ventana de propiedades.

- Ventana de proyectos: Contiene la lista de los archivos que forman parte de la aplicación. Los tipos de archivos que se pueden incluir en un proyecto son:
  - Archivo de Proyecto.
  - Archivo de Recursos.
  - Módulo de Formulario.
  - Módulo de Clase.
  - Módulo Estándar.
  - Controles ActiveX.
  
- Ventana editor de código:

Los botones de las barras de herramientas disponibles son:

- TextBox.
- Label.
- CommandButton.
- OptionButton.
- Frame.
- ListBox.
- ComboBox.

### **2.7.1. Variables.**

Una variable es una ubicación temporal de memoria donde se almacenan datos que interesan retener durante la ejecución de la aplicación. Las variables pueden contener texto, valores numéricos, fechas o propiedades de cierto objeto. Es una forma de dar nombre a una porción de datos con la que se desea trabajar en el programa. Las variables se caracterizan por un nombre que las identifica y por un tipo de datos, que establece el conjunto de valores posibles que pueden

contener y operaciones en las que puede participar. El valor de una variable puede cambiar a lo largo de la vida de ésta. Es necesario declarar las variables para poder utilizarlas en el programa. La forma de declarar una variable es a través de la instrucción Dim. En la línea se declara la variable de nombre variable y al mismo tiempo Visual Basic guarda espacio en memoria para poder utilizarla.

En la segunda línea ya se utiliza la variable. En este caso sirve para guardar el valor que existe en un cuadro de texto llamado txtEntrada (representado por la propiedad Text). En la tercera línea se hace justo lo contrario, se utiliza la variable para establecer el valor de la propiedad Text del cuadro de texto txtSalida.

Existen diversos tipos de variables entre las cuales se puede nombrar:

- Boleano (Boolean): Sólo admite 2 valores TRUE o FALSE.
- Byte: Admite valores entre 0 y 255.
- Entero (Integer): Admite valores entre -32768 y 32767
- Entero largo (Long): Admite valores entre -2.147.483.648 y 2.147.483.647.
- Simple (Single): Admite valores decimales con precisión simple.
- Doble (Double): Admite valores decimales de doble precisión.
- Moneda (Currency): Válido para valores de tipo moneda.
- Cadena de caracteres (String): Cadenas de caracteres.
- Fecha (Date): Fechas, permite operar con ellas. (Cortes, 1999)

### **2.7.2. Programación modular.**

La programación modular es uno de los métodos de diseño más flexibles y potentes para mejorar la productividad de un programa. En programación modular

el programa se divide en módulos (partes independientes), cada una de las cuales ejecuta una única función o actividad y se codifican independientemente de otros módulos. Cada uno de estos módulos se analiza, codifica y pone a punto por separado. Cada programa contiene un módulo denominado programa principal que controla todo lo que sucede; se transfiere el control a los submódulos o subprogramas. Estos ejecutan su función y una vez completada su tarea, devuelven el control al módulo principal. Cada submódulo se puede descomponer en otros submódulos, dependiendo de la complejidad de la tarea a realizar y la subdivisión continúa hasta que cada módulo tenga una sola tarea para ejecutar.

Un submódulo puede realizar tareas de distinta naturaleza como: entrada, salida, manipulación de datos, control de otros módulos o una combinación de éstos. Un módulo puede transferir temporalmente (bifurcar) el control a otro módulo; sin embargo, cada módulo debe eventualmente devolver el control al módulo del cual recibió originalmente el control. (Foxall, 2006)

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

---

### **3.1 Tipo de investigación**

El presente proyecto de investigación se encuentra en el campo de las ciencias aplicadas, basándose en la publicación de Juan Castañeda Jiménez (2001), ya que es una propuesta para mejorar el procedimiento del cálculo de series de trefilados de aceros al carbono en las empresas, también tiene características del tipo exploratorias, según la teoría de Dankhe (1986), ya que se analiza en detalle todo lo referente para el diseño del programa computacional para el cálculo de las series de trefilados, además la recolección de los datos de las variables que junto con la aplicación de la teoría consultada permitirá generar una matriz de información la cual que se utilizará para el análisis y posterior cumplimiento de los objetivos planteados.

### **3.2. Diseño del proyecto de investigación**

El desarrollo de este trabajo está basado en la ejecución de cada uno de los objetivos planteados, para ello se seguirá una serie de pasos que

comienzan con la recopilación de datos y análisis de información hasta el diseño del programa a elaborar.

Basándose en la publicación de Cervo y Bervian (2001), el presente proyecto se plantea como una investigación documental y experimental. Documental, ya que se hace necesario recurrir a consultas bibliográficas relacionadas con el proceso de trefilado, revisión de trabajos de trefilado como los referidos en los antecedentes (Capítulo II). Experimental, debido a que los datos necesarios para la creación del programa del cálculo de series de trefilado de aceros al carbono, se obtendrán mediante ensayos de tracción, además de realizarse ensayos de microdureza y análisis microscópicos para poder correlacionar la microestructura con las propiedades mecánicas de cada uno de los aceros al carbono. De manera previa se realizará un análisis de carbono a cada una de las muestras de los aceros a trabajar, para así verificar que éstos se encuentran dentro del intervalo correspondiente al porcentaje de carbono establecido para cada tipo de acero.

### **3.3. Recolección de información**

- Consulta de manuales y especificaciones requeridas para diseñar el programa computacional para el cálculo de las series de trefilados de aceros al carbono.
- Consultas en Internet sobre tecnologías de procesos de trefilado.
- Revisión de textos sobre el cálculo de series de trefilados de aceros al carbono.
- Observación directa del comportamiento de los aceros al carbono en los ensayos de tracción, ensayos de microdureza y análisis

microscópicos para la creación de la base de datos para el diseño del programa.

- Entrevistas informales a ingenieros y personal de una empresa especializada en el trefilado de aceros al carbono.

### 3.4. Tipo de muestreo

Las muestras se distribuyeron por el tipo de acero al carbono a estudiar de la siguiente manera:

Para los ensayos de tracción se tomaron tres (3) muestras de cada uno de los aceros al carbono (SAE 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075), por lo que los ensayos se realizaron tres veces por tipo de acero, resultando un total de 21 muestras.

**Tabla 3.1. Muestras por tipo de acero para los ensayos de tracción.**

<b><i>Acero al carbono</i></b>	<b><i>1006</i></b>	<b><i>1008</i></b>	<b><i>1023</i></b>	<b><i>1035</i></b>	<b><i>1060</i></b>	<b><i>1065</i></b>	<b><i>1075</i></b>
<b><i>Nº de muestras</i></b>	3	3	3	3	3	3	3

Para diferenciar cada una de estas muestras, se identificaron con un código propio para cada tipo de acero de la siguiente manera:

T – XX – X

T: indica que se refiere a un ensayo de tracción.

XX: indica los dos últimos dígitos del tipo de acero a estudiar (06: *Acero 1006*)

X: indica el número de la muestra a estudiar (1, 2 o 3)

*Ejemplo:*

**Para el acero 1006:**

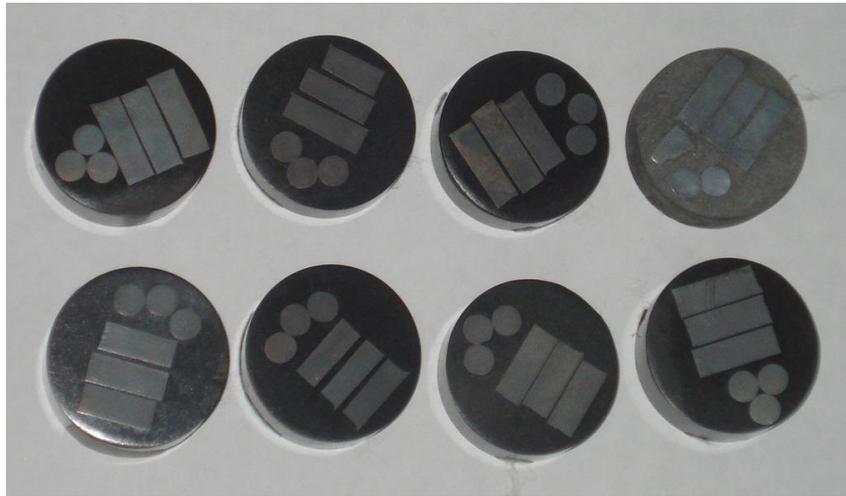
T-06-1: Tracción. Acero 1006. Muestra 1

T-06-2: Tracción. Acero 1006. Muestra 2

Para los ensayos de microdureza y análisis microscópico, se tomaron tres (3) muestras longitudinales y tres (3) muestras transversales de cada acero, resultando un total de seis (6) muestras por cada tipo de acero. Lo que implica un total de 42 muestras organizadas de la siguiente manera:

**Tabla 3.2. Muestras por tipo de acero para los ensayos de microdureza y análisis microscópico.**

<b>Acero al carbono</b>	<b>1006</b>	<b>1008</b>	<b>1023</b>	<b>1035</b>	<b>1060</b>	<b>1065</b>	<b>1075</b>
<b>Muestras longitudinales</b>	3	3	3	3	3	3	3
<b>Muestras transversales</b>	3	3	3	3	3	3	3
<b>Total de muestras en cada baquelita</b>	6	6	6	6	6	6	6



**Figura 3.1. Organización de las muestras en las baquelitas para los ensayos de microdureza y análisis microscópicos.**

Para los ensayos de microdureza, al igual que los ensayos de tracción, se hizo necesario identificar con un código cada uno de los ensayos realizados de la siguiente manera:

D – X – X – X – X – XX

D: indica que se refiere a un ensayo de microdureza.

X: indica la posición de la muestra tomada (L: longitudinal. T: transversal).

X: indica la ubicación de la muestra tomada (C: centro. B: borde).

X: indica el número de la muestra a estudiar (1, 2 o 3).

X: indica el número del ensayo de microdureza a realizar de una muestra ubicada en centro o en borde (1, 2, o 3).

XX: indica los dos últimos dígitos del tipo de acero a estudiar (06: *Acero 1006*)

*Ejemplo:*

**Para acero 1008:**

DLC11-08: Dureza. Longitudinal. Centro. Muestra 1. Ensayo 1. Acero 1008

DLB11-08: Dureza. Longitudinal. Borde. Muestra 1. Ensayo 1. Acero 1008

DTC11-08: Dureza. Transversal. Centro. Muestra 1. Ensayo 1. Acero 1008

DTB11-08: Dureza. Transversal. Borde. Muestra 1. Ensayo 1. Acero 1008

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas empleadas para la recolección de datos fueron la observación directa de los ensayos de tracción, ensayos de dureza y análisis microscópico que se aplicaron a las muestras, y el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada.

Los resultados obtenidos de estos ensayos están representados en tablas, gráficos y fotografías.

### 3.6. Equipos e instrumentos utilizados

Los diversos equipos o instrumentos utilizados para la toma de medidas son los siguientes:

- Máquina de ensayos universales. Marca GALDABINI. Modelo CTM 20).



**Figura 3.2. Máquina GALDABINI.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.*

- Embutidora Marca Buehler. Mod. Simplimet II.



**Figura 3.3. Embutidora Buehler.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.*

- Desbastadora Gruesa. Marca Leco. Mod. BG30. 80 grit



**Figura 3.4. Desbastadora Gruesa BG30.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad Simón Bolívar.*

- Desbastadora Fina. Marca Leco. Mod. DS 20. n° de lijas (240, 320, 400 y 600 grit)



**Figura 3.5. Desbastadora Fina DS 20.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad Simón Bolívar.*

- Pulidora. Marca Leco. Mod. GP 25. Abrasivo Pasta de diamante 1 micrón.



**Figura 3.6. Pulidora GP 25.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad Simón Bolívar.*

- Microdurómetro Marca Buehler. Mod. Indentament 1100.



**Figura 3.7. Microdurometro Buehler.**

*Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.*

- Microscopio Óptico. Marca Olympus Mod. PMG 3

### **3.7. Procedimiento experimental**

#### **3.7.1. Material utilizado:**

Las muestras de los alambrones de aceros al carbono SAE 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065,1075 utilizadas tienen una longitud inicial de 500 mm y un diámetro inicial que varía desde 5,4 mm hasta 5,7 mm. Éste material fue donado por una empresa trefiladora ubicada en la zona industrial de Valencia – Estado Carabobo.

#### **3.7.2. Composición química:**

En esta etapa, se evaluó el porcentaje de carbono presente en cada uno de los aceros, con el fin de verificar que el porcentaje de carbono obtenido correspondía al tipo de acero respectivo.

Esta información se obtuvo mediante un análisis de carbono al acero, realizado en una empresa trefiladora ubicada en la zona industrial de Valencia.

El análisis de carbono consiste en tomar una pequeña muestra (con un peso menor a 0,2 g) del acero al carbono a estudiar, el cual se coloca en un crisol de cerámica y se le agrega un acelerador para luego introducirlo en un analizador de carbono (horno) a elevadas temperaturas. El acelerador actúa como fundente para disolver y oxidar los recubrimientos exteriores con el fin de mejorar la fluidez del proceso de fundición, lo que permite que el carbono

de la muestra se oxide en un tiempo breve en una atmósfera de oxígeno para formar CO<sub>2</sub> que luego mide el porcentaje de carbono que posee la muestra mediante un detector infrarrojo.

**Tabla 3.3. Porcentaje de carbono de los aceros estudiados e intervalos establecidos por tipo de acero.**

<b>Muestra de acero</b>	<b>% de carbono</b>	<b>Intervalo establecido</b>
1006	0,068	(0,08 máx.)
1008	0,074	(0,10 máx.)
1023	0,222	(0,30 – 0,35)
1035	0,356	(0,35 – 0,40)
1060	0,653	(0,60 – 0,65)
1065	0,682	(0,65 – 0,70)
1075	0,793	(0,75 – 0,80)

### 3.7.3. Ensayo de tracción:

Las muestras son de sección completa y de una longitud total de 200 mm, dejando 50 mm a ambos extremos para la sujeción de las mordazas, obteniendo así una longitud efectiva de 100 mm.

La velocidad utilizada para realizar los ensayos de tracción fue de 5 mm/min. Se seleccionó en mínimo valor del intervalo especificado en la norma ASTM E8 *“Método estándar para ensayos de tracción de materiales*

*metálicos*”, la cual indica que el intervalo de velocidad de trabajo es de [5 - 50] mm/min.

Los ensayos se realizaron utilizando un software diseñado para trabajar en conjunto con la máquina de tracción, el cual permite observar en pantalla el desarrollo del proceso mediante una gráfica que refleja el desplazamiento del cabezal a medida que se aplica la carga hasta el momento después de la fractura. Luego de culminar el ensayo, el software tiene la opción de guardar los datos e imprimir la gráfica proporcionando los valores de carga vs deformación para el posterior estudio. (ver Apéndice A).

Los ensayos de tracción se realizaron tres (3) veces por cada tipo de acero. Esto con el fin de comparar los resultados entre sí y verificar que todas las gráficas de un mismo acero adquieran igual tendencia sin importar la diferencia entre sus diámetros. Por otra parte, esto también es útil si uno de los ensayos presenta error, ya que se puede descartar éste y seguir trabajando con las dos restantes.

Con la realización de los ensayos de tracción, se obtuvieron los valores de carga instantánea y desplazamiento del cabezal, pero debido a la formación del cuello, producto de la estricción localizada, lo cual limita el uso de este ensayo a operaciones de conformado que no involucran grandes deformaciones plásticas. Sin embargo, existe una metodología, conocida como la corrección de Bridgman, la cual es aplicable a muestras de sección circular, que de alguna manera compensa este efecto.

Inicialmente debe realizarse la corrección de eje de los resultados obtenidos del ensayo de tracción (hasta la rotura). Por efecto del deslizamiento que ocurre entre la muestra y los cabezales de la máquina que sujetan la muestra, el verdadero proceso de tracción de la probeta no

comienza sino hasta que los cabezales se encuentren fijos (sin deslizar), es por ello que se hace necesario corregir el eje de manera de que la curva comience del origen de coordenadas.

Luego de la corrección del eje, se procede a calcular el esfuerzo nominal o de ingeniería de la siguiente manera:

$$S = \frac{F_i}{A_0} \quad (3.1)$$

donde:

S: Esfuerzo nominal o ingenieril.

F<sub>i</sub>: Carga aplicada.

A<sub>0</sub>: Área de la sección inicial de la muestra.

Seguidamente se calcula la deformación nominal o de ingeniería de la siguiente manera:

$$e = \frac{\Delta l_{\text{corregido}}}{L_0} \quad (3.2)$$

donde:

e: Deformación nominal o de ingeniería.

L<sub>0</sub>: Longitud inicial de la muestra.

A continuación se calcula el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.4)$$

donde:

$\sigma$ : Esfuerzo verdadero.

S: Esfuerzo nominal o de ingeniería.

e: Deformación nominal o de ingeniería.

$\varepsilon$ : Deformación verdadera.

Todas estas ecuaciones son válidas hasta carga máxima, ya que es hasta allí donde se cumple la conservación de volumen. Por lo tanto, para determinar los valores de esfuerzo y deformación desde el inicio de estricción hasta la fractura, se puede recurrir a la corrección de Bridgman, aplicable solo a muestras de sección transversal circular. La corrección de Bridgman consiste en determinar los valores de  $\sigma$  y  $\varepsilon$  reales en el momento de la fractura, como si no ocurriera formación del cuello.

Para hacer la corrección por efectos de la estricción localizada en muestras de sección circular haciendo uso de la corrección de Bridgman, debe determinarse la deformación verdadera a la fractura, deformación verdadera a carga máxima y el esfuerzo promedio:

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (3.5)$$

donde:

$\varepsilon_f$ : Deformación verdadera a la fractura.

$A_0$ : Área de la sección transversal inicial de la muestra.

$A_f$ : Área de la sección transversal a la fractura de la muestra.

$$\varepsilon_u = \ln(1 + e_u) \quad (3.6)$$

donde:

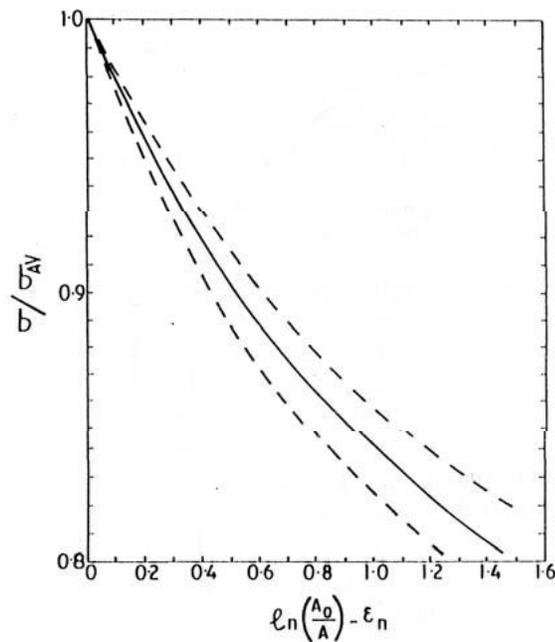
$\epsilon_u$ : Deformación verdadera a máxima carga.

$e_u$ : Deformación a máxima carga.

Con la diferencia  $\epsilon_f - \epsilon_u$  se ingresa a la curva maestra de corrección mostrada en la figura 3.8, para obtener la relación entre el esfuerzo corregido a la fractura  $\sigma$  y el esfuerzo promedio  $\sigma_{av}$ .

El esfuerzo promedio se obtiene de la siguiente manera:

$$\sigma_{av} = \frac{F_{fractura}}{A_{fractura}} \tag{3.7}$$



**Figura 3.8. Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman. (Cabello, 2006)**

Luego de realizar estas correcciones, finalmente se grafican las curvas esfuerzo verdadero vs deformación verdadera de cada tipo de acero. Partiendo de estas curvas, se puede obtener más adelante, los valores del esfuerzo de fluencia y los valores de  $n$  y  $k$  necesarios para la alimentación del programa.

#### 3.7.4. Análisis microscópico:

El análisis microscópico se realizó bajo las siguientes normas:

**ASTM E 3:** Preparación metalográfica.

**ASTM E 407:** Método estándar para el ataque de metales y aleaciones.

Para realizar este procedimiento, las muestras fueron cortadas de la siguiente manera: tres (3) muestras longitudinales de 15 mm de longitud y tres (3) muestras transversales de 10 mm de longitud, para cada tipo de acero, embutiéndolas posteriormente.

El material usado para embutir fue baquelita.

La preparación y análisis microscópico de las muestras se realizó en las Instalaciones del Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Universidad Simón Bolívar.

La preparación metalográfica se realizó bajo el método del desbaste grueso. Utilizando inicialmente la desbastadora gruesa con un número de lija 80, para luego continuar con un desbaste fino utilizando la desbastadora fina

con números de lijas 240, 320, 400 y 600, eliminando de esta manera cualquier posible raya o marca debido al corte.

Al tener desbastadas las muestras, se procedió con el ataque, utilizando como reactivo químico **nital al 5%**: etanol 95 ml, ácido nítrico 5 ml.

El procedimiento aplicado para el ataque químico fue el siguiente: primero se le aplicó el reactivo sobre la superficie, se dejó el ataque durante un intervalo de 10 a 15 segundos hasta que la superficie se tornó un poco opaca. Seguidamente de ello se limpiaron las muestras introduciendo las mismas en un envase que contenía agua y etanol, para luego secarlas con un secador con el propósito de eliminar posible humedad y evitar el óxido de las mismas.

