

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LAS LEYES DE ENDURECIMIENTO POR
DEFORMACION EN LA ESTIMACION DE CARGA EN LOS RODILLOS DE UN
LAMINADOR DUO-REVERSIBLE A ESCALA LABORATORIO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres
Gedler M., Leonardo J.
Rendon R., Jhosehp A.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LAS LEYES DE ENDURECIMIENTO POR
DEFORMACION EN LA ESTIMACION DE CARGA EN LOS RODILLOS DE UN
LAMINADOR DUO-REVERSIBLE A ESCALA LABORATORIO**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Maricely De Abreu R.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres
Gedler M., Leonardo J.
Rendon R., Jhosehp A.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Caracas, 05 de marzo de 2.010

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

LEONARDO GEDLER y JHOSEHP RENDON

Titulado:

**“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS LEYES DE
ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN LA ESTIMACIÓN
DE CARGA EN LOS RODILLOS DE UN LAMINADOR A ESCALA
DE LABORATORIO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conduciendo al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. Maticely De Abreu
Tutora


Prof. José Chitty
Jurado



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION

Caracas, 05 de marzo de 2.010

Prof. GERARDO RAMÍREZ
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

LEONARDO GEDLER, C.I.V.- 17.148.558 y JOSÉHP RENDON, C.I.V.- 17.563.866

“MENCIÓN HONORÍFICA”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

**“ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS LEYES DE ENDURECIMIENTO
POR DEFORMACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE CARGA EN LOS
RODILLOS DE UN LAMINADOR A ESCALA DE LABORATORIO”**

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,

Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. José Chitty
Jurado

Prof. Maricely De Abreu
Tutora

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo gracias a Dios, porque sin El nada de esto hubiera sido posible.

A nuestros padres, por habernos apoyado en todo el recorrido de nuestra carrera universitaria.

A la casa que vence la sombra, la Universidad Central de Venezuela, por habernos acogido en su seno, por darnos educación, y por permitirnos vivir una de las etapas más hermosas de nuestras vidas en sus instalaciones.

A la profesora Maricely De Abreu R., que más allá de ser nuestro tutor, fue una compañera más en este trabajo especial de grado.

Al profesor Crisanto Villalobos, que nos brindó su apoyo a lo largo de toda nuestra carrera y en especial en el desarrollo de este trabajo.

Al profesor José Romero, por su apoyo invaluable durante el desarrollo de este trabajo.

A todas aquellas personas y en especial nuestros compañeros de escuela que en un momento u otro colaboraron con nosotros para poder llevar este proyecto a cabo.

Al proyecto individual N° PI-08-6673-2007/1 financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH-UCV) que con los recursos otorgados se pudo realizar este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirnos llegar hasta aquí y ser tan bondadoso con nosotros.

A nuestras familias y novias, por querer siempre lo mejor para nosotros y apoyarnos en todo momento.

A nuestro futuro, que tenemos la seguridad que será lleno de éxitos y prosperidad.

Gedler M., Leonardo J. y Rendon R., Jhosehp A.

“ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LAS LEYES DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION EN LA ESTIMACION DE CARGA EN LOS RODILLOS DE UN LAMINADOR DUO-REVERSIBLE A ESCALA LABORATORIO”

Tutor Académico: Maricely De Abreu R. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010. 121 Pág.

Aleación 8011, Ensayo de compresión tipo Ford, Leyes de endurecimiento por deformación, laminación.

Resumen: El presente trabajo tiene como objetivo fundamental analizar las leyes de endurecimiento por deformación en la estimación de carga de laminación en los rodillos de un laminador a escala de laboratorio. Para el cálculo teórico de dichas cargas se utilizaron las expresiones propuestas por Orowan, Bland y Ford; Parkins y Ekenlund, en las cuales se requiere conocer previamente el esfuerzo de fluencia del material. Para esto último se realizaron ensayos de compresión plana tipo Ford, obteniendo así el comportamiento de la aleación AA8011 y para luego modelar el flujo plástico del material con el uso de las leyes de endurecimiento por deformación tales como Hollomon, Voce y Sah et al. Finalmente se determina que la expresión de Parkins usando la ley de endurecimiento por deformación de Voce es la más cercana superior al valor experimental.

Gedler M., Leonardo J. y Rendon R., Jhosehp A.

**“EFFECT ANALYSIS OF THE DEFORMATION HARDENING LAWS IN THE
CALCULATION OF THE NECESSARY LOAD IN A ROLLING PROCESS USING
A LABORATORY ROLLING MILL”**

**Academic tutor: Maricely De Abreu R. Caracas, U. C. V. Engineering Faculty,
Mechanical Engineering School. 2010. 121 Pág.**

Alloy 8011, Ford compression test, Deformation hardening laws, Rolling process.