Finalmente, para lograr una superficie tipo espejo totalmente lisa, libre de rayas o marcas, se pulieron las muestras, aplicándole durante el proceso de pulido, el abrasivo pasta de diamante 1 micrón. Luego de pulidas, se procedió nuevamente a atacarlas con nital al 5% siguiendo el procedimiento anteriormente descrito. Las muestras se atacaron dos (2) veces, ya que el primer ataque fue para terminar de retirar las impurezas, rayas y otras imperfecciones que aun quedaban con el primer pulido; mientras que el segundo ataque fue para finalmente analizar las muestras.

Luego de preparar las muestras, se procede a evaluar la metalografía microscópica con la finalidad de observar y analizar la microestructura de cada acero. Se analizó la microscopía tanto en el borde como en el centro de la muestra para realizar comparaciones entre ellas.

Para realizar el análisis microscópico a los diferentes tipos de aceros al carbono, se tomaron fotografías a 100X, 200X, 500 X y 1000X en el borde y

centro de cada una de las muestras. Esto para tener una mejor apreciación de la microestructura del acero con diferentes aumentos.

### 3.7.5. Ensayo de microdureza:

Estos ensayos se realizaron bajo la norma ASTM E384 *“Método estándar para microdureza de materiales”*.

Para realizar los ensayos de microdureza, se utilizaron las muestras embutidas en la baquelita que fueron previamente sometidas al ataque y análisis microscópico. Se evaluó la microdureza tomando tres mediciones en el borde y tres en el centro de cada una de las muestras, originando así un total de 36 mediciones por cada baquelita. Obteniéndose finalmente un total de 288 mediciones de microdureza vickers.

El ensayo tiene como finalidad cuantificar la microdureza del material, para así comparar la variación de este parámetro para los diferentes tipos de aceros en estudio.

### 3.8. Parámetros obtenidos de los ensayos

Los parámetros obtenidos de los ensayos de tracción son:  $S_u$  (Esfuerzo último), % de alargamiento,  $S_y$  (Esfuerzo de fluencia),  $\sigma$  (Esfuerzo verdadero) y  $\epsilon$  (Deformación verdadera).

De los análisis microscópicos, se obtuvieron las fotos del estudio de la microscopía con aumentos de 100X, 200X, 500X y 1000X de cada uno de los aceros al carbono, observando así la microestructura de los mismos.

Del ensayo de microdureza se obtuvo la microdureza vickers (HV) para cada una de las muestras, obteniendo así un promedio de microdureza por acero.

Los datos obtenidos de los ensayos de tracción, que se tomaron en cuenta para la alimentación del programa computacional que permite el cálculo de las series de trefilas de aceros al carbono, son:  $\sigma$  (Esfuerzo verdadero) y  $\epsilon$  (Deformación verdadera).

Los resultados obtenidos de los análisis microscópicos y de los ensayos de microdureza, fueron utilizados como complemento del programa, proporcionando al operador una fotografía y nota informativa sobre al acero que se está trabajando.

### 3.9. Especificaciones del programa elaborado

El programa elaborado es de fácil manejo para el operador, no presenta dificultad alguna a la hora de ponerlo en práctica. El riesgo de ser alterado accidentalmente por parte de los operadores del mismo es casi nulo.

Los datos que el operador debe suministrar al programa (datos de entrada) son los siguientes: Tipo de acero al carbono a trefilar, Coeficiente de fricción, diámetro inicial del alambón ( $D_o$ ), diámetro final del alambón ( $D_f$ ), diámetro del cabrestante ( $D_{\text{cabrestante}}$ ), semiángulo del dado ( $\alpha$ ) y potencia del motor disponible ( $Pot$ ). Una vez ingresados estos datos y que se selecciona la opción "CALCULAR", el programa comenzará determinando el número de pasadas y diámetros intermedios. Estos valores se obtendrán mediante la ecuación 2.1., donde el porcentaje de reducción va disminuyendo a razón de 0,5 % a partir del mayor valor dentro del intervalo recomendado (25%), esto con la finalidad de controlar la velocidad del trefilado y el porcentaje de acumulación en los tambores. Seguidamente se realiza el cálculo de la fuerza del trefilado, la misma se obtiene resolviendo la ecuación 2.11 y la ecuación 2.15. Con la fuerza, se calculan las velocidades lineales.

La primera velocidad lineal (Velocidad lineal el primer motor) se obtiene resolviendo la ecuación:

$$V = \frac{Pot}{F_{\text{xt}}} \quad (3.8)$$

Para obtener las velocidades del resto de los motores, se utiliza la siguiente relación de velocidades:

$$V_2 = \left( \frac{D_1}{D_2} \right) V_1 \quad (3.9)$$

Esta ecuación se obtuvo realizando un balance de energía en el dado de la primera pasada, siendo el punto 1, la entrada del alambre hacia el dado; y el punto 2, la salida del mismo.

Luego de calcular todas las velocidades, el programa verifica que estas se encuentren dentro del intervalo máximo permisible de velocidades para el acero al carbono en estudio, esto con la finalidad de asegurar que no ocurra rotura del alambre. La comparación se realiza con base en las velocidades máximas permisibles proporcionada por la empresa trefiladora. Si las velocidades obtenidas por el programa superan las velocidades máximas, el mismo tiene la capacidad de realizar un recálculo y proporcionar al operador una serie con velocidades adecuadas para evitar la rotura.

Al obtener todas las velocidades lineales, el programa calcula las velocidades angulares a la que gira cada motor, resolviendo la siguiente ecuación:

$$W = \frac{V}{r_{\text{cabrestante}}} \quad (3.10)$$

Al finalizar todos estos cálculos mencionados, el programa arroja la solución de la serie: número de pasadas del trefilado, porcentaje de reducción por cada pasada (%reducción), diámetros intermedios ( $D_i$ ), velocidad lineal y angular de cada motor ( $V$ ,  $W$ ).

Como información adicional, el programa muestra una fotografía de la microscopía del acero con el que se está trabajando, además de un valor promedio de la microdureza vickers (HV) del mismo.

El programa está diseñado para que evalúe en la serie calculada la posible presencia del fenómeno de estallido central (central bursting). En caso de que ocurra este problema, el programa enviará un aviso alertando de esta situación e informando al operador que se realizará un recálculo de la serie variando el ángulo de la trefila, de manera que no haya posibilidad de que ocurra estallido central (central bursting).

### **3.10. Realización del algoritmo del programa**

Como primer paso se declararon las variables tanto públicas como privadas, las cuales estarán disponibles para todos los procedimientos y funciones del programa. Estas se encuentran clasificadas según su tipo (simple, doble, entero, entre otros).

Adicional a las variables, son declaradas también las constantes necesarias para el desarrollo del programa requerido. Se crea el formulario y a este se le agregan los botones de la barra de herramientas necesarios para desarrollar lo deseado.

A continuación, se programa de forma modular las ecuaciones, sus funciones y condiciones, serán utilizadas las sentencias de control y los operadores necesarios.

Se usa este tipo de programación (modular) ya que es necesario que el programa se divida en componentes con nombres y ubicaciones determinadas

que se integran de manera independiente, además de facilitar la comprensión del programa.

Una vez finalizado este procedimiento se repite de manera cíclica el procedimiento anterior debido a que es necesario realizar varios cálculos previos antes de obtener el resultado final.

### **3.11 Aplicación del programa a un caso práctico**

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del programa con los parámetros utilizados en un proceso de trefilado a nivel industrial, se realizó una comparación con una serie calculada por una empresa trefiladora de aceros al carbono.

Para realizar esta comparación y verificación del correcto funcionamiento del programa, realizó una visita guiada a una empresa trefiladora especialista en aceros al carbono ubicada en la Zona Industrial de Valencia, Edo. Carabobo. En dicha visita fue posible observar detalladamente el proceso de trefilado, además de obtener información aportada por el personal especializado a cargo de la ejecución y supervisión del trabajo.

La serie suministrada por la empresa fue utilizada para trefilar un alambón de acero 1008 con un diámetro de 5,5 mm; el cual se redujo a un diámetro de 2 mm. Se utilizó un ángulo de trefila de  $10^\circ$  y la potencia de los motores disponibles eran de 10 hp. Esta reducción se llevó a cabo utilizando ocho (8) dados con diámetros de salida (diámetros intermedios) de 4,785 mm,

4,177 mm, 3,682 mm, 3,249 mm, 2,871 mm, 2,541 mm, 2,251 mm y 2 mm. Para obtener estos diámetros, los porcentajes de reducción para cada pasada fueron 24,3%, 23,8%, 22,3%, 22,1%, 21,9%, 21,7%, 21,5% y 21,05% respectivamente.

Además de estos resultados, los motores trabajaron aproximadamente a las siguientes velocidades: 450 m/min, 520 m/min, 590 m/min, 670 m/min, 750 m/min, 850 m/min, 960 m/min y 1080 m/min.

Al comparar esta serie con una arrojada por el programa, se introdujeron los datos de entrada en el programa, como se muestra en la figura 3.9.:

Tipo de Acero: 1008

Diámetro inicial: 5,5 mm

Diámetro final: 2 mm

Ángulo de la trefila: 10°

Potencia de cada motor: 10 hp

Diámetro del cabrestante: 650 mm.

The screenshot shows a software window titled "TREFILADO" with two main sections: "Datos de Entrada" and "Resultados".

**Datos de Entrada:**

- Tipo de Acero: 1008
- Coefficiente de Fricción: 0.5
- Angulo de Trefila: 10
- Diámetro Inicial Do (mm): 5.5
- Potencia (Hp): 10
- Diámetro Final Df (mm): 2
- Diámetro Cabrestante (mm): 650

**Resultados:**

Número de Pasadas:

Trefilado con % de Reducción Variable			Velocidades de la Serie	
Nro De pesadas	Diámetro Final (mm)	% de Reducción	Velocidad Lineal (m/min)	Velocidad Angular (rpm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Buttons: CALCULAR, SALIR

**Figura 3.9. Ilustración de los datos de entrada introducidos en el programa diseñado**

Luego de introducir los datos en el programa, se selecciona la opción “CALCULAR” para que el programa de inicio a las operaciones y muestre los resultados, como se observa en la figura 3.10.:

**TREFILADO**

**Datos de Entrada**

Tipo de Acero: 1008      Angulo de Trefila: 10

Diámetro Inicial Do (mm): 5.5      Potencia (Hp): 10

Diámetro Final Df (mm): 2      Diámetro Cabrestante (mm): 650

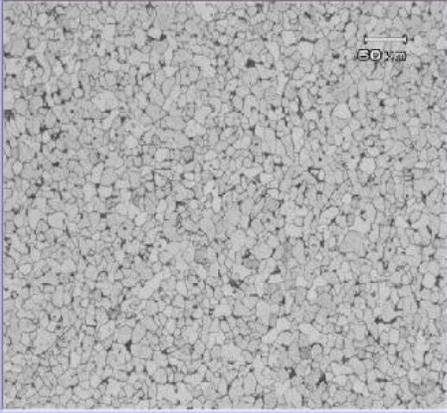
**Resultados**

Número de Pasadas: 8

Trefilado con % de Reducción Variable			Velocidades de la Serie	
Nro De pasadas	Diámetro Final (mm)	% de Reducción	Velocidad Lineal (m/min)	Velocidad Angular (rpm)
0	5,5	0	0,00	0,00
1	4,76	25	440,53	12,94
2	4,74	24,5	506,51	14,88
3	3,61	24	580,87	17,07
4	3,16	23,5	663,59	19,50
5	2,77	23	757,02	22,24
6	2,44	22,5	859,40	25,25
7	2,15	22	975,32	29,66
8	2,00	13,7	1048,47	30,81

Acero 1008, Microscopia a 100X, Dureza 118.42 HV

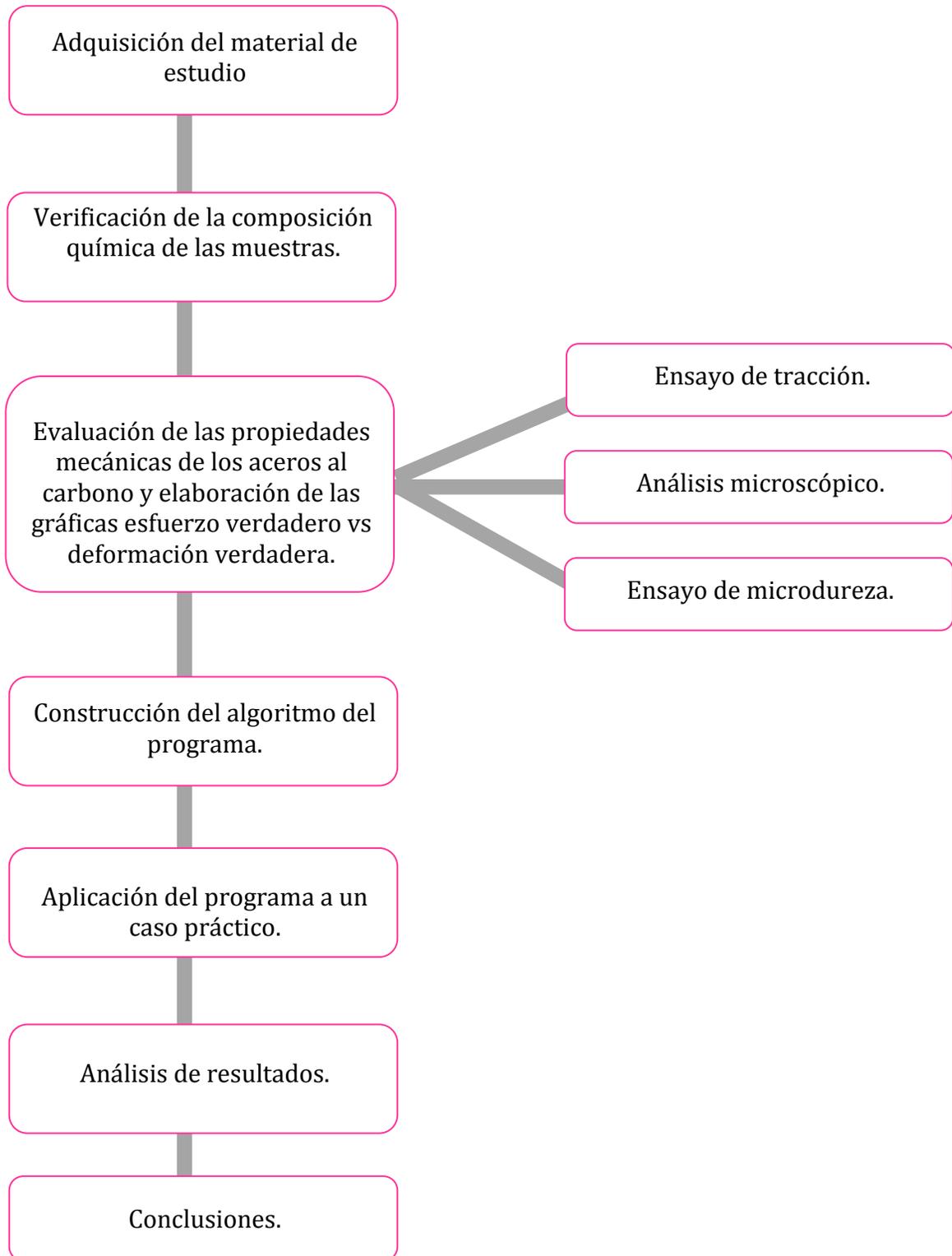
CALCULAR      SALIR



**Figura 3.10. Ilustración de la serie arrojada por el programa.**

En la figura 3.10, se observa el resultado de la serie calculada por el programa. Con estos resultados obtenidos, se realiza una comparación con los datos experimentales proporcionados por la empresa trefiladora, con la finalidad de emitir un juicio de valor de acuerdo a los resultados obtenidos.

### 3.12 Flujograma metodológico



# CAPÍTULO 4

## *Resultados*

---

---

### 4.1. Ensayos de tracción

En las siguientes tablas y gráficos, se muestran los resultados de los ensayos de tracción para cada uno de los diferentes tipos de acero a estudiar.

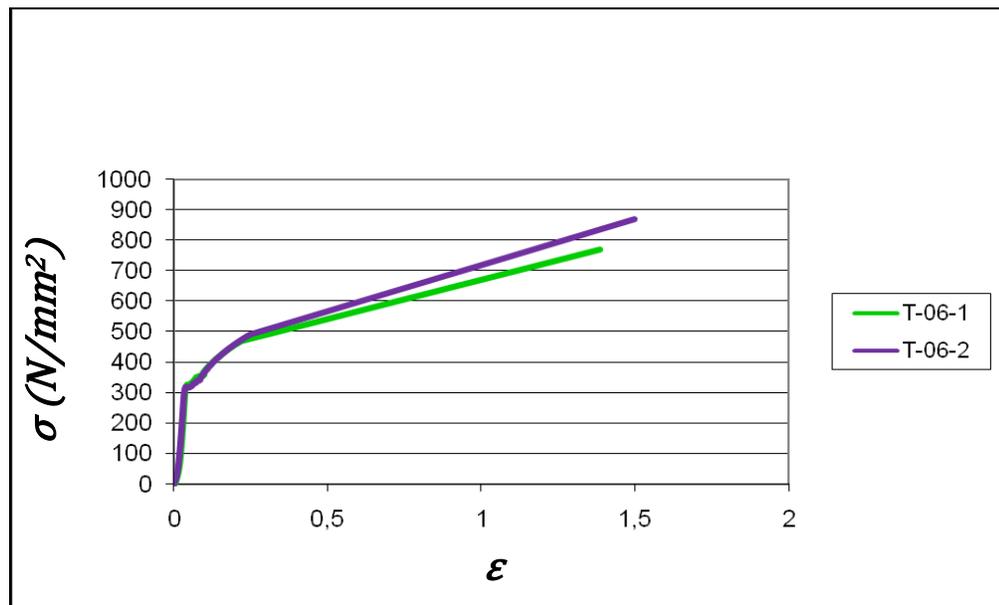


Figura 4.1. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.

Acero 1006.

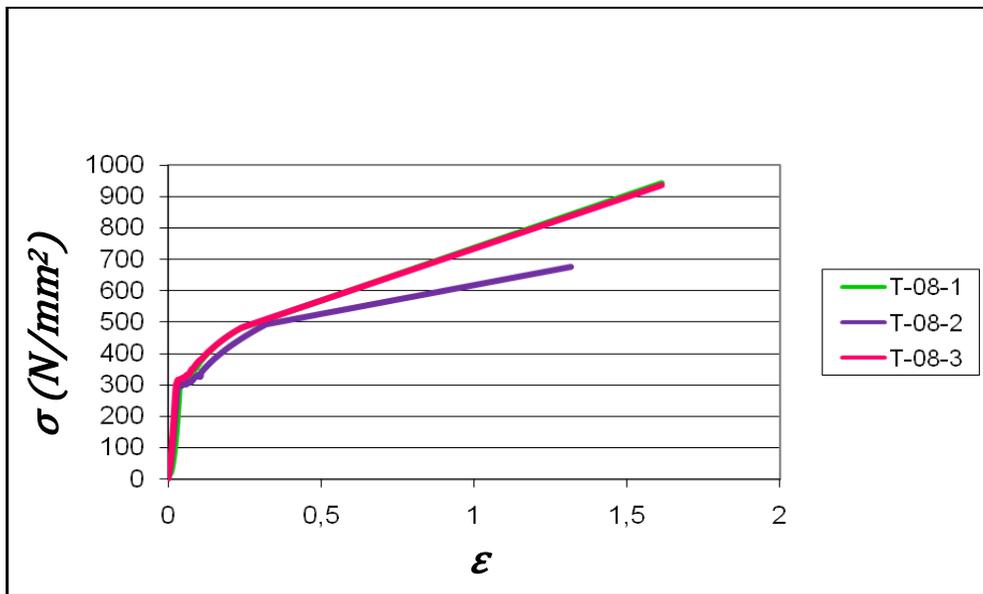


Figura 4.2. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1008.

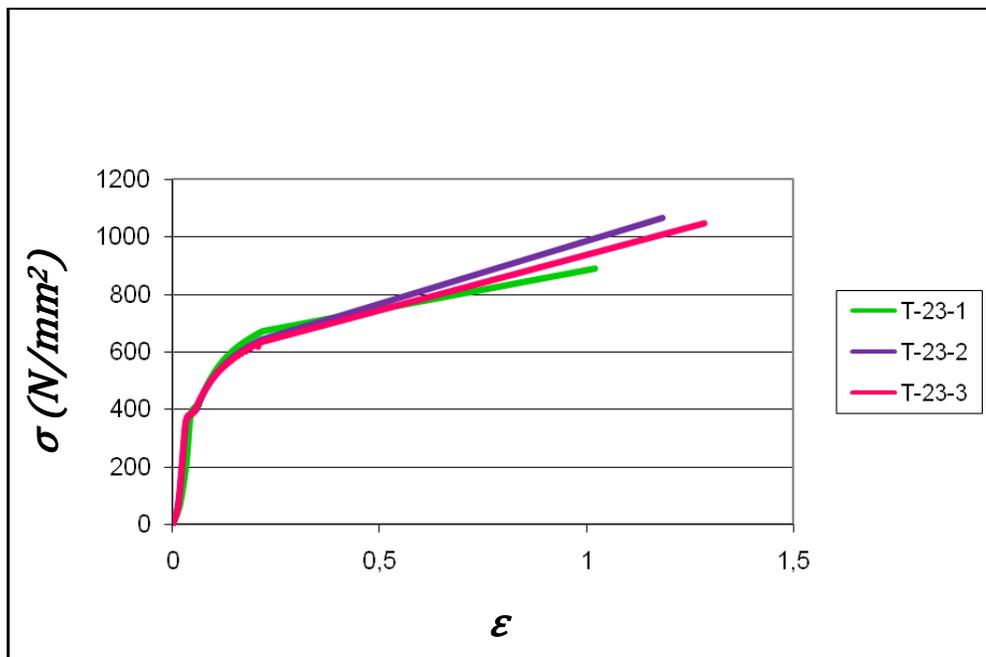
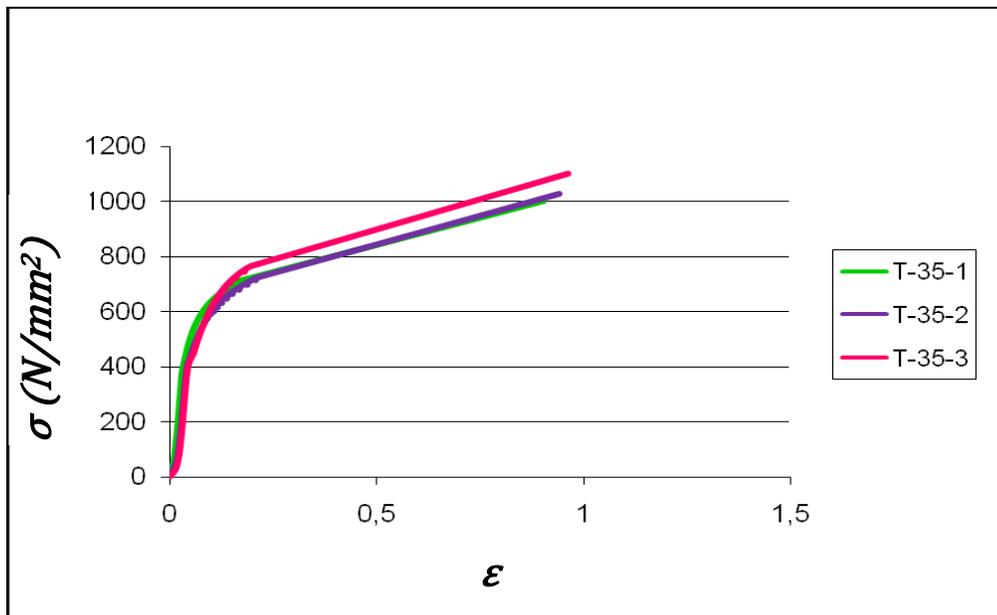
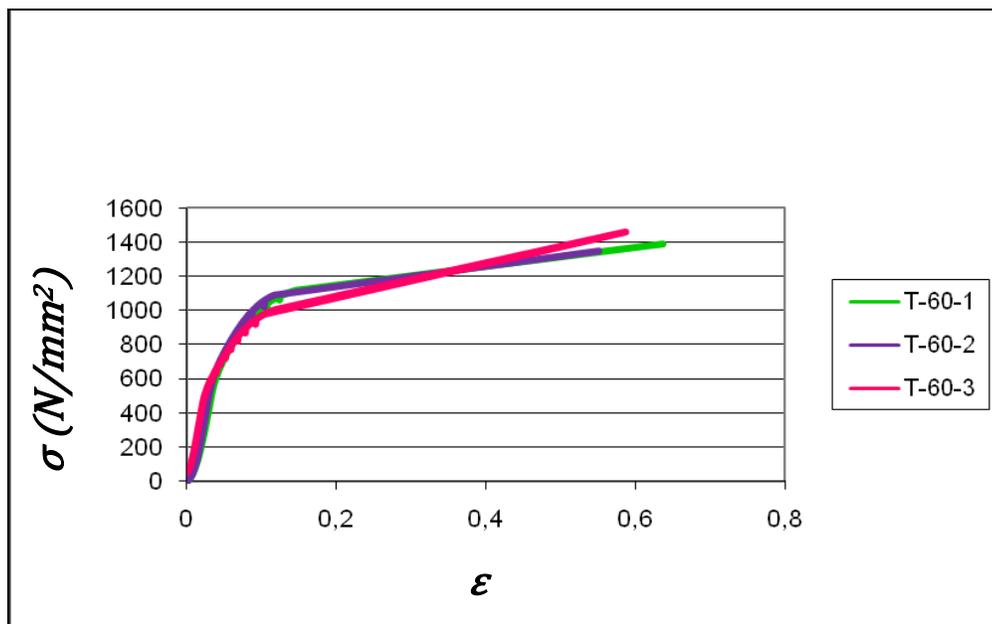


Figura 4.3. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1023.



**Figura 4.4. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1035.**



**Figura 4.5. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1060.**

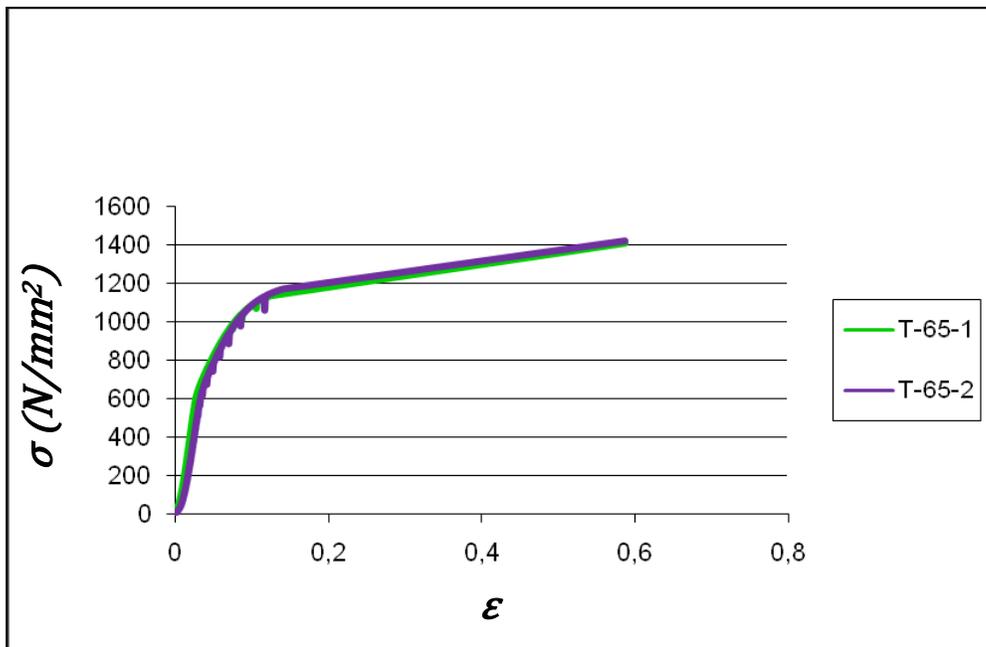


Figura 4.6. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1065.

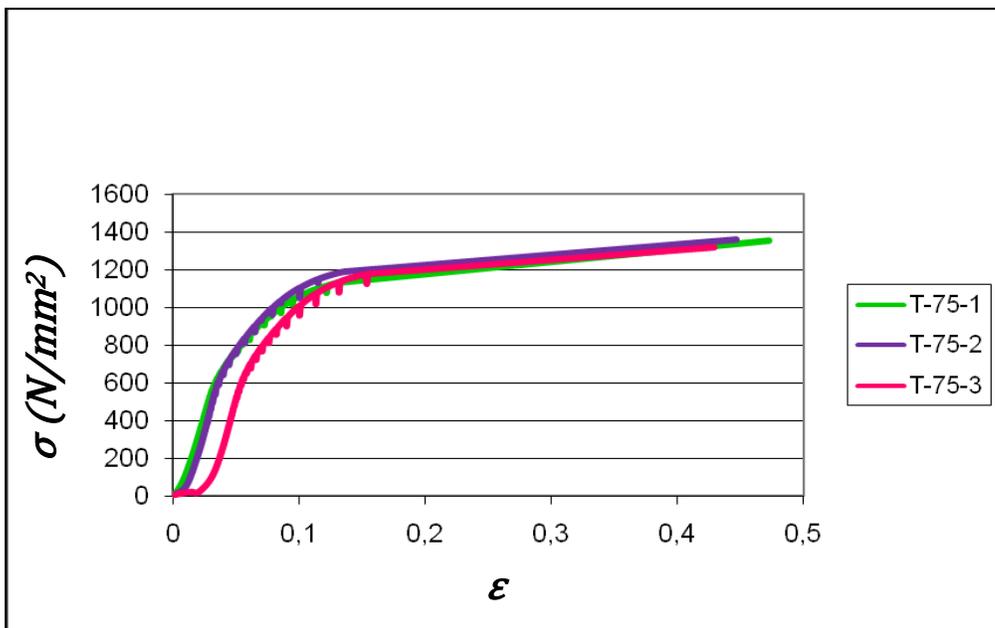
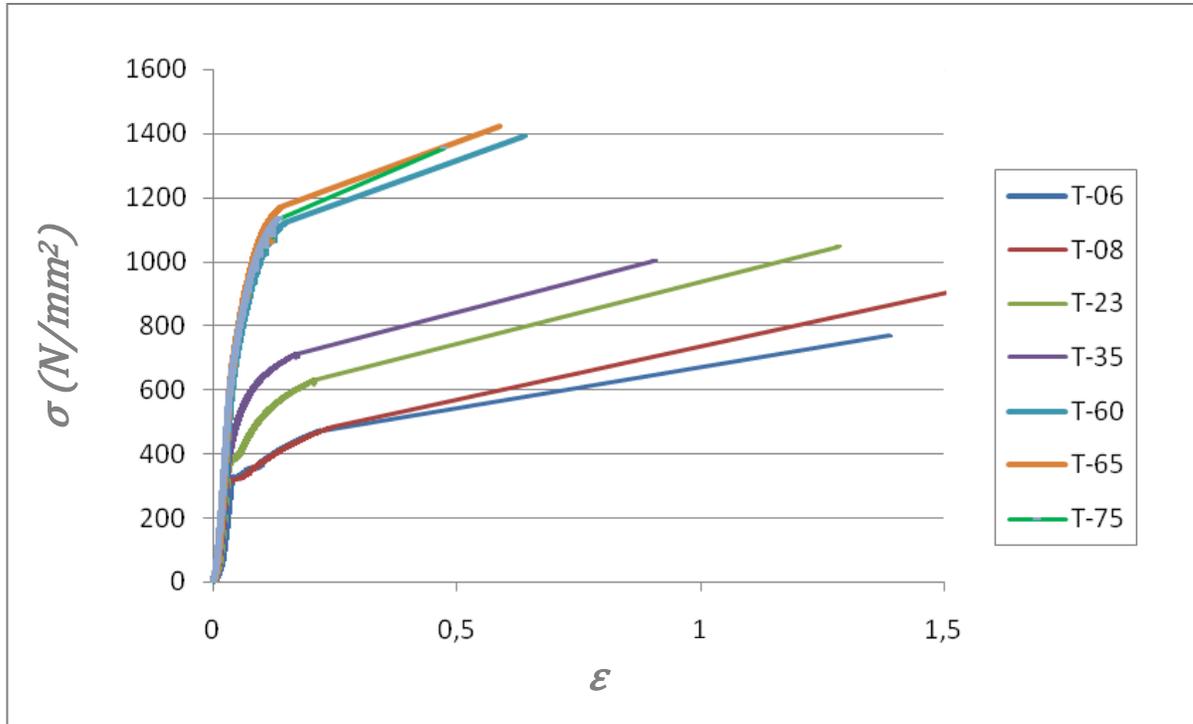


Figura 4.7. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Acero 1075.



**Figura 4.8. Gráfico esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera.  
Para los aceros estudiados.**

**Tabla 4.1. Resultados de ensayos de tracción de los diferentes tipos de aceros al carbono.**

Acero	Muestra	Su (Kgf)	Alargamiento (%)	Sy (Kgf)	$\sigma_f$ (Kgf)	$\epsilon_f$
1006	1	378,19	22,1	301,50	771,47	1,38
	2	383,06	23,7	276,24	869,73	1,49
	3	<i>Se eliminó muestra ya que la ruptura del material se presento fuera de la longitud entre marcas.</i>				
	<b>Promedio</b>	<b>380,63</b>	<b>22,9</b>	<b>288,87</b>	<b>820,60</b>	<b>1,44</b>
1008	1	378,84	20	285,34	943,03	1,61
	2	358,70	31	284,16	677,82	1,31
	3	379,98	24,8	289,80	938,25	1,61
	<b>Promedio</b>	<b>372,51</b>	<b>25,26</b>	<b>286,43</b>	<b>853,03</b>	<b>1,51</b>
1023	1	540,44	19,1	355,49	889,86	1,02
	2	518,14	20,7	346,60	1064,58	1,18
	3	511,96	18,2	337,64	1047,11	1,28
	<b>Promedio</b>	<b>523,51</b>	<b>19,3</b>	<b>346,58</b>	<b>1000,51</b>	<b>1,16</b>
1035	1	600,29	20	356,75	1003,40	0,90
	2	585,78	19,8	356,14	1026,51	0,94
	3	628,70	27,4	341,14	1100,81	0,96
	<b>Promedio</b>	<b>604,92</b>	<b>22,4</b>	<b>348,01</b>	<b>1043,58</b>	<b>0,93</b>
1060	1	969,51	11	495,49	1393,18	0,63
	2	970,29	11,7	457,59	1347,91	0,55
	3	894,55	12	69,15	1461,92	0,58
	<b>Promedio</b>	<b>944,78</b>	<b>11,56</b>	<b>340,74</b>	<b>1401</b>	<b>0,59</b>
1065	1	1000,19	10,8	507,78	1406,85	0,58
	2	1017,37	10	231,70	1422,63	0,58
	3	<i>Se eliminó muestra ya que la ruptura del material se presento fuera de la longitud entre marcas.</i>				
	<b>Promedio</b>	<b>1008,78</b>	<b>10,4</b>	<b>369,74</b>	<b>1414,743</b>	<b>0,58</b>
1075	1	992,02	10,1	489,11	1355,44	0,47
	2	1036,52	9,7	546,96	1357,58	0,44
	3	1006,99	9	248,9	1316,79	0,42
	<b>Promedio</b>	<b>1011,84</b>	<b>9,6</b>	<b>428,33</b>	<b>1343,27</b>	<b>0,44</b>

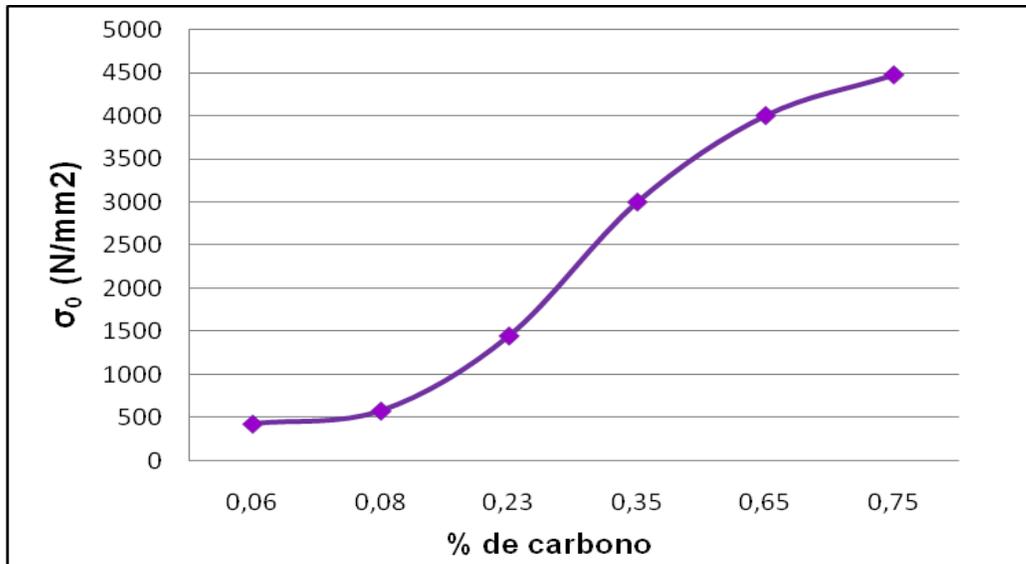
#### 4.1.1 Valores de n y k para el cálculo de esfuerzo

Para realizar un análisis de la zona elástica y la zona plástica, fue necesario realizar un estudio de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de los ensayos con esfuerzo uniaxial (ensayo de tracción). Las curvas de esfuerzo verdadero y deformación verdadera, fueron comparadas con las curvas de fluencia teóricas para materiales ideales, dando como resultado una similitud con la curva del material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal (elasto-plástico). Al obtener dicha similitud, se consiguen las ecuaciones utilizadas en plasticidad  $\sigma = k \cdot \epsilon^n$  para la zona plástica y  $\sigma = E \cdot \epsilon$  para la zona elástica. Se grafican dichas curvas en escala bilogarítmica para cada tipo de acero, de estas se obtienen los valores de  $\sigma_0$ , n y k. Los valores de  $\sigma_0$  (esfuerzo de fluencia) se obtienen mediante el *Método del Desplazamiento*, k representa el esfuerzo para una deformación natural igual a uno y se le denomina coeficiente de resistencia, n es conocido como coeficiente de endurecimiento por deformación y es numéricamente igual a la deformación última  $\epsilon_u$  del material. (Aparicio, Armas, & Ciaccia, 2007)

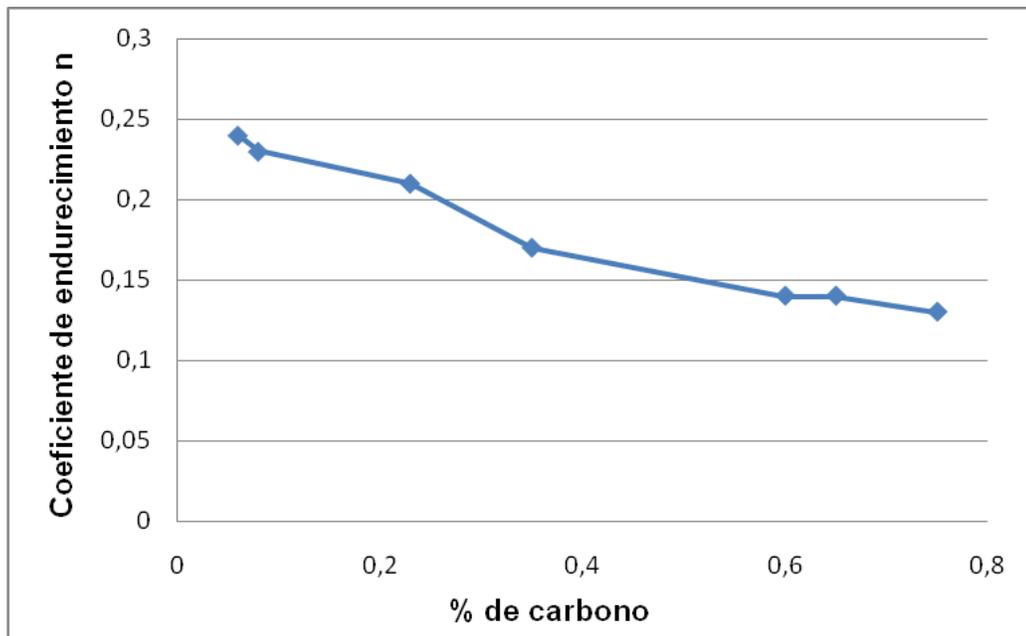
Estos son parámetros variables de acuerdo al porcentaje de carbono existente en el acero. Estos datos serán usados para el cálculo del esfuerzo, el cual es uno de los datos fundamentales para obtener los resultados proporcionados por el programa.

Tabla 4.2. Valores de  $\sigma_0$ , n y k.

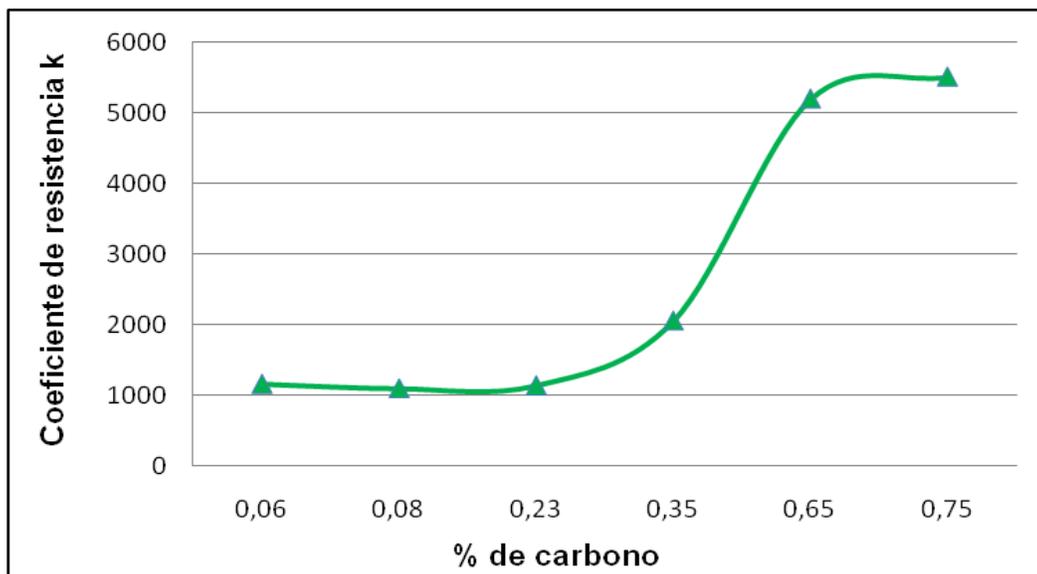
Acero	$\sigma_0(N/mm^2)$	n	k
1006	700	0,24	1169.127
1008	430,76	0,23	1104.545
1023	581,63	0,21	1145.883
1035	1450	0,17	2061.02
1060	3000	0,14	5959.546
1065	4000	0,14	5196.85
1075	4470,58	0,13	5507.598

Figura 4.9. Gráfico  $\sigma_0$  vs. % carbono.