Abstract: The principal aim of this investigation is to analyze the effect of deformation hardening laws in the calculation of the necessary load in a rolling process using a laboratory rolling mill. To the theoretical calculation of that rolling load was used the expressions proposed by Orowan, Bland y Ford; Parkins y Ekenlund, in which it is necessary to know previously the yield stress of the material. To obtain that yield stress it was required to make the Ford compression test obtaining the alloy AA8011 behavior, to then fit the material plastic flow using the three different deformation hardening laws such as those proposed by Hollomon, Voce y Sah et al. Finally it was founded that the expression proposed by Parkins using the deformation hardening law proposed by Voce is the most accurate up to the experimental value of load.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 Generalidades	3
1.2 Laminación.....	3
1.2.1 Equipos de laminación	4
1.2.2 Material a laminar	6
1.2.3 Laminación en caliente.....	7
1.2.4 Laminación en frío	8
1.2.4.1 Defectos debido a la laminación en frío.....	11
1.2.5 Cálculo elemental de la carga de los rodillos	11
1.2.6 Determinación de la presión de los rodillos a partir del cálculo de los esfuerzos locales.....	13
1.2.6.1 Condiciones propuestas por Larke para el cálculo de la presión de los rodillos en el laminado en frío.	13
1.2.6.2 Derivación y solución general de la ecuación diferencial	16
1.2.6.3 Laminado sin fuerzas de tracción externas.....	19
1.2.6.4 Laminado con fuerzas de tracción en la salida y la entrada	20
1.2.7 Métodos para el cálculo de la fuerza de laminación.....	21
1.2.7.1 Método de Orowan, Bland y Ford.....	21
1.2.7.2 Método de Parkins.....	23
1.2.7.3 Método de Ekelund	24
1.2.8 Distorsiones en los rodillos de laminación.....	24
1.2.8.1 Flexión de los cilindros. Aumento del diámetro central (alabeo).....	24
1.2.8.2 Distorsión elástica del laminador (Control de espesor).....	25

1.3 Compresión con deformación plana.....	27
1.3.1 Ensayo de compresión tipo Ford.....	27
1.3.2 Relaciones importantes de las curvas Esfuerzo-Deformación (Compresión Plana)	29
1.3.2.1 Deformación nominal (e)	29
1.3.2.2 Deformación real (ϵ).....	29
1.3.2.3 Esfuerzo nominal (S).....	29
1.3.2.4 Esfuerzo real en compresión plana (σ').....	30
1.3.2.5 Relación entre la deformación nominal y la real.....	33
1.3.2.6 Porcentaje de reducción de espesor (%Rh)	33
1.3.3 Expresiones matemáticas de las zonas elásticas y plásticas de la curva Esfuerzo Vs Deformación real.....	34
1.3.3.1 Zona Elástica.....	34
1.3.3.2 Zona Plástica	35
1.3.3.2.1 Ley de Hollomon.....	35
1.3.3.2.2 Ley generalizada de Sah et al.	36
1.3.3.2.3 Ley de Sah et al.	37
1.3.3.2.4 Ley de Voce	37
1.4 Generalidades del aluminio.....	38
1.4.1 Propiedades del aluminio	38
1.4.2 Aleaciones de aluminio	39
1.4.3 Aleación AA8011.....	40
CAPITULO II	42
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	42
2.1 Generalidades.....	42
2.2 Esquema de la metodología utilizada.....	42
2.3 Ensayo de compresión de anillos para la determinación del coeficiente de fricción del lubricante.....	44

2.3.1 Preparación de la probeta (Anillo)	45
Tabla 2.1 Dimensiones iniciales de las probetas de anillos.....	46
2.4 Ensayo de compresión tipo Ford.....	47
2.4.1 Preparación de la probeta	47
Tabla 2.2 Dimensiones iniciales de las probetas usadas en el ensayo Ford	47
2.4.2 Realización del ensayo	48
2.5 Ensayo de Laminación	53
Tabla 2.3 Dimensiones iniciales de las probetas del ensayo de laminación.....	54
CAPITULO III.....	56
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
3.1 Ensayo de compresión de anillos	56
Tabla 3.1 Dimensiones finales de las probetas de anillos	57
Tabla 3.2 Valores de coeficientes de roce entre aluminio y acero con el uso de grafito.....	58
3.2 Ensayo de compresión plana tipo Ford	59
Tabla 3.3 Dimensiones finales de las probetas usadas en el ensayo Ford.....	60
3.2.1 Caracterización del material sometido a compresión plana	61
Tabla 3.4 Valores de carga y variación de espesor registrados en la máquina.....	62
Tabla 3.5 Valores de carga y variación de espesor experimental.....	63
Tabla 3.6 Valores de carga y variación de espesor sin la deformación de la máquina	66
Tabla 3.7 Esfuerzos y deformaciones para el ensayo Ford	67
3.2.1.1 Modelización a través del uso de las leyes de endurecimiento por deformación....	71
3.2.1.1.1 Modelización con la ley de Hollomon	71
Tabla 3.8 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Hollomon	73
3.2.1.1.2 Modelización con la ley de Voce	73
Tabla 3.9 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Voce	75
3.2.1.1.3 Modelización con la ley de Sah et al.	76