Para los aceros estudiados.



**Figura 4.10. Gráfico factor n vs. % carbono.  
Para los aceros estudiados.**



**Figura 4.11. Gráfico factor k vs. % carbono.  
Para los aceros estudiados.**

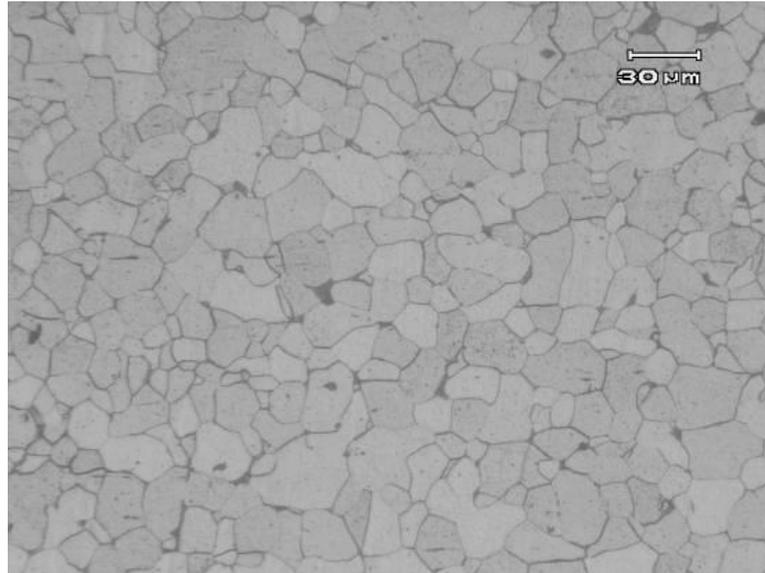
## **4.2. Análisis microscópico**

En las figuras que se muestran a continuación se pueden observar las fotografías tomadas a las muestras de un acero de bajo carbono (1006) y un acero de alto carbono (1075) durante el análisis microscópico aplicado de cada uno; con el fin de determinar la microestructura de los aceros.

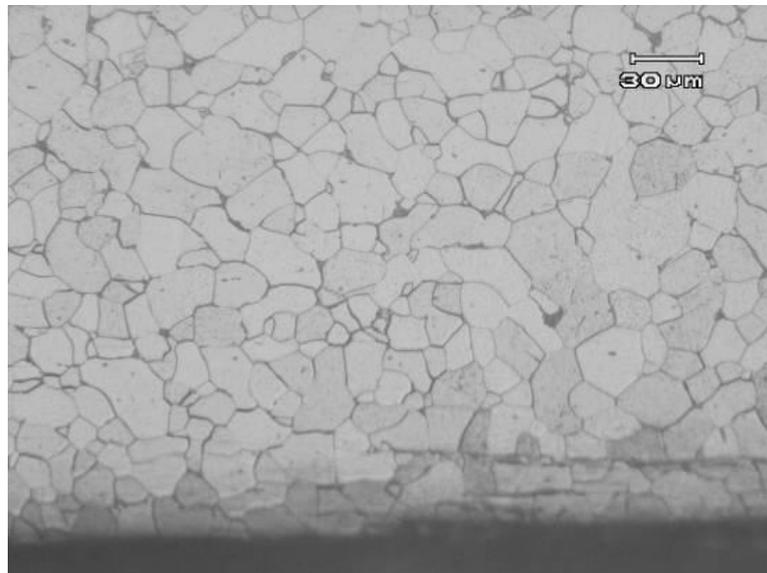
Las fotografías a un aumento de 200X de cada uno de los aceros al carbono estudiados se encuentran en el Apéndice B.

## ACERO 1006

### *Muestras Longitudinales*

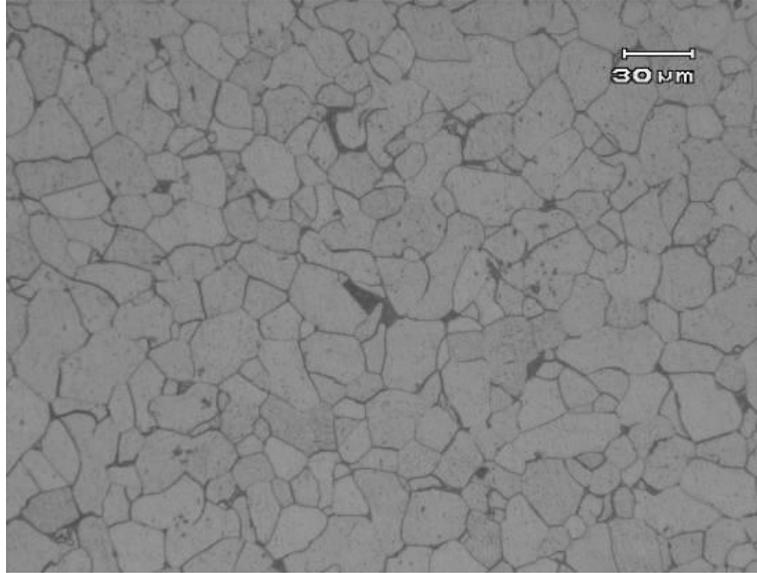


**Figura 4.12. Microestructura longitudinal.  
Acero 1006 en centro. (200X).**

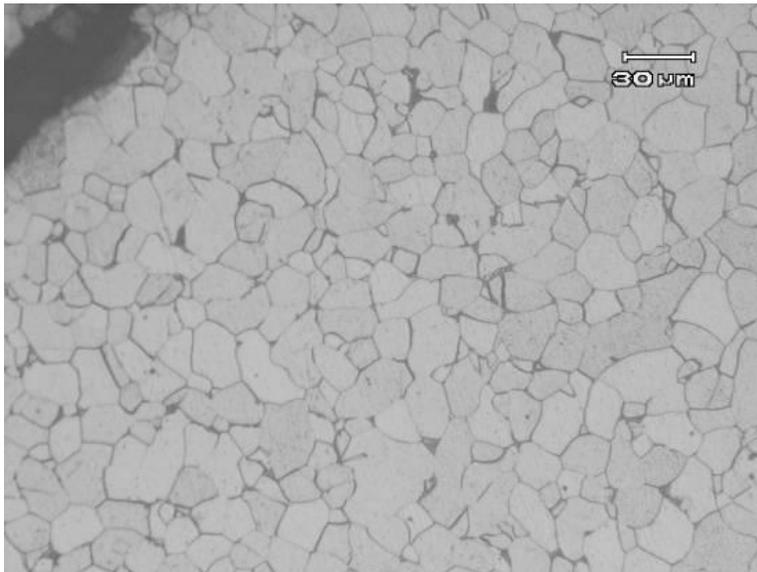


**Figura 4.13. Microestructura longitudinal  
Acero 1006 en borde. (200X).**

## **Muestras Transversales**



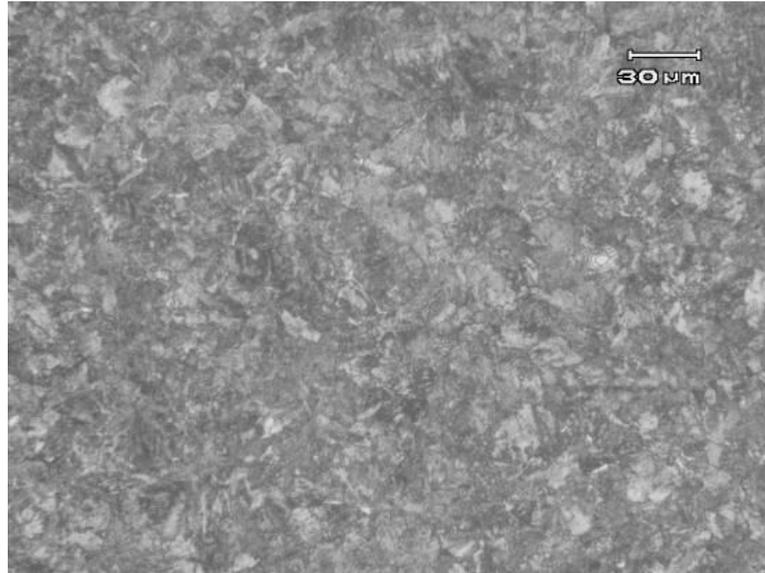
**Figura 4.14. Microestructura transversal.  
Acero 1006 en Centro. (200X).**



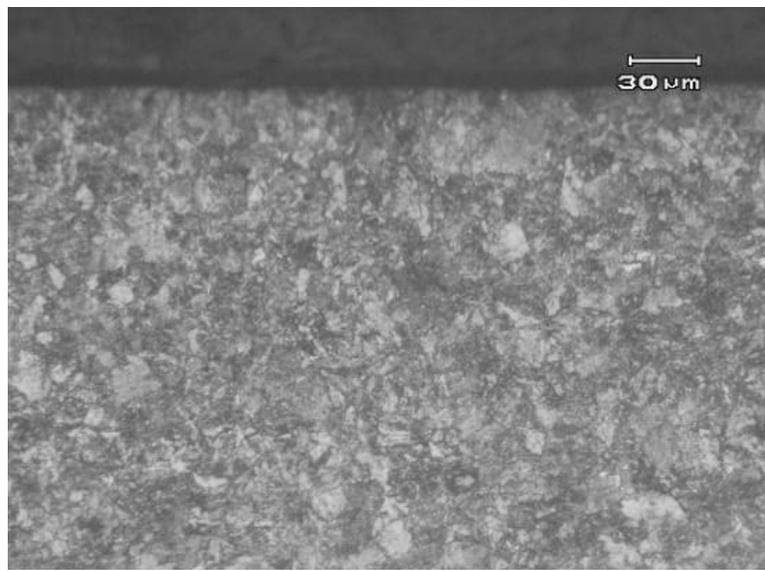
**Figura 4.15. Microestructura transversal.  
Acero 1006 en Borde. (200X).**

## ACERO 1075

### *Muestras Longitudinales*

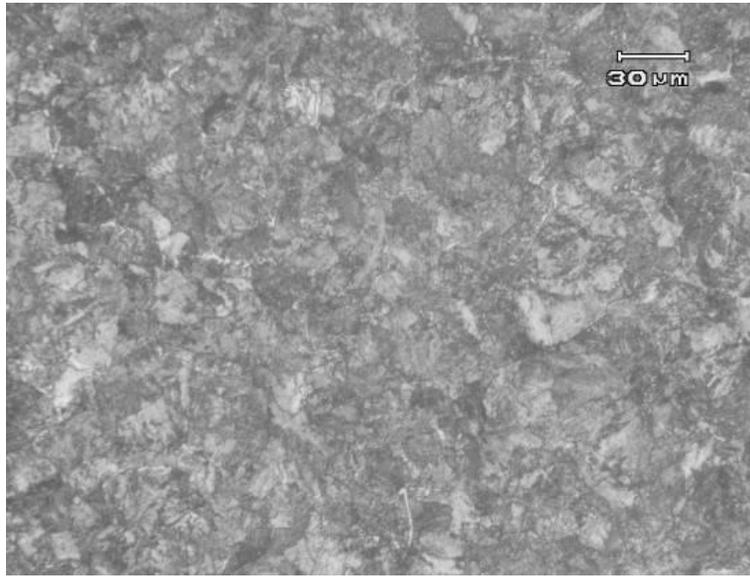


**Figura 4.16. Microestructura longitudinal.  
Acero 1075 en centro. (200X).**

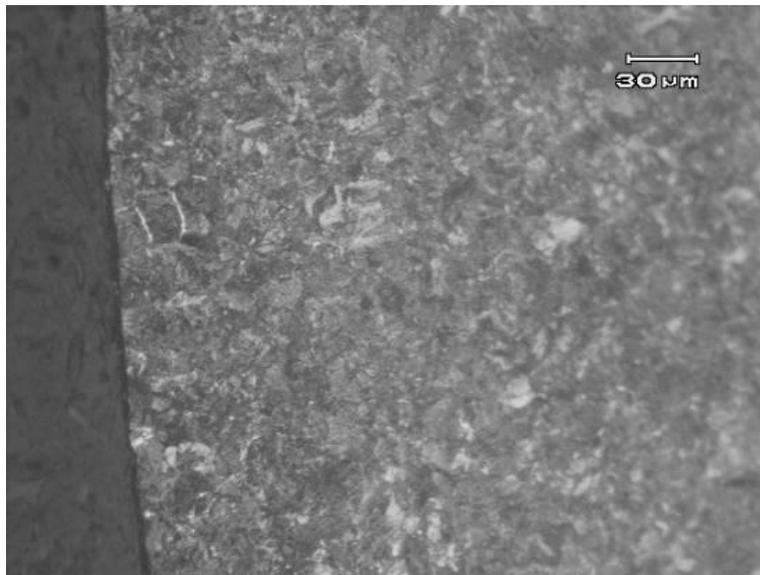


**Figura 4.17. Microestructura longitudinal.  
Acero 1075 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



**Figura 4.18. Microestructura transversal.  
Acero 1075 en centro. (200X).**



**Figura 4.19. Microestructura transversal.  
Acero 1075 en borde. (200X).**

### 4.3. Ensayos de microdureza

Como se explicó en el Capítulo 3, los ensayos de microdureza se realizaron tanto en el borde como en el centro de cada una de las muestras.

En la siguiente tabla se muestra el promedio de microdureza vickers para cada uno de los aceros estudiados. Este promedio se determinó a partir de los resultados obtenidos en los ensayos, los cuales se muestran en el Apéndice C.

**Tabla 4.3. Resultados de los ensayos de microdureza.  
Muestras transversales y longitudinales.**

<b>Acero</b>	<b>Longitudinal</b>		<b>Transversal</b>	
	<b>Centro</b>	<b>Borde</b>	<b>Centro</b>	<b>Borde</b>
1006	110,9	111,1	112,4	109,5
1008	116,7	121,6	110,4	111,7
1023	167,3	175,3	167,8	170,2
1035	187,8	190,9	179,9	188,1
1060	276,1	275,2	280,5	287,9
1065	280,5	299,4	248,9	288,8
1075	310,9	308,6	293,2	318,8

#### **4.4. Programa para la selección de las series en el trefilado**

El programa diseñado consta de un formulario y un módulo. El formulario está compuesto por cuatro conjuntos. El primer conjunto está compuesto por los datos de entrada los cuales algunos son seleccionados de una lista y otros agregados de forma manual.

El segundo conjunto está compuesto por los resultados o datos de salida donde son mostrados en una lista los resultados proporcionados por el programa.

El tercer conjunto está conformado por una imagen de la microscopia y un cuadro informativo el cual contiene el tipo de acero y dureza del mismo.

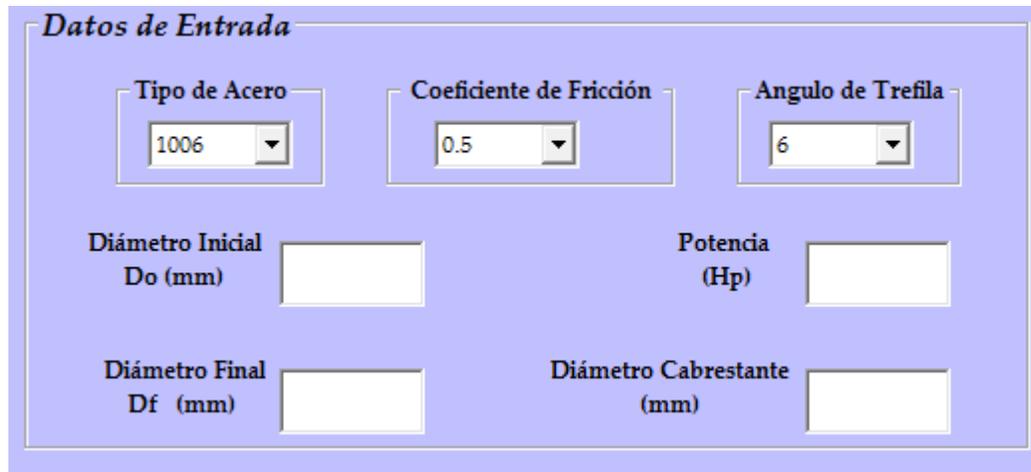
El cuarto conjunto consta de los botones de operaciones, los cuales son los encargados de darle inicio y fin a las operaciones del programa.

Por otra parte el módulo del programa se puede dividir en dos subconjuntos. En el primero son declaradas las variables. En el segundo se encuentra la programación de forma modular donde se encuentran todas las formulas usadas para obtener los resultados que proporciona el programa.

##### **4.4.1 Datos de entrada de la serie**

En esta sección son suministrados al programa los datos de la serie con la cual se desea trabajar. Son proporcionados todos los valores necesarios para realizar los cálculos que se presentaran en el segundo conjunto. Dos de los datos de entrada son seleccionados de una lista que

contiene los posibles valores, los otros cuatro datos de entrada se introducen de forma manual por el operador tal como se muestra en la figura 4.20. El programa tiene preestablecido las unidades con las cuales se va a trabajar, estas se visualizan en la parte inferior de los datos necesarios.



El formulario, titulado "Datos de Entrada", está diseñado con un fondo azul claro y contiene los siguientes campos de entrada:

- Tipo de Acero:** Un menú desplegable con el valor "1006" seleccionado.
- Coefficiente de Fricción:** Un menú desplegable con el valor "0.5" seleccionado.
- Angulo de Trefila:** Un menú desplegable con el valor "6" seleccionado.
- Diámetro Inicial Do (mm):** Un campo de texto vacío.
- Potencia (Hp):** Un campo de texto vacío.
- Diámetro Final Df (mm):** Un campo de texto vacío.
- Diámetro Cabrestante (mm):** Un campo de texto vacío.

Figura 4.20. Datos de entrada de la serie.

#### 4.4.2 Resultados o datos de salida del programa

Los datos de salida son los resultados que el programa suministra. Aquí son mostrados los números de pasadas necesarios para la serie introducida en la primera sección, adicional a esto es mostrado el porcentaje de reducción y los diámetros de salida en cada una de las pasadas, así como también las velocidades lineales y angulares de cada motor usado en cada una de las pasadas, como se observa en la figura 4.21.

**Resultados**

Número de Pasadas

Trefilado con % de Reducción Variable			Velocidades de la Serie	
Nro De pasadas	Diámetro Final (mm)	% de Reduccion	Velocidad Lineal (m/min)	Velocidad Angular (rpm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

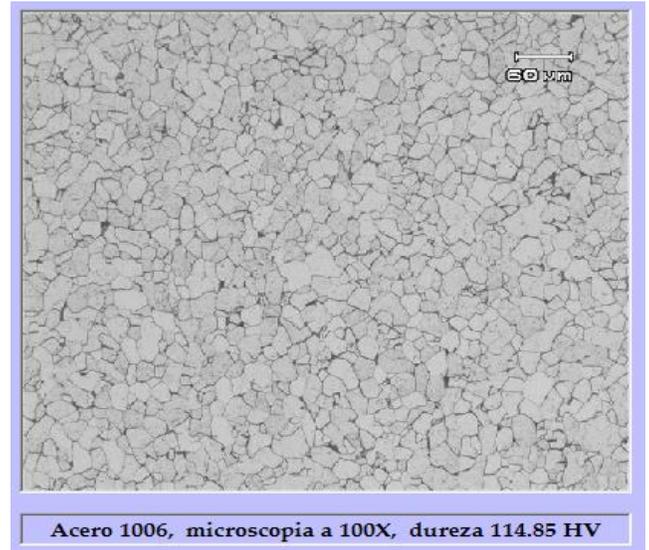
Figura 4.21. Resultados proporcionados por el programa.

#### 4.4.3 Imagen y cuadro informativo

Aquí el programa suministra al operador como información adicional una imagen la cual muestra la microscopia a 100X del acero con el cual se está trabajando. También se muestra un cuadro de texto donde se proporciona la información del tipo de acero según el porcentaje de carbono usado en la serie y el valor de la dureza del mismo, tal como se muestra en la figura 4.22 y 4.23.



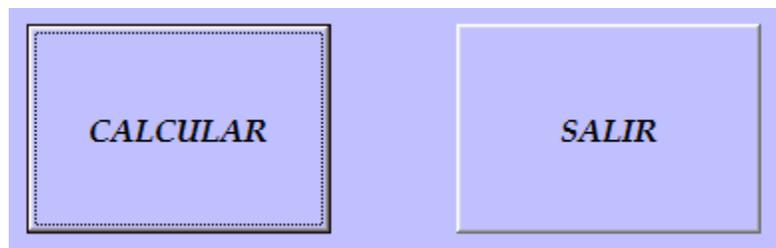
**Figura 4.22. Imagen y cuadro informativo antes de realizar la corrida del programa.**



**Figura 4.23. Ejemplo de imagen y cuadro informativo con los datos proporcionados por el programa.**

#### 4.4.4 Botones de operaciones

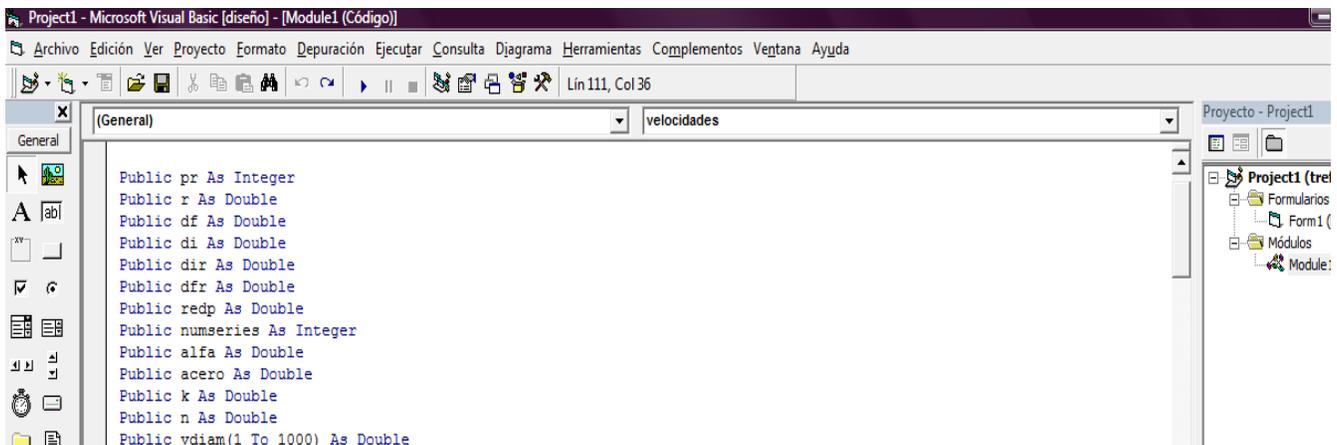
Estos botones son los encargados de iniciar las operaciones del programa. El botón de calcular tiene como función, tomar los datos de entrada y realizar los cálculos necesarios para que el programa proporcione los datos de salida. El botón salir proporciona al operador la facilidad de ponerle fin a las actividades que realiza el programa, cerrando la ventana principal del mismo (Formulario).



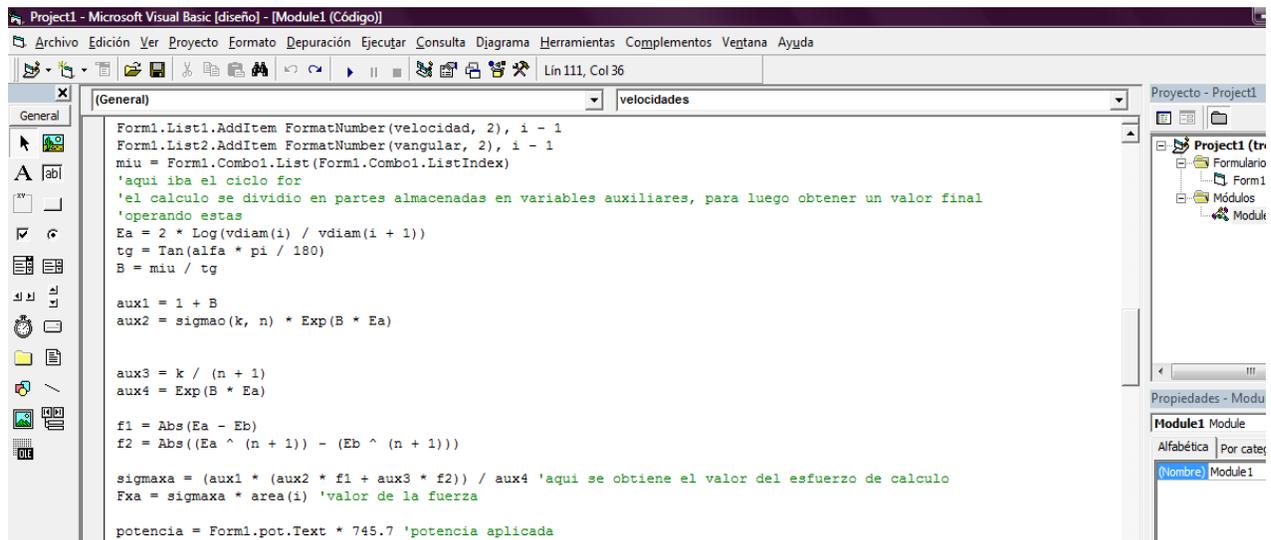
**Figura 4.24. Botones de operaciones del programa.**

#### 4.4.5 Módulo del programa

En esta sección del programa se refleja todo el funcionamiento del mismo, aquí se declaran las variables usadas en su desarrollo, las ecuaciones empleadas y el funcionamiento de cada una de ellas, la información textual que suministra el programa a través de su formulario, las imágenes y archivos que trabajan en conjunto para dar los resultados deseados y estos puedan ser visualizados a través del formulario.



**Figura 4.25. Módulo del programa. Declaración de variables.**



**Figura 4.26. Módulo del programa. Programación Modular.**

## 4.5. Comparación de resultados

Para realizar la comparación deseada, los datos iniciales de la serie proporcionada por la empresa trefiladora fueron los mismos que se utilizaron como datos de entrada para la corrida del programa, adicionándole el diámetro del cabrestante.

Datos iniciales:

Tipo de acero: 1008.

Diámetro inicial: 5,5 mm.

Diámetro final: 2 mm.

Ángulo de trefila ( $\alpha$ ): 10°.

Potencia de los motores disponibles: 10 hp.

Diámetro del cabrestante: 650 mm.

Tanto para la serie proporcionada como la obtenida mediante el programa, el número de pasadas resultó un total de 8.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de la serie proporcionada por la empresa trefiladora y la serie obtenida por el programa diseñado:

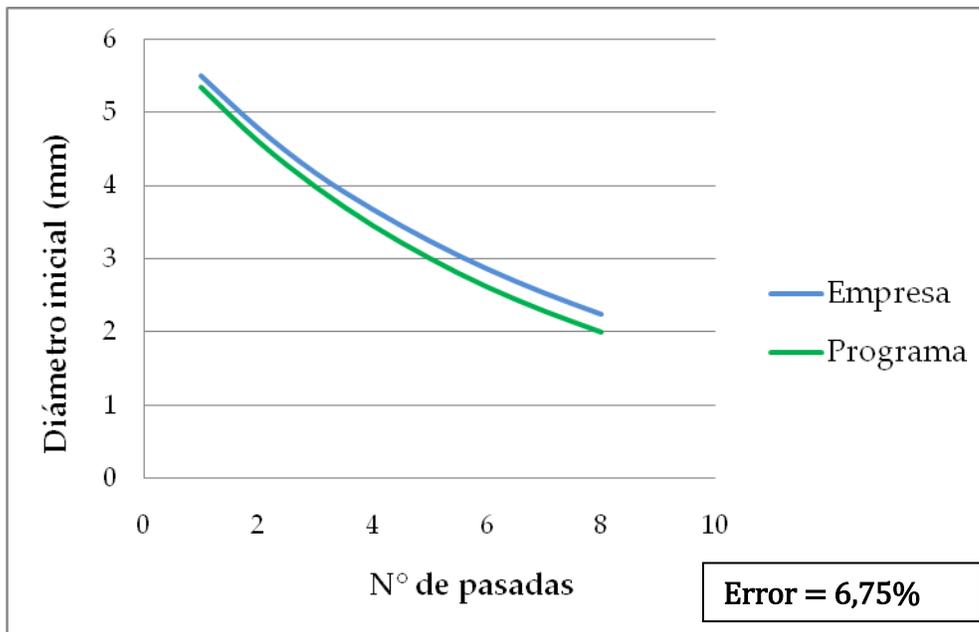
**Tabla 4.4. Resultados de la serie proporcionada por la empresa trefiladora**

<i><b>Pasada</b></i>	<i><b>Diámetro inicial (mm)</b></i>	<i><b>Diámetro final (mm)</b></i>	<i><b>% de reducción</b></i>	<i><b>Velocidad (m/min)</b></i>
1	5,5	4,785	24,3%	450
2	4,785	4,177	23,8%	520
3	4,177	3,682	22,3%	590
4	3,682	3,249	22,1%	670
5	3,249	2,871	21,9%	750
6	2,871	2,541	21,7%	850
7	2,541	2,251	21,5%	960
8	2,251	2	21,05%	1080

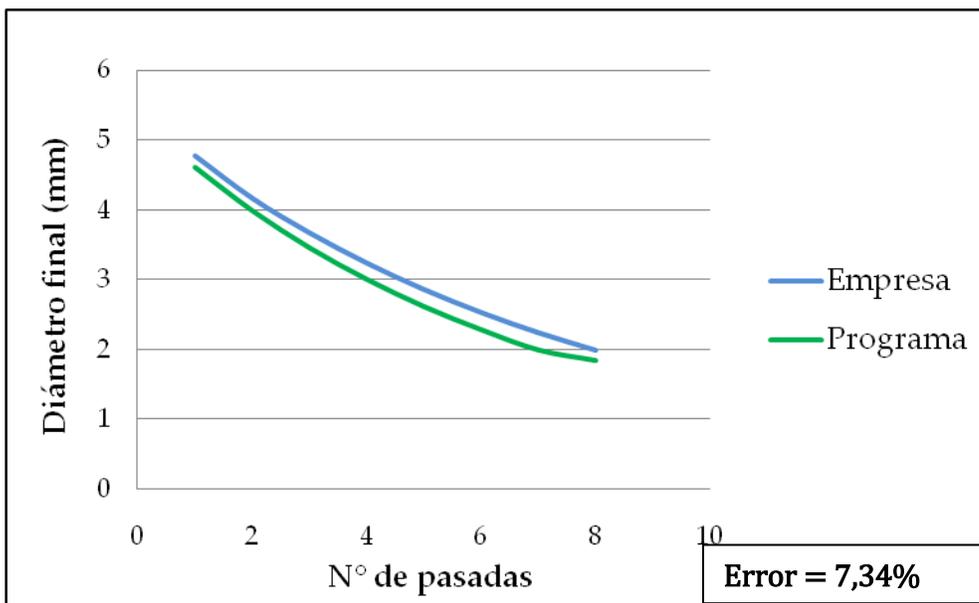
**Tabla 4.5. Resultados de la serie obtenida por el programa diseñado**

<b><i>Pasada</i></b>	<b><i>Diámetro inicial (mm)</i></b>	<b><i>Diámetro final (mm)</i></b>	<b><i>% de reducción</i></b>	<b><i>Velocidad (m/min)</i></b>
1	5,5	4,76	25%	440,53
2	4,76	4,14	24,5%	506,51
3	4,14	3,61	24%	580,87
4	3,61	3,16	23,5%	663,59
5	3,16	2,77	23%	757,02
6	2,77	2,44	22,5%	859,40
7	2,44	2,15	22%	975,32
8	2,15	2	13,71%	1048,47

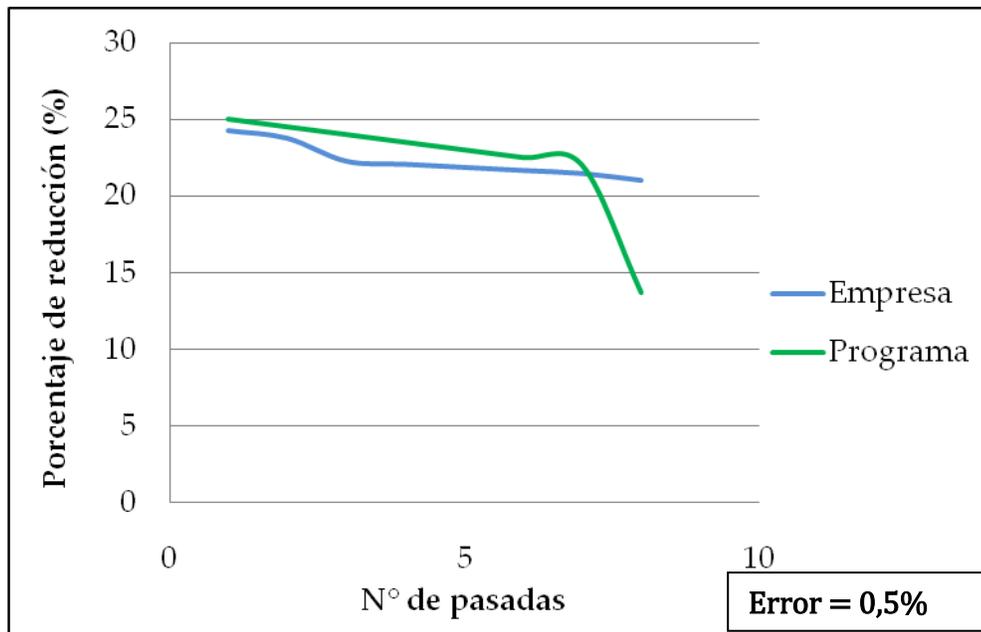
En las siguientes gráficas se muestra las curvas de los datos obtenidos por la empresa y las curvas los resultados arrojados por el programa con la finalidad de realizar una comparación entre los resultados.



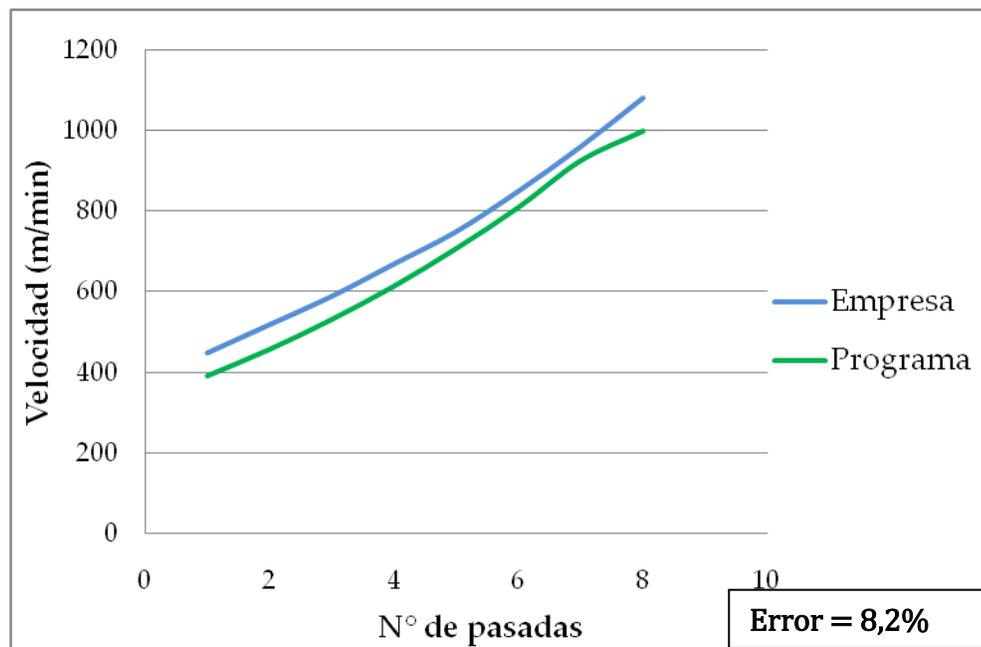
**Figura 4.27. Gráficas de diámetro inicial vs. Nº de pasadas. Resultados de la empresa y del programa.**



**Figura 4.28. Gráficas de diámetro final vs. Nº de pasadas. Resultados de la empresa y del programa.**



**Figura 4.29. Gráficas de porcentaje de reducción vs. Nº de pasadas. Resultados de la empresa y del programa.**



**Figura 4.30. Gráficas de velocidad vs. Nº de pasadas. Resultados de la empresa y del programa.**

# CAPÍTULO 5

## *Análisis de Resultados*

---

---

En la Tabla 4.1 se muestran los datos obtenidos de los ensayos de tracción. Esta tabla fue construida considerando todas las muestras ensayadas. En ella se refleja que a medida que aumenta el porcentaje de carbono en los aceros el esfuerzo último ( $S_u$ ) es mayor. A su vez el porcentaje de alargamiento disminuye a medida que el porcentaje de carbono aumenta definiendo así la ductibilidad de cada tipo de acero y la capacidad que estos presentan para deformarse sin romperse. Esto se presenta debido a que los aceros con mayor porcentaje de carbono poseen en su estructura mayor cantidad de perlita y menor cantidad de ferrita, lo cual hace que aumente la resistencia y disminuya la ductilidad.

A los datos de los ensayos de tracción, se les realizó las correcciones de eje, de rigidez y Bridgman, obteniendo finalmente que con respecto al acero 1006 el cual posee un valor de 380,63; los aceros 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 aumentan su esfuerzo último ( $S_u$ ) en un 37,53%; 58,92%; 148%, 165% y 165,8% respectivamente.

Comparando los esfuerzos de fluencia ( $S_y$ ) se observa que con respecto al acero 1006 el cual posee un valor de 288,87; los aceros 1023,

1035, 1060, 1065 y 1075 presentan un aumento de 19,97%; 20,47%; 17,95% y 48,27% respectivamente.

Al observar los valores de esfuerzo verdadero a la fractura ( $\sigma_f$ ), se aprecia que con respecto al acero 1006 el cual posee un valor de 820,60; los aceros 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 se incrementan en un 3,95%; 21,92%; 27,17%; 70,72%; 72,40% y 63,69% respectivamente.

Finalmente al realizar una comparación de los valores de la deformación verdadera a la fractura ( $\epsilon_f$ ), con respecto al acero 1006 el cual posee un valor de 1,44; se observa que los aceros 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 presentan una disminución de 24,05%; 54,21%; 143,74%; 145,51% y 221,29% respectivamente.

Se observa que tanto en las propiedades mecánicas ( $S_u$ ,  $S_y$ ,  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ ) como en el esfuerzo de fluencia (obtenido de las curvas esfuerzo verdadero vs deformación verdadera) los valores aumentan debido a que a mayor porcentaje de carbono presente en la muestra existe mayor presencia de cementita que ferrita eutectoide en la colonia perlítica, puesto que la cementita es más frágil y resistente, al incrementar su contenido disminuye la ductilidad y tenacidad del material. Por lo tanto, la resistencia y la rigidez de la fase cementita restringen la deformación de la fase ferrita la cual es más blanda.

En los resultados obtenidos de los análisis microscópicos, en centro y borde de cada uno de los materiales ensayados, los diferentes tipos de acero presentan las mismas tendencias al realizar una comparación entre los granos que conforman el centro y los que conforman el borde. Los granos presentes en el borde del material son de menor tamaño, esto debido a la rapidez del enfriamiento en la periferia del material. Los granos encontrados en el centro presentan mayor tamaño debido a que en ellos se concentra mayor cantidad

de calor por lo que el enfriamiento es más lento en comparación con los ubicados en el borde.

Por otra parte se observa que los aceros con menor porcentaje de carbono (1006 y 1008) presentan una matriz ferrítica, donde se puede apreciar un aproximado de 5 y 8 % respectivamente de colonias perlíticas, en los aceros 1023 y 1035 aumenta progresivamente el porcentaje de perlita presente. Ya a partir del acero 1060 la perlita se hace predominante en la microestructura marcando así una tendencia para los aceros con alto contenido de carbono.

En la tabla 4.3 se observan los resultados obtenidos de los ensayos de microdureza, los aceros de bajo carbono (porcentaje de carbono inferior a 0,25%) poseen los valores menores de dureza ya que son aleaciones relativamente suaves y débiles pero con una extraordinaria ductilidad y tenacidad. Por otra parte los aceros de medio carbono (porcentaje de carbono entre 0,25% y 0,60%) presentan valores de dureza intermedios dentro del intervalo en estudio, debido a que estos materiales son aceros más resistentes pero menos dúctiles y maleables que los de bajo carbono. Los aceros de alto carbono (porcentaje de carbono superior a 0,6%) son los de mayor dureza dentro del intervalo ensayado, ya que son más resistentes y menos dúctiles que el resto de los aceros al carbono que fueron estudiados. Este incremento que presentan los valores de dureza, se deben al aumento de la fracción de cementita ( $Fe_3C$ ) la cual es más dura y más frágil que la ferrita eutectoide presentes en la perlita, y a su vez se encuentra en función al porcentaje de carbono.

En los valores obtenidos de los ensayos de microdureza para los aceros al carbono estudiados, se aprecia en las muestras longitudinales que el valor de la dureza en el borde aumenta de 0,18 a 6,31 % en comparación a los valores de dureza que se registraron en el centro de la probeta. Por otra

parte en las muestras transversales se registra que los valores en el centro de la muestra presentan un aumento de 1,17 a 13,82 % de los valores registrados en el borde. Se puede inferir que este comportamiento se debe al enfriamiento al cual fue sometido el material al pasar por el proceso de fabricación del alambro ya que un material con granos finos o pequeños es más duro y resistente que uno que tiene granos gruesos. Esto basándose en el modelo de Hall Petch, el cual es una relación general entre el esfuerzo de fluencia (y otras propiedades mecánicas), el endurecimiento por deformación y el tamaño del grano, sometidos a una deformación plástica. Este modelo indica que los bordes de granos actúan como barreras de las dislocaciones, al reducir el tamaño del grano, estos se incrementan y, en consecuencia se aumenta la barrera de dislocaciones la cual genera mayores propiedades mecánicas, y así la resistencia del material metálico aumenta.

En las figuras desde la 4.1 hasta 4.7 se observan las gráficas esfuerzo verdadero vs deformación verdadera de las muestras de aceros al carbono estudiados, observando que para cada tipo de acero estas poseen una similitud en la tendencia, describiendo cada una de ellas una curva esfuerzo-deformación esquematizada para un material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal (elasto-plástico), donde fue usado para modelar la zona plástica la ley de potencia de Hollomon-Ludwik.

Los valores del exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de carbono presente en las muestras, estos son mostrados en la tabla 4.2, presentan una variación de 0,24 a 0,13; lo cual es un valor esperado ya que este debe estar dentro del intervalo de 0 a 1, verificándose así que el acero en estudio se comporta como un material elasto-plástico.

Realizando un análisis a los datos obtenidos del programa se apreció que a medida que el porcentaje de carbono presente en el acero aumenta, las

velocidades recomendadas son menores, datos que coinciden con los proporcionados por una empresa trefiladora.

Para el cálculo del número de pasadas se tomaron diversos porcentajes de reducción variándolo de mayor a menor cumpliendo con el intervalo recomendado para trefilar aceros al carbono (20 a 25 %), esto para asegurar que la temperatura al final de la línea de trefilado no exceda los 180°C (temperatura máxima permisible). La disminución del porcentaje de reducción permite además que el porcentaje de acumulación en el tambor vaya aumentando progresivamente, lo cual ayuda al enfriamiento del alambre, ya que a mayor carga en el tambor mayor es el enfriamiento en el mismo.

El comportamiento típico usado para mantener el principio de conservación de masa, el cual requiere que la cantidad total de masa que entra en un volumen de control (dado), sea igual a la cantidad total de masa que sale de él, se corrobora al introducir como variables de entrada diámetro inicial de 10mm y diámetro final de 5 mm, la velocidad lineal y angular al inicio del proceso es de 270,35 m/min y 11,47rpm respectivamente; al final del proceso tanto la velocidad lineal como la angular aumentan a 468,25 m/min y 19,87 rpm respectivamente verificando que a medida que el diámetro del alambre disminuye las velocidades aumentan.

Uno de los datos importantes que el operador debe introducir es la potencia de cada motor. Este dato es esencial para calcular la velocidad lineal del mismo. Al realizar pruebas de funcionamiento del programa, se comprobó que al asignarle mayores valores de potencia al programa, las velocidades aumentan progresivamente. Estos resultados fueron comprobados con los proporcionados por la empresa trefiladora.

El programa tiene como uno de sus objetivos, verificar que no exista problema de Estallido Central (Central Bursting), en caso de detectarse este

problema en alguna de las series calculadas, se realiza un ajuste aumentando el ángulo de la trefila, esto debido que a medida que  $\alpha$  incrementa decrece la energía disipada por efectos de fricción mientras se incrementa el trabajo por deformación redundante hasta que este llega a ser predominante.

# CAPÍTULO 6

## *Conclusiones*

---

---

Se determinó que las propiedades mecánicas ( $S_u$ ,  $S_y$ ,  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ ), dependen principalmente del porcentaje de carbono al estudiar un material en condición de alambroón. Para mayores porcentajes de carbono, se obtienen menores valores de ductilidad, así como mayores valores de dureza y resistencia, además de ser un criterio de selección para controlar las velocidades al momento de trefilar debido a que mayor dureza y resistencia, menores valores de velocidad durante el proceso.

Para realizar el estudio del comportamiento de los materiales que son sometidos a elevadas deformaciones plásticas debido a la formación del cuello producido por el ensayo de tracción, es necesario realizar un método de corrección como el propuesto por Brighman para compensarlo y así obtener los valores de  $\sigma_f$  y  $\epsilon_f$ .

En el estudio de los parámetros  $n$  y  $k$ , se utilizó para modelar el comportamiento mecánico de los aceros las ecuaciones de Hollomon-Ludwik, verificando que el material estudiado presento un comportamiento elasto-plástico, corrigiendo así la discrepancia entre los valores calculados y los experimentales.

Los resultados obtenidos del análisis microscópico muestran que el porcentaje de carbono es un factor determinante del material. La importancia de este factor radica en la variación del tamaño de colonias perlíticas en una matriz ferrítica proeutectoide, lo cual a su vez, definen las propiedades de cada acero estudiado debido que al aumentar el porcentaje de carbono se incrementa la cementita presente en la perlita, y al ser la cementita más dura y frágil que la ferrita eutectoide se puede concluir que este comportamiento hace el material más duro, resistente y a su vez menos dúctil.

El tamaño del grano es un factor influyente en las propiedades mecánicas. Para mayores tamaños de granos se obtiene menor dureza, lo cual es consistente con la teoría de Hall Petch, ya que sus bordes restringen las dislocaciones evitando deslizamientos y aportando una dureza relativa.

Se seleccionó Visual Basic como programa para la realización del algoritmo para el diseño de la serie de trefilado en aceros al carbono, esto debido a que es una herramienta con menos probabilidades de ser alterada de manera accidental o intencional por los operadores que utilicen el software. Se consideró la facilidad y la interactividad con que funciona el programa a la hora de elegirlo.

La discrepancia encontrada entre los datos suministrados por la empresa trefiladora y los proporcionados por el programa son atribuidos a los modelos prácticos empleados por la industria, como la variación del porcentaje de reducción empleada por la empresa.

# CAPÍTULO 7

## *Recomendaciones*

---

---

Hacer uso de este programa diseñado para el cálculo de las series de trefilado, ya que es una herramienta de software factible que proporciona el resultado de una serie adecuada, evitando posibles errores humanos que se puedan producir en el cálculo de la misma.

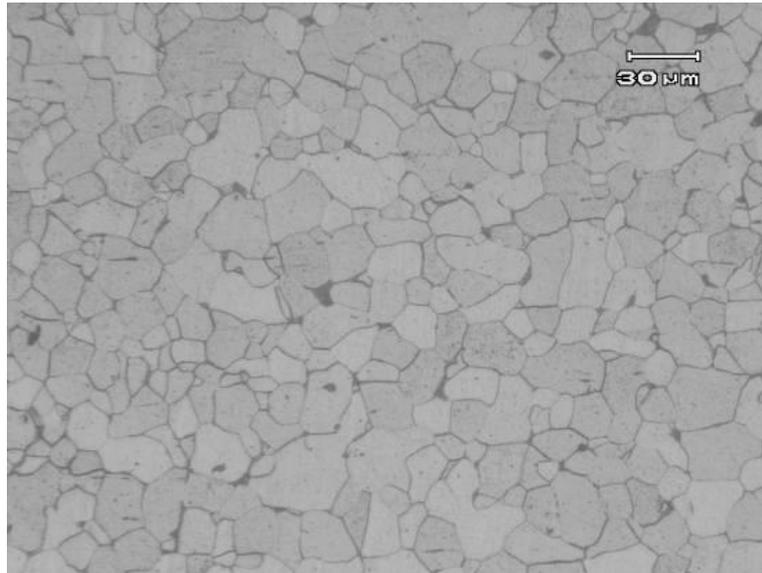
Al calcular el número de pasadas de la serie, se recomienda variar el porcentaje de reducción en cada pasada, comenzando con el máximo porcentaje recomendado para aceros al carbono (25%). Esto con la finalidad de evitar la holgura del alambre en la posición anterior al cabrestante cuando se presenta una parada en la línea de trefilado, lo cual puede ocasionar rotura del alambre debido a la fuerza producida por la línea cuando ésta comienza a operar nuevamente.

Se recomienda llevar este programa a la industria del trefilado, con la finalidad de crear una retroalimentación continua para la mejora del programa adecuándolo a las necesidades de la empresa.

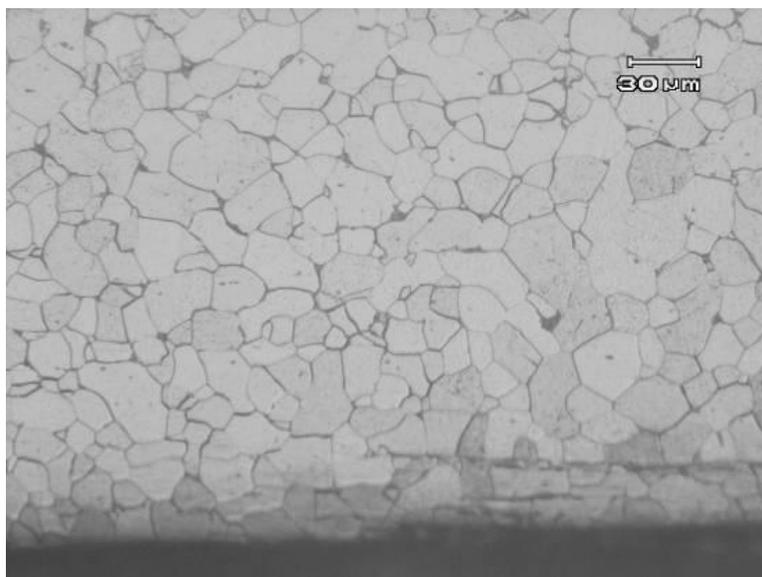
Incorporar más información a este programa, sobre otros materiales específicos como el acero inoxidable, el aluminio, entre otros; con la finalidad de poder calcular las series de trefilados de estos materiales mediante este mismo software, y facilitarlo a las empresas trefiladoras.

# ACERO 1006

## *Muestras Longitudinales*

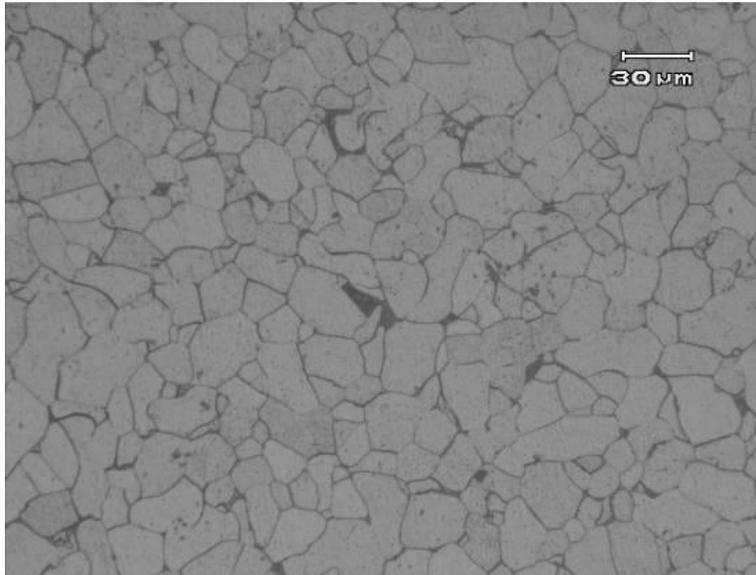


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1006 en centro. (200X).**

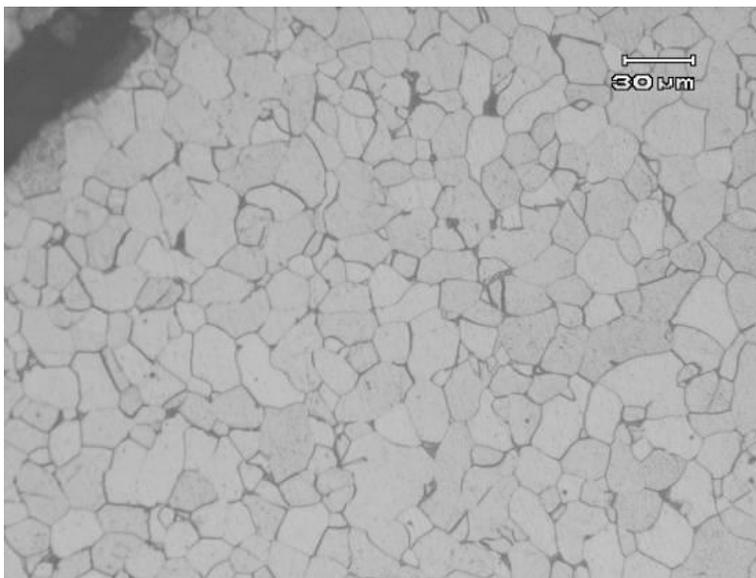


**Microestructura longitudinal  
Acero 1006 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



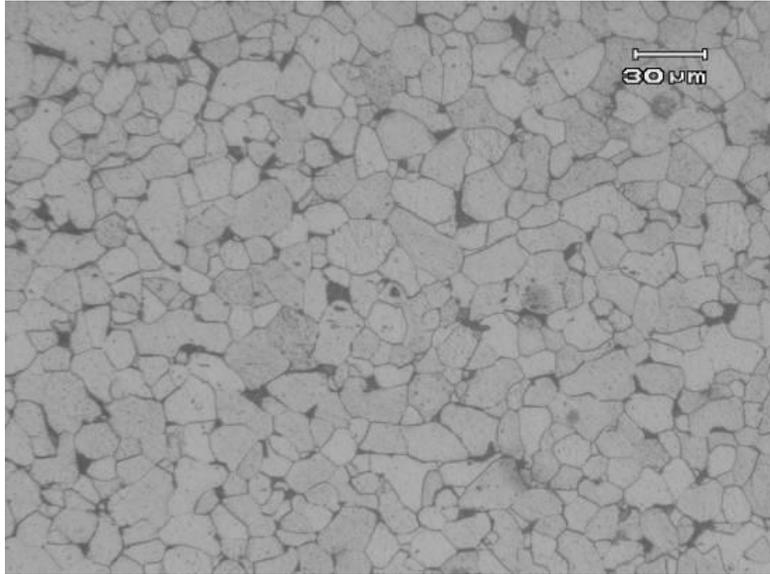
**Microestructura transversal.  
Acero 1006 en Centro. (200X).**



**Microestructura transversal.  
Acero 1006 en Borde. (200X).**

# ACERO 1008

## *Muestras Longitudinales*

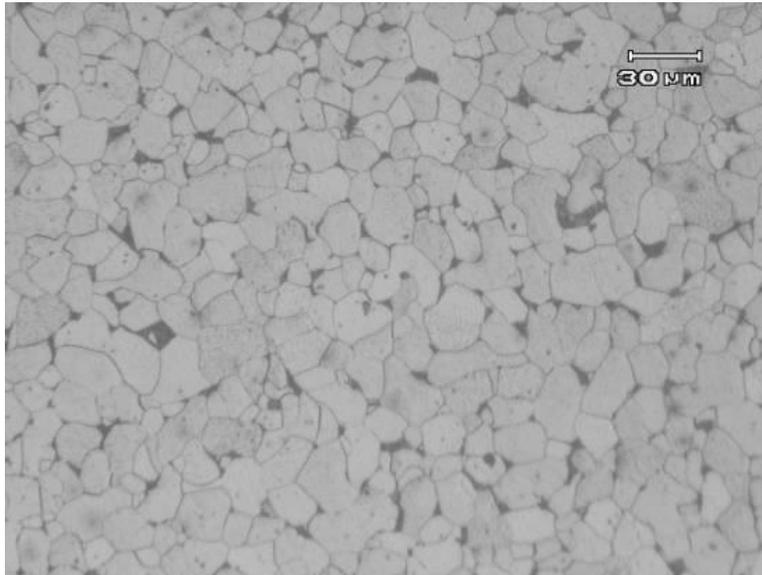


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1008 en centro. (200X).**

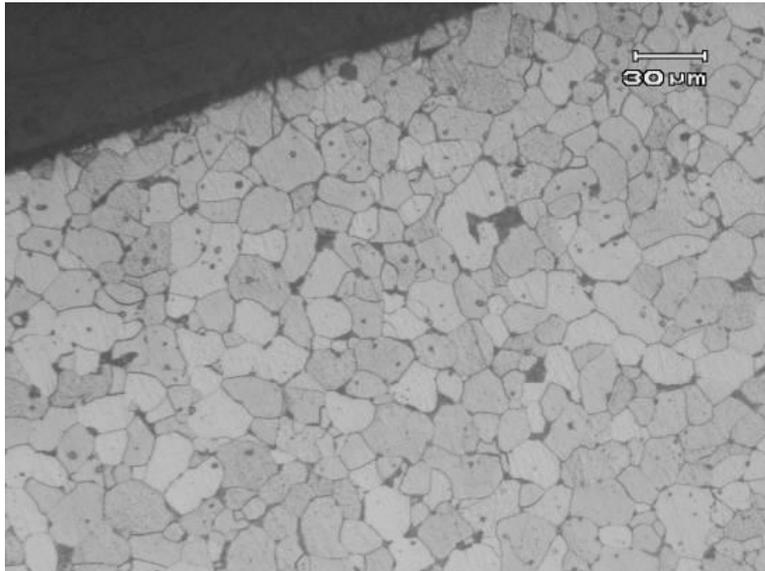


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1008 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



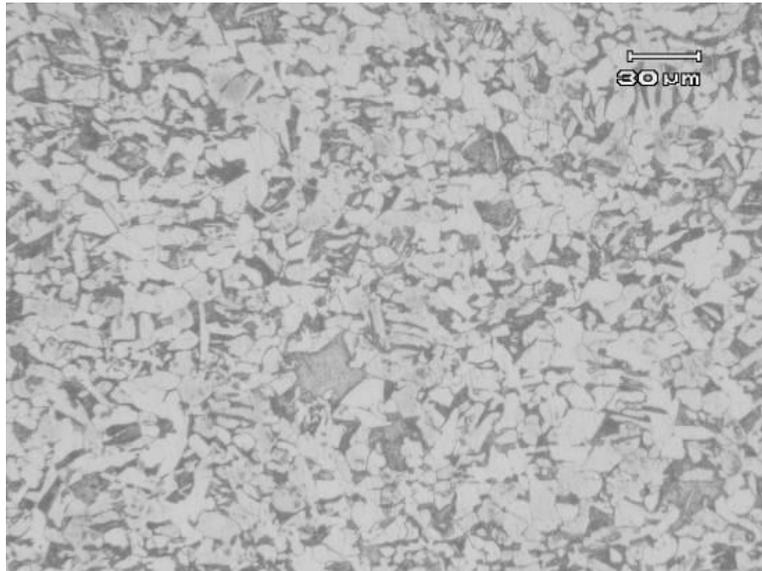
**Microestructura transversal.  
Acero 1008 en centro. (200X).**



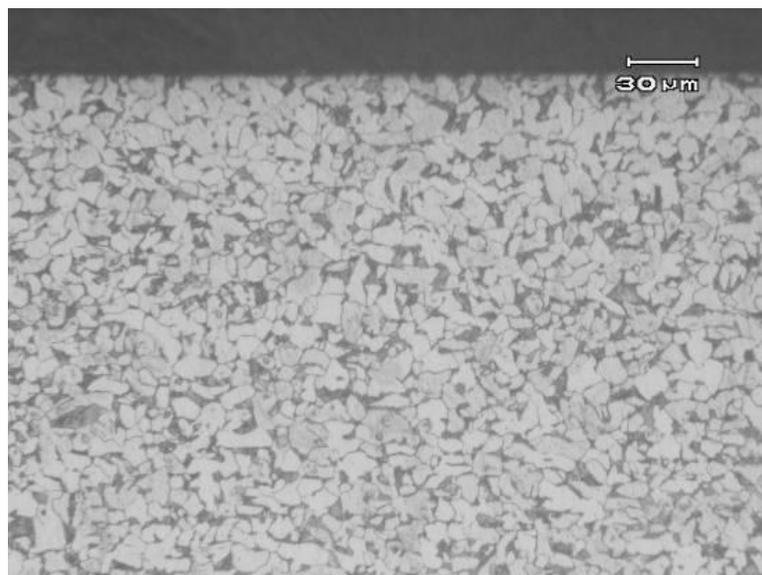
**Microestructura transversal.  
Acero 1008 en borde. (200X).**

# ACERO 1023

## *Muestras Longitudinales*

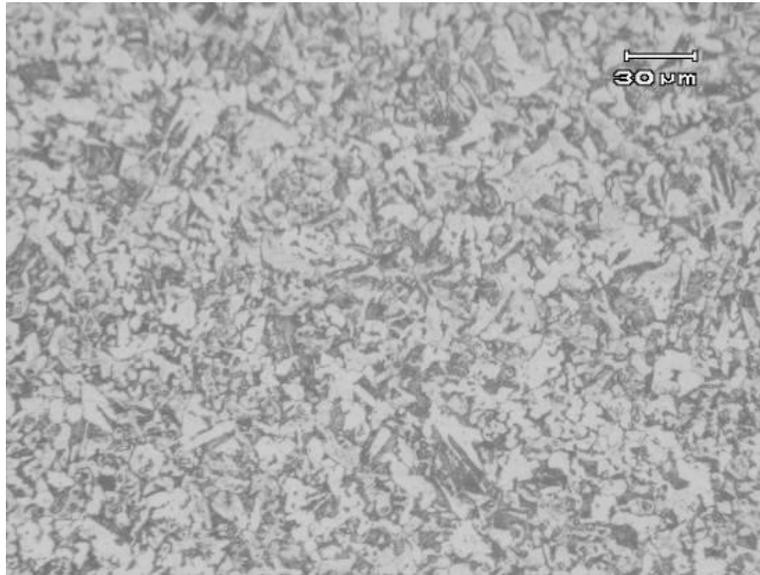


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1023 en centro. (200X).**

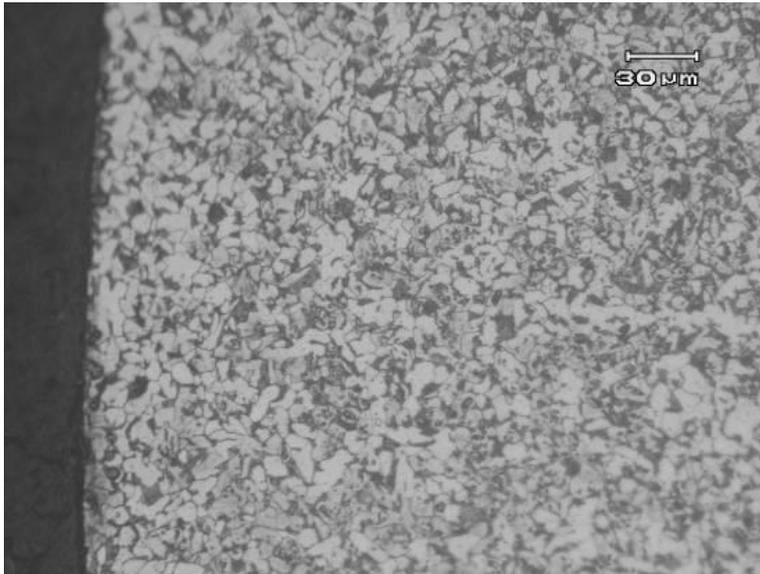


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1023 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



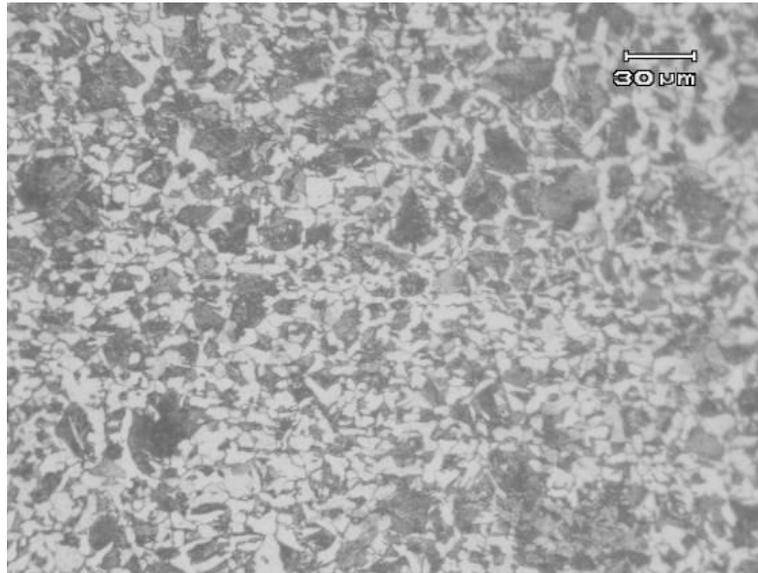
**Microestructura transversal.  
Acero 1023 en centro. (200X).**



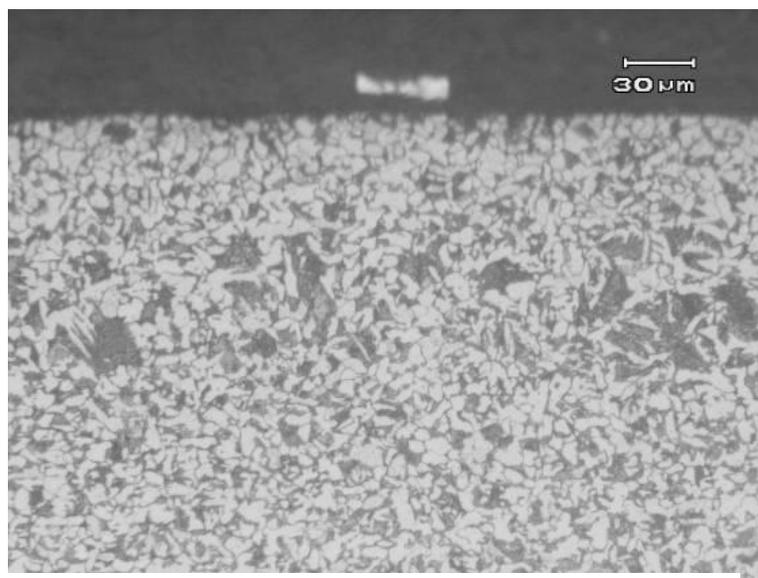
**Microestructura transversal.  
Acero 1023 en borde. (200X).**

# ACERO 1035

## *Muestras Longitudinales*

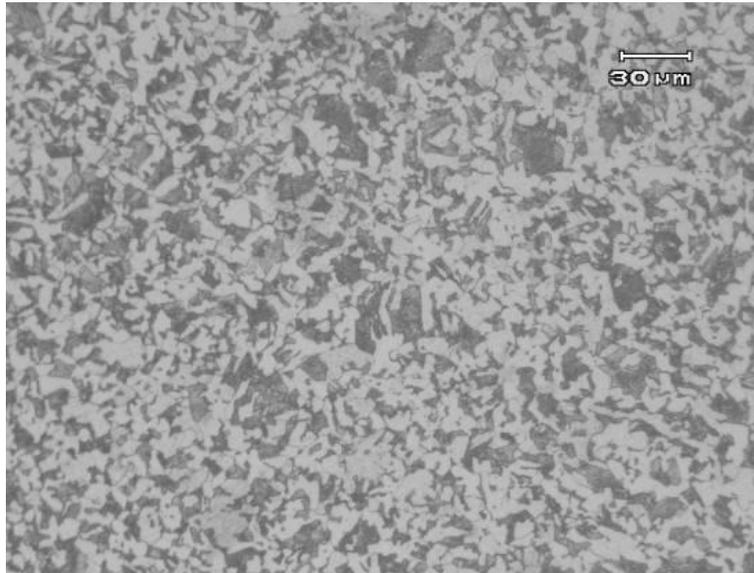


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1035 en centro. (200X).**

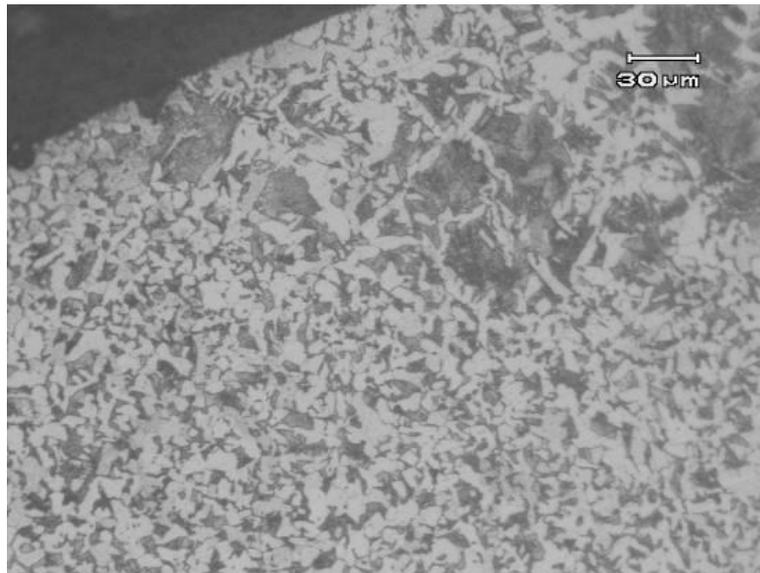


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1035 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



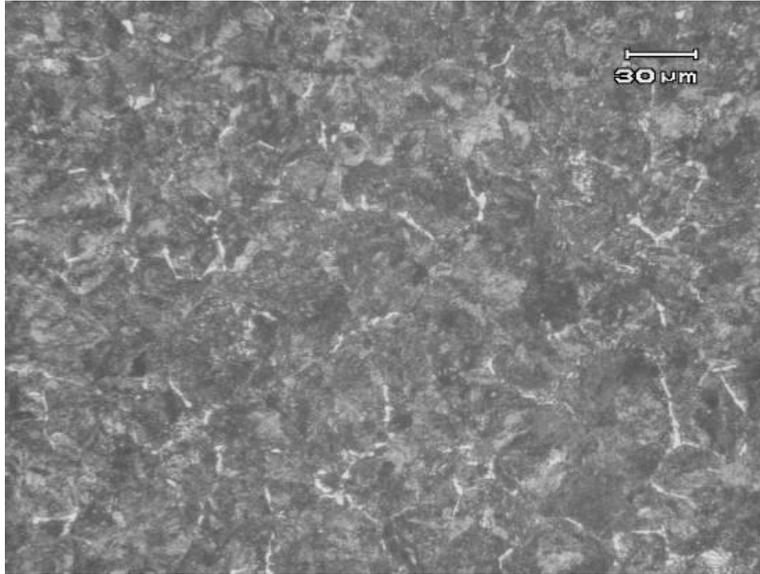
**Microestructura transversal.  
Acero 1035 en centro. (200X).**



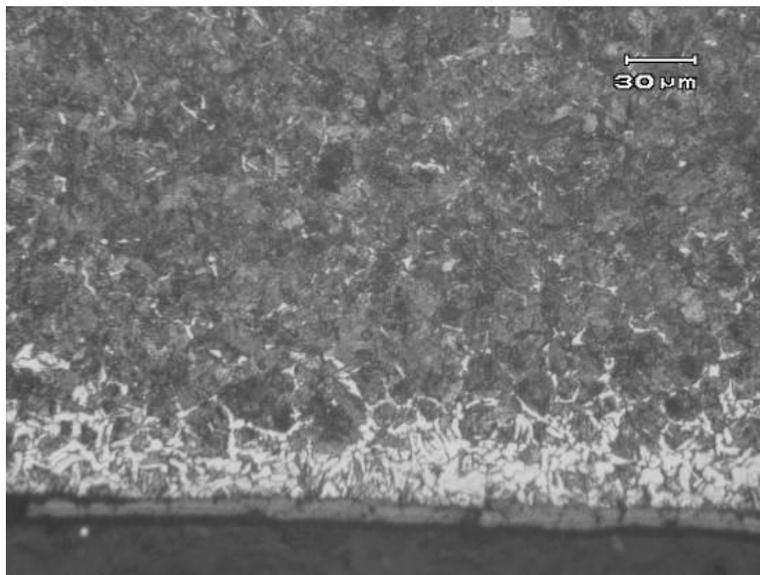
**Microestructura transversal.  
Acero 1035 en borde. (200X).**

# ACERO 1060

## *Muestras Longitudinales*

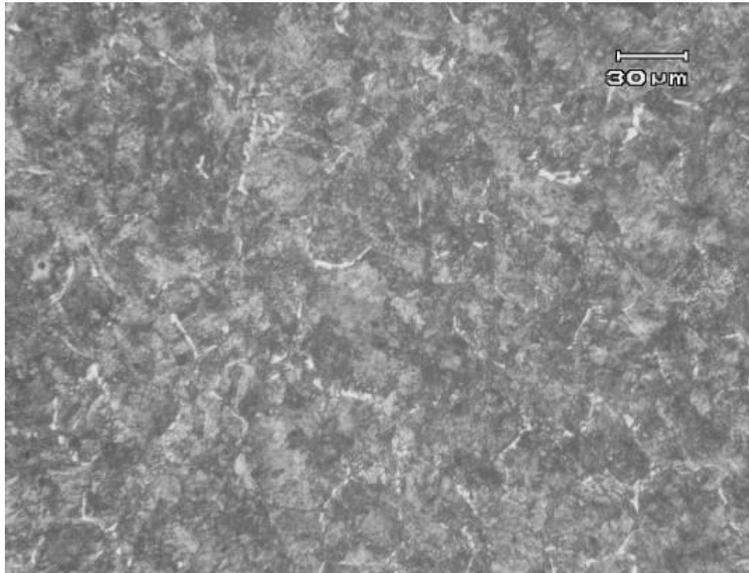


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1060 en centro. (200X).**

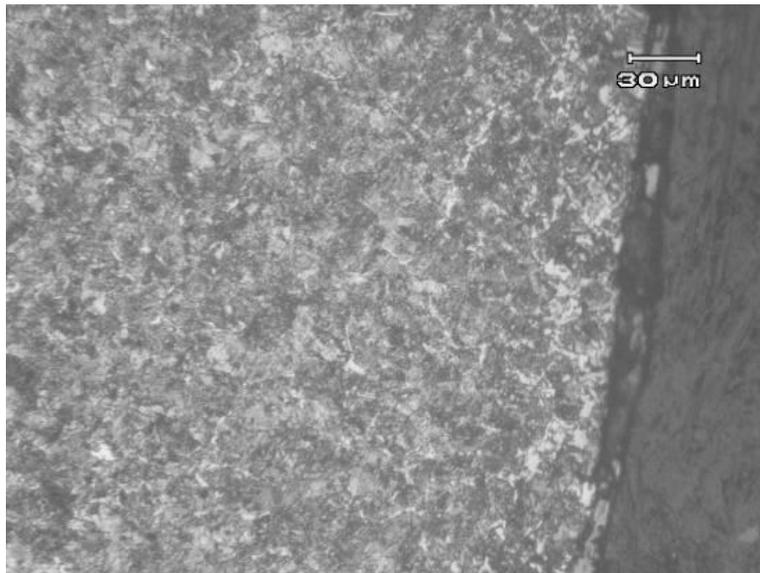


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1060 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



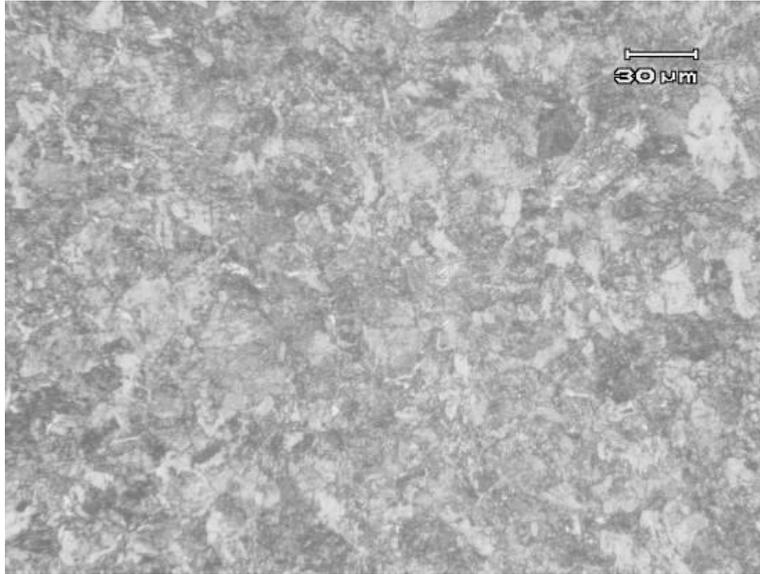
**Microestructura transversal.  
Acero 1060 en centro. (200X).**



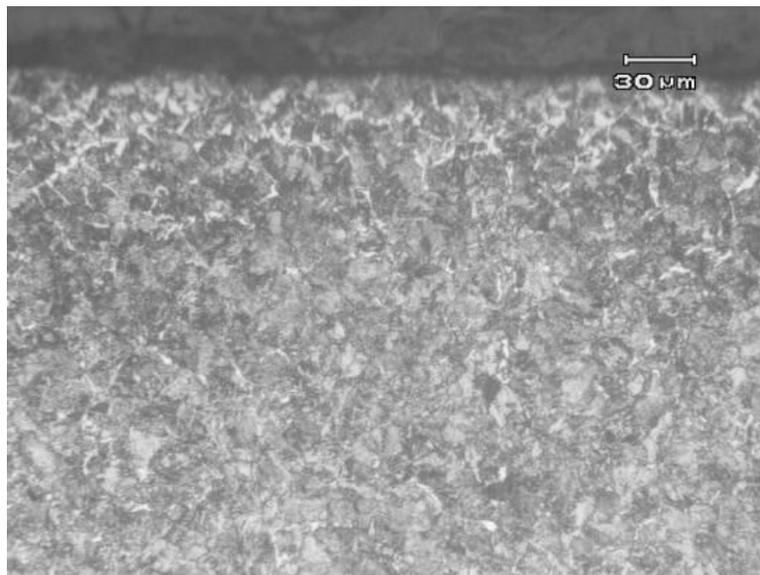
**Microestructura transversal.  
Acero 1060 en borde. (200X).**

# ACERO 1065

## *Muestras Longitudinales*

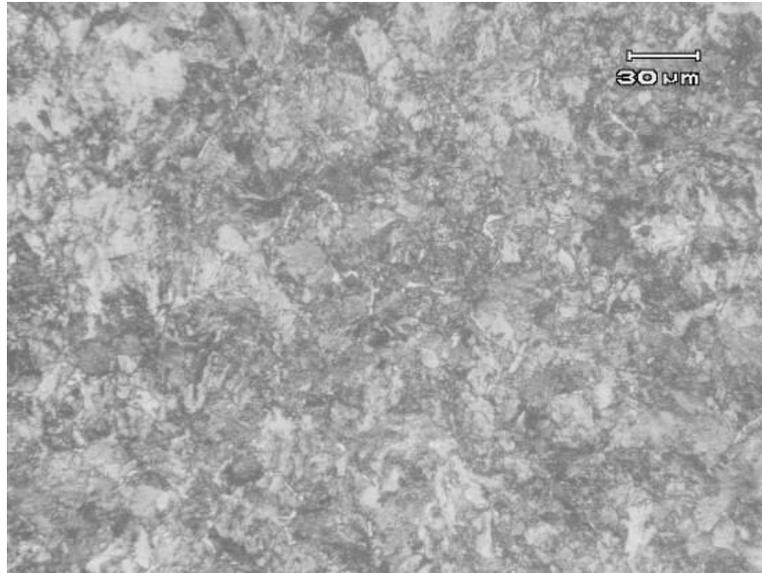


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1065 en centro. (200X).**

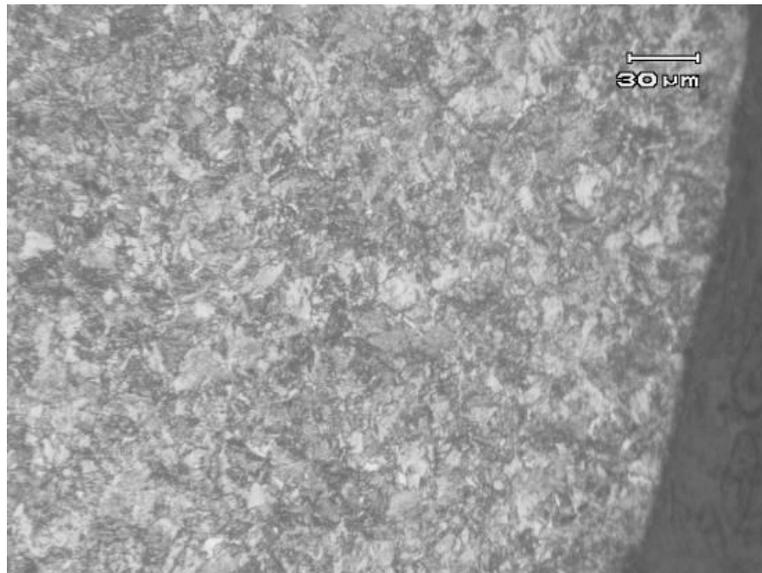


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1065 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



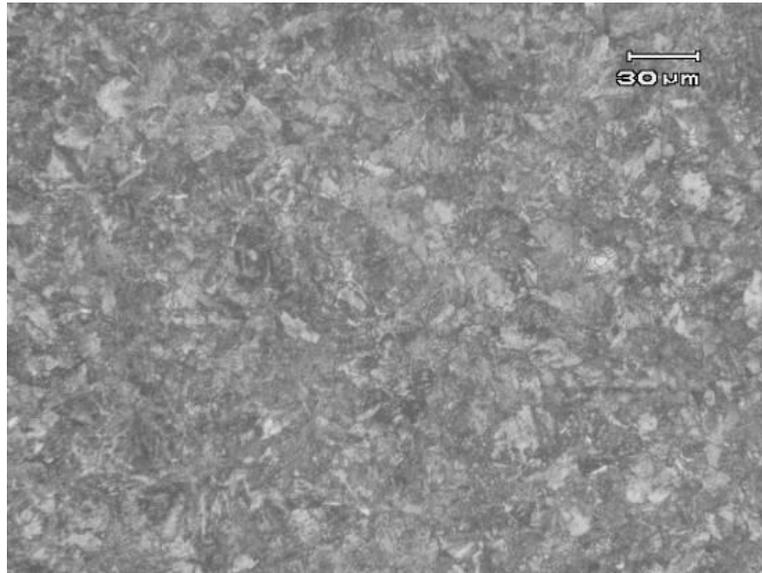
**Microestructura transversal.  
Acero 1065 en centro. (200X).**



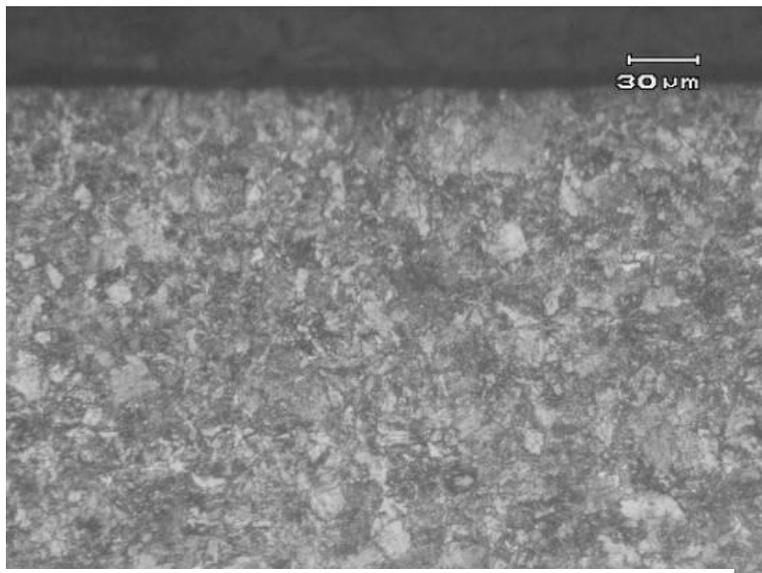
**Microestructura transversal.  
Acero 1065 en borde. (200X).**

# ACERO 1075

## *Muestras Longitudinales*

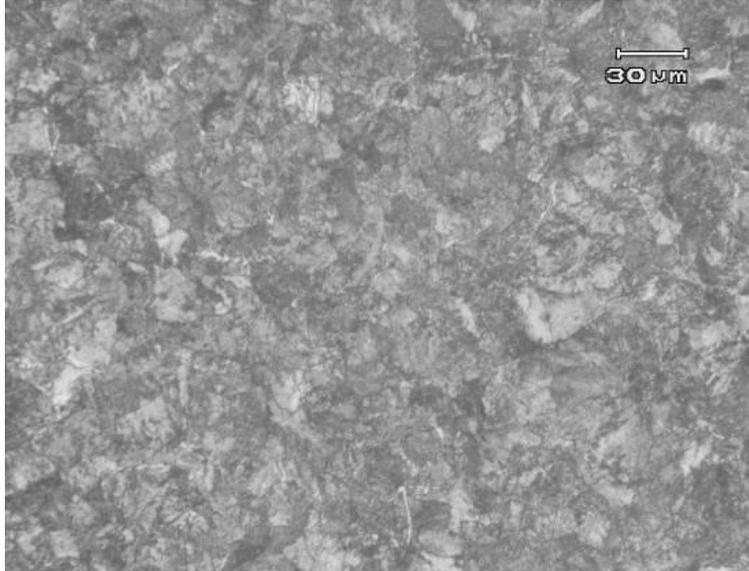


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1075 en centro. (200X).**

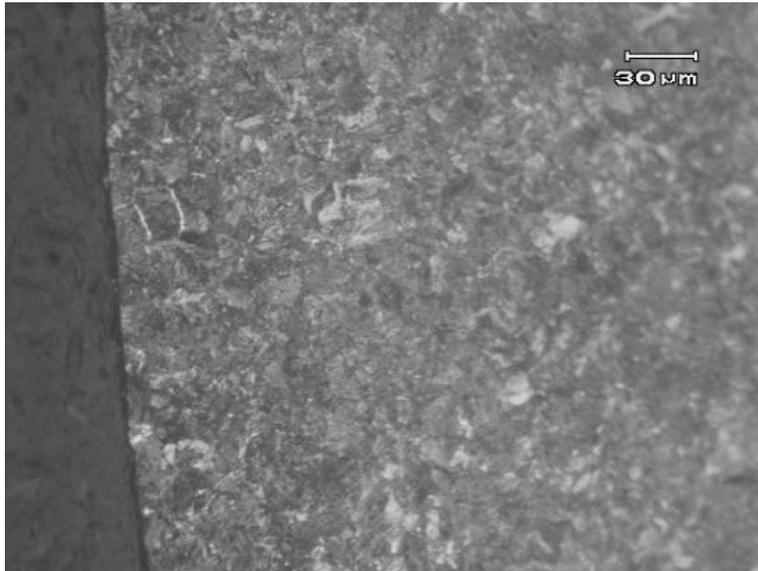


**Microestructura longitudinal.  
Acero 1075 en borde. (200X).**

## ***Muestras Transversales***



**Microestructura transversal.  
Acero 1075 en centro. (200X).**



**Microestructura transversal.  
Acero 1075 en borde. (200X).**

# ACERO 1006

Longitudinal

## Resultados de los ensayos de microdureza.

### Muestras longitudinales. Acero 1006.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-06	57,4	60,1	107,5	<b>110,9</b>
		DLC12-06	60	57,2	108	
		DLC13-06	55,5	54,4	122,8	
		DLC21-06	57,7	59	108,9	
		DLC22-06	56,6	58,5	112	
		DLC23-06	59,1	59,3	105,8	
		DLC31-06	59,4	53,5	116,4	
		DLC32-06	58,3	60	106	
		DLC33-06	58,3	57,1	111,4	
	<i>Borde</i>	DLB11-06	58,3	58,7	108,4	<b>111,1</b>
		DLB12-06	55,9	58,1	114,2	
		DLB13-06	57,2	59	109,9	
		DLB21-06	52	54,5	130,8	
		DLB22-06	59	59,7	105,3	
		DLB23-06	57,7	58,6	109,7	
		DLB31-06	56,3	57,8	114	
DLB32-06	60,9	58,5	104,1			
DLB33-06	59,3	60	104,2			

## ACERO 1006

Transversal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1006.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-06	60,2	58,7	104,9	<b>112,4</b>
		DTC12-06	56,6	58,2	112,6	
		DTC13-06	57,6	58,9	109,3	
		DTC21-06	54,8	57,9	116,8	
		DTC22-06	56,9	59,1	110,2	
		DTC23-06	53,8	57,1	120,6	
	<i>Borde</i>	DTB11-06	59,4	58,1	107,5	<b>109,5</b>
		DTB12-06	53,9	58,6	117,2	
		DTB13-06	57,5	59,4	108,6	
		DTB21-06	58,2	59,7	106,7	
		DTB22-06	59	59,9	104,9	
		DTB23-06	58	56,6	112,2	

## ACERO 1008

### Longitudinal

#### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1008.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-08	58	58	110,2	<b>116,7</b>
		DLC12-08	57,3	57,6	112,4	
		DLC13-08	53,7	55,3	124,9	
		DLC21-08	53,6	54,7	126,5	
		DLC22-08	58,4	55,5	113,6	
		DLC23-08	57,5	58,3	110,6	
		DLC31-08	57,5	56,7	113,8	
		DLC32-08	52,8	55,4	126,7	
		DLC33-08	56,7	58,3	112,2	
	<i>Borde</i>	DLB11-08	51,3	53,4	135,3	<b>121,6</b>
		DLB12-08	58,5	58,1	109,1	
		DLB13-08	54	55,4	124	
		DLB21-08	56,7	57,2	114,4	
		DLB22-08	56,2	54,1	121,5	
		DLB23-08	56,2	59	111,8	
		DLB31-08	55,1	57,5	117	
		DLB32-08	51,7	50,3	142,6	
		DLB33-08	54,9	56,8	118,9	

## ACERO 1008

### Transversal

#### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1008.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-08	60,5	58,2	105,3	<b>110,4</b>
		DTC12-08	57,3	59,8	108,2	
		DTC13-08	56,7	57,6	113,6	
		DTC21-08	57,7	58,4	110,1	
		DTC22-08	56,9	58,9	110,6	
		DTC23-08	60,6	58,8	104,1	
		DTC31-08	54,4	56,4	120,8	
		DTC32-08	57,1	56,9	114,2	
		DTC33-08	57,6	60,2	106,9	
	<i>Borde</i>	DTB11-08	56,9	57,8	112,8	<b>111,7</b>
		DTB12-08	58,3	58,3	106,9	
		DTB13-08	59,9	57,7	107,3	
		DTB21-08	53,4	56,5	122,8	
		DTB22-08	58	60,4	105,8	
		DTB23-08	55,3	56,8	118,1	
		DTB31-08	59,2	56,8	110,2	
DTB32-08		59,1	59,8	104,9		
DTB33-08		55,9	56,8	116,8		

## ACERO 1023

### Longitudinal

#### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1023.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-23	44,5	45,6	182,7	<b>167,3</b>
		DLC12-23	48,4	49,3	155,4	
		DLC13-23	46,7	48,1	165,1	
		DLC21-23	46,2	47,8	167,9	
		DLC22-23	45,6	47,4	171,5	
		DLC23-23	45,7	49,7	145,7	
		DLC31-23	48,2	46,2	166,5	
		DLC32-23	46,4	44,4	179,9	
		DLC33-23	46	47	171,5	
	<i>Borde</i>	DLB11-23	45,8	45,3	178,8	<b>175,3</b>
		DLB12-23	44,5	45,6	182,7	
		DLB13-23	44,3	48	174,1	
		DLB21-23	45,7	47,8	169,7	
		DLB22-23	45,7	47	172,6	
		DLB23-23	47,4	46,8	167,2	
		DLB31-23	45,8	44,6	181,5	
		DLB32-23	46,9	45,1	175,3	
		DLB33-23	46,3	45,4	176,4	

## ACERO 1023

### Transversal

#### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1023.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-23	46,8	49,4	160,3	<b>167,8</b>
		DTC12-23	47,4	46,8	167,2	
		DTC13-23	49,3	47,6	158	
		DTC21-23	45,6	45,7	178	
		DTC22-23	47,3	46,4	169	
		DTC23-23	47,5	49	159,3	
		DTC31-23	48,2	46,5	165,4	
		DTC32-23	45,3	44,2	185,2	
		DTC33-23	46,2	47,7	168,3	
	<i>Borde</i>	DTB11-23	48,4	47,4	161,6	<b>170,2</b>
		DTB12-23	47	45,1	174,9	
		DTB13-23	46,4	44	181,5	
		DTB21-23	41,2	44,8	200,6	
		DTB22-23	46,9	47,4	166,8	
		DTB23-23	48,3	47,2	162,7	
		DTB31-23	47,6	48,7	160	
DTB32-23	47	49,2	160,3			
DTB33-23	48,1	47,1	163,7			

# ACERO 1035

## Longitudinal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1035.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-35	44,8	46,2	179,1	187,8
		DLC12-35	44,3	45,9	182,3	
		DLC13-35	44,3	44,9	186,5	
		DLC21-35	39,1	46	204,8	
		DLC22-35	44,9	46,2	178,8	
		DLC23-35	44,2	45,7	183,6	
		DLC31-35	42,4	47,2	184,8	
		DLC32-35	44,9	44,9	184	
	DLC33-35	41,9	42,8	206,8		
	<i>Borde</i>	DLB11-35	44,9	42,8	192,9	190,9
		DLB12-35	47,4	46,2	169,3	
		DLB13-35	42,5	42,9	203,4	
		DLB21-35	47	45,2	174,5	
		DLB22-35	45,6	46	176,8	
		DLB23-35	44,3	48,7	171,5	
		DLB31-35	44,7	43,5	190,7	
DLB32-35		42,6	40,4	215,3		
DLB33-35	40,7	40,7	223,9			

# ACERO 1035

## Transversal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1035.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-35	45,7	47,1	172,3	<b>179,9</b>
		DTC12-35	44,8	44,8	194,7	
		DTC13-35	44,3	45,3	184,8	
		DTC21-35	45,7	48,3	167,9	
		DTC22-35	46,1	46,9	171,5	
		DTC23-35	45,2	48,7	168,3	
		DTC31-35	44	45,1	186,9	
		DTC32-35	43,3	45,1	189,8	
		DTC33-35	44,1	45,8	183,6	
	<i>Borde</i>	DTB11-35	42,1	43,2	203,9	<b>188,1</b>
		DTB12-35	43,9	43,9	192,4	
		DTB13-35	45,4	44,9	181,9	
		DTB21-35	44,2	43,4	193,3	
		DTB22-35	41,2	43,6	206,3	
		DTB23-35	46,3	44,6	179,5	
		DTB31-35	43,3	46,3	184,8	
		DTB32-35	45,3	47,2	173,4	
		DTB33-35	44,1	47,4	177,2	

# ACERO 1060

## Longitudinal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1060.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-60	35,5	37,5	276,9	<b>276,1</b>
		DLC12-60	37,3	39,1	254,2	
		DLC13-60	38,5	38,9	247,6	
		DLC21-60	36,8	37,4	269,5	
		DLC22-60	37,2	39,9	249,6	
		DLC23-60	36	36,7	280,7	
		DLC31-60	34	33	330,5	
		DLC32-60	35,2	37,6	279,9	
		DLC33-60	34,5	36,2	296,8	
	<i>Borde</i>	DLB11-60	34,7	35,9	297,6	<b>275,2</b>
		DLB12-60	36,4	37,7	270,2	
		DLB13-60	38,5	37,3	258,2	
		DLB21-60	38,3	38,4	252,2	
		DLB22-60	38,1	37,1	262,3	
		DLB23-60	37,5	35,5	278,4	
		DLB31-60	34,2	34,7	312,5	
DLB32-60		34,9	37,4	283,8		
DLB33-60		37	38,2	262,3		

# ACERO 1060

## Transversal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1060.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-60	36,1	39,2	261,6	<b>280,5</b>
		DTC12-60	38,5	37,5	256,8	
		DTC13-60	34,9	34,9	304,5	
		DTC21-60	34,2	35,4	306,2	
		DTC22-60	37	37	270,9	
		DTC23-60	35,9	38,2	270,2	
		DTC31-60	35,9	37,5	275,4	
		DTC32-60	35,8	34,5	300,2	
		DTC33-60	35,9	37	279,2	
	<i>Borde</i>	DTB11-60	35,8	38,8	266,6	<b>287,9</b>
		DTB12-60	34,8	36,2	294,3	
		DTB13-60	37	38,1	263	
		DTB21-60	33,5	38	290,2	
		DTB22-60	35,7	36,3	286,2	
		DTB23-60	32,7	32,7	320,8	
		DTB31-60	35,3	36,8	285,4	
		DTB32-60	37,6	34,8	283	
		DTB33-60	33,8	36,3	301,9	

# ACERO 1065

## Longitudinal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1065.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>D2(<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-65	41,3	41,2	212,8	<b>280,5</b>
		DLC12-65	36,8	36,8	273,9	
		DLC13-65	36,3	37,5	272,4	
		DLC21-65	37,4	36,8	269,5	
		DLC22-65	33,9	35,9	304,5	
		DLC23-65	35,7	33,7	308	
		DLC31-65	35,5	35,6	286,2	
		DLC32-65	33,1	36,5	306,2	
		DLC33-65	36,6	34,8	291	
	<i>Borde</i>	DLB11-65	36,1	37	277,6	<b>299,4</b>
		DLB12-65	34,7	36,8	290,2	
		DLB13-65	33,8	33,8	324,6	
		DLB21-65	30,8	31,4	383,5	
		DLB22-65	34,3	34,3	315,2	
		DLB23-65	36,3	36,3	281,5	
		DLB31-65	36,3	38,7	263,7	
		DLB32-65	35,6	35,6	292,6	
		DLB33-65	36,5	38,2	265,9	

## ACERO 1065

### Transversal

#### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras transversales. Acero 1065.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-65	35,6	37,1	280,7	<b>248,9</b>
		DTC12-65	36,6	36,6	268,7	
		DTC13-65	36,1	35,3	291	
		DTC21-65	36,4	36,8	276,9	
		DTC22-65	37,2	36,1	26,1	
		DTC23-65	34	35,7	305,4	
		DTC31-65	35,9	37,1	278,4	
		DTC32-65	38	37,5	260,3	
		DTC33-65	38	38,6	252,8	
	<i>Borde</i>	DTB11-65	37,2	36,1	276,1	<b>288,8</b>
		DTB12-65	35	36,3	291,8	
		DTB13-65	35,5	26,8	283,8	
		DTB21-65	36,4	33,9	300,2	
		DTB22-65	34,8	36,3	293,5	
		DTB23-65	34,4	35,8	301	
		DTB31-65	35	35,6	297,6	
DTB32-65		35	36,1	293,5		
DTB33-65		37,1	38,1	262,3		

# ACERO 1075

## Longitudinal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras longitudinales. Acero 1075.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Longitudinal</i>	<i>Centro</i>	DLC11-75	31,7	35,9	324	310,9
		DLC12-75	32,7	32,6	347,9	
		DLC13-75	35,1	35	301,9	
		DLC21-75	36,1	35,9	286,2	
		DLC22-75	34,9	36,7	289,4	
		DLC23-75	34,9	35,5	299,3	
		DLC31-75	33,6	35,7	308,9	
		DLC32-75	32,8	34,2	330,5	
	DLC33-75	35,1	34	310,7		
	<i>Borde</i>	DLB11-75	34	34,4	317,1	308,6
		DLB12-75	33,7	34,4	319,9	
		DLB13-75	34,1	36,4	298,5	
		DLB21-75	36	36,5	282,2	
		DLB22-75	33,2	34	328,5	
		DLB23-75	34	34,7	314,3	
		DLB31-75	35,1	35,8	295,1	
DLB32-75		33,3	34,5	322,7		
DLB33-75	34,7	35,5	299,3			

# ACERO 1075

## Transversal

### Resultados de los ensayos de microdureza.

#### Muestras trasversales. Acero 1075.

	<i>Posición</i>	<i>Muestra</i>	<i>D1(μm)</i>	<i>D2(μm)</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Dureza Promedio</i>
<i>Transversal</i>	<i>Centro</i>	DTC11-75	36,1	37	277,6	293,2
		DTC12-75	35,3	34,5	304,5	
		DTC13-75	33,2	35,5	314,3	
		DTC21-75	37,5	37,7	262,3	
		DTC22-75	34,9	35,4	300,2	
		DTC23-75	33,7	36,9	297,6	
		DTC31-75	36,6	38,5	263	
		DTC32-75	32,8	33,8	334,5	
		DTC33-75	37	35,1	285,4	
	<i>Borde</i>	DTB11-75	33,6	33,7	327,5	318,8
		DTB12-75	35,1	35,1	304,5	
		DTB13-75	34,4	34,7	310,7	
		DTB21-75	33,5	33,5	333,5	
		DTB22-75	32,5	34,5	328,5	
		DTB23-75	33,9	33,7	324,6	
		DTB31-75	33,9	33,9	322,7	
		DTB32-75	32,2	33,3	345,8	
		DTB33-75	36,3	37,6	271,6	

# Referencias

---

- Aparicio, G., Armas, H. D., & Ciaccia, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *INGENIERÍA UC*.
- Atienza, J. (2001). *Tensiones Residuales en Alambres de Aceros Trefilados*. Madrid: Universidad de Madrid.
- Cabello, S. (2006). Ensayos de compresion y torsion: una alternativa en la obtension de curvas esfuerzo-deformacion efectiva de materiales metalicos ductiles. *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales 200X*.
- Cabello, S. (2007). *Topicos sobre Conformado de Metales*. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Callister, W. (1998). *Introduccion a la Ciencia e Ingenieria de los Materiales*. Caracas: Reverte.
- Castañeda, J. (2001). *Metodos de Investigacion II*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Cervo, A. L. (2001). *Metodologia Cientifica*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Clark, D. (1952). *Physical Metallurgy for engineers*. New Jersey: Van Nostrand.
- Cortes, J. (1999). *Visual Basic 6.0*. España: Tecnicas Marcombo.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. Massachusetts: Mc Graw Hill.

- Escalante, D. y. (2007). Influencia de la velocidad de trefilado en las propiedades mecánicas y cambios microestructurales del acero y aluminio. *Trabajo Especial de Grado*, Universidad de Carabobo.
- Foxall, G. (2006). *Programación Modular en Visual Basic*. New York: Publicaciones Navarra.
- Geoffrey, R. (1972). *Conformado de los metales*. Bilbao (España): Ediciones Urmo.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamericana.
- Hernandez, R. (2001). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Morales, A. (2002). *Ingeniería de planta para el control de procesos industriales en la fabricación de pernos, tuercas y afines*. Lima: Universidad Nacional de San Marcos.
- Pacheco, J. H. (2002). *Rediseño y puesta a punto de una trefiladora experimental*. Valencia: Trabajo especial de grado de la Universidad de Carabobo.
- Poon, V. W. (2000). *Evaluación del proceso de trefilado en un acero al carbono AISI 1008*. Caracas: Trabajo especial de grado de la Universidad Central de Venezuela.
- Santos, M. M. (2007). Influência dos parâmetros do processo de trefilção no empenamento de barras do aço SAE 9254. *XII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*.
- Sheffield, R. C. (2004). Decapado y Pasivado del Acero. *Euro The European Stainless Steel*, Bruselas, Bélgica.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Traxit, I. (2006). Lubricantes para el Trefilado de Alambre. *Catálogo de Selección de Productos*, Alemania.

- Yriarte, P. (1997). Estudio de la influencia de los parámetros geométricos de la trefila sobre el esfuerzo de trefilado del alambre de acero AISI 1008. *II Jornada de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales*, Universidad Central de Venezuela.



SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO:

*Diseño de un programa interactivo para la selección de las series en el trefilado de aceros al carbono.*

FECHA DE APROBACION DEL TG-II: *20 de Octubre de 2009.*

FECHA DE EX. FINAL: *05 de Noviembre de 2009.*

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCION DE ESCUELA: *05 de Noviembre de 2009.*

SINOPSIS:

*En este trabajo se propone una herramienta para la selección de las series de trefila de aceros al carbono, la cual consiste en el diseño de un programa interactivo; para ello se realizó un estudio de los aceros 1006, 1008, 1023, 1035, 1060, 1065 y 1075 en condiciones de alambrón. Se determinaron las propiedades mecánicas de los mismos mediante ensayos de tracción, ensayos de microdureza y análisis microscópico. Estos resultados son almacenados para la alimentación del programa. Fue seleccionado Visual Basic como programa para la realización del algoritmo por su facilidad de manipulación además de ofrecer mayor seguridad frente a alteraciones accidentales de las líneas de comando.*

*Se determinó que para los aceros en condición de alambrón ensayados, las propiedades mecánicas de la resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia y microdureza aumentan con respecto al porcentaje de carbono presente en el material. El cambio microestructural en las muestras, es apreciable a medida que asciende el porcentaje de carbono. Por lo que se concluye, que para el intervalo de aceros ensayados, el porcentaje de carbono influye en las propiedades mecánicas, microdureza y en la microestructura del material. Al realizar una comparación de una serie proporcionada por el programa, con una suministrada por una empresa trefiladora, se observa una discrepancia la cual puede atribuirse a los modelos prácticos empleados por la industria.*

CEDULA DE IDENTIDAD

NOMBRES

FIRMA

16.290.880

Veronica Masias

\_\_\_\_\_

17.191.484

Alejandra Pinto

\_\_\_\_\_

PROFESOR GUÍA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

JURADO: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

JURADO: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_