Tabla 3.10 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Sah et al.....	78
3.2.1.2 Cuadro resumen de la modelización a través del uso de las leyes de endurecimiento por deformación	78
Tabla 3.11 Cuadro resumen de los esfuerzos de fluencia medio	79
3.3 Resultados del ensayo de laminación.....	80
Tabla 3.12 Dimensiones finales de las probetas del ensayo Ford	80
Tabla 3.14 Carga experimental de laminación	83
3.4 Cálculo teórico de la carga de laminación.....	83
3.4.1 Método de Orowan, Bland y Ford.....	84
3.4.1.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon.....	84
3.4.1.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce	84
3.4.1.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al	85
3.4.2 Método de Parkins.....	86
3.4.2.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon.....	86
3.4.2.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce	86
3.4.2.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al	86
3.4.3 Método de Ekelund	87
3.4.3.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon.....	87
3.4.3.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce	88
3.4.3.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al	88
3.5 Cuadro resumen (Valores de carga de laminación).....	89
Tabla 3.15 Resumen de las cargas de laminación	89
CAPITULO IV	92
CONCLUSIONES	92
CAPITULO V	93
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA.....	94

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II	42
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	42
Tabla 2.1 Dimensiones iniciales de las probetas de anillos.....	46
Tabla 2.2 Dimensiones iniciales de las probetas usadas en el ensayo Ford	47
Tabla 2.3 Dimensiones iniciales de las probetas del ensayo de laminación.....	54
CAPITULO III.....	56
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
Tabla 3.1 Dimensiones finales de las probetas de anillos	57
Tabla 3.2 Valores de coeficientes de roce entre aluminio y acero con el uso de grafito.....	58
Tabla 3.3 Dimensiones finales de las probetas usadas en el ensayo Ford.....	60
Tabla 3.4 Valores de carga y variación de espesor registrados en la máquina.....	62
Tabla 3.5 Valores de carga y variación de espesor experimental.....	63
Tabla 3.6 Valores de carga y variación de espesor sin la deformación de la máquina	66
Tabla 3.7 Esfuerzos y deformaciones para el ensayo Ford	67
Tabla 3.8 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Hollomon	73
Tabla 3.9 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Voce	75
Tabla 3.10 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Sah et al.....	78
Tabla 3.11 Cuadro resumen de los esfuerzos de fluencia medio	79
Tabla 3.12 Dimensiones finales de las probetas del ensayo Ford	80
Tabla 3.14 Carga experimental de laminación.....	83
Tabla 3.15 Resumen de las cargas de laminación.....	89

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I.....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
Figura 1.1 Proceso de laminación	4
Figura 1.2 Clasificación de los laminado	6
Figura 1.3 Laminación en caliente	8
Figura 1.4 Geometría de la laminación	12
Figura 1.5 Esfuerzos en la laminación	16
Figura 1.5 Colina de presión	22
Figura 1.6 (a) Flexión de los rodillos. (b) Flexión de los rodillos rectificadas con combadura....	25
Figura 1.7 Control de espesor	26
Figura 1.8 Ensayo de compresión tipo Ford.....	28
Figura 1.9 Curva esfuerzo Vs deformación nominal y real (Ensayo tracción)	30
Figura 1.10 Esfuerzos presentes en una chapa sometida a compresión plana.....	31
Figura 1.11 Curva esfuerzo/carga Vs deformación (Ensayo Ford).....	33
Figura 1.12 Zona elástica y plástica en coordenadas logarítmicas.....	36
CAPITULO II	42
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	42
Figura 2.1 Esquema general del desarrollo experimental	43
Figura 2.2 Esquema del cálculo de la carga de laminación.....	44
Figura 2.3 Gráfica para determinar coeficientes de fricción a partir de la prueba de compresión de anillos.	45
Figura 2.4 Apariencia inicial de la probeta de anillo	46
Figura 2.5 Probeta para el ensayo Ford.....	47
Figura 2.6 Apariencia inicial de la probeta del ensayo Ford.....	48

Figura 2.7 Mordazas para ensayo tipo Ford	49
Figura 2.8 Montaje del ensayo de compresión plana en la Maquina Universal de Ensayos Mecánicos	50
Figura 2.9 Laminadora escala laboratorio, Escuela de Ingeniería Metalúrgica	53
Figura 2.10 Aspecto inicial de la probeta a laminar	54
CAPITULO III	56
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
Figura 3.1 Apariencia final de la probeta de anillo	56
Figura 3.2 a Apariencia final de la probeta 1 del ensayo tipo Ford.....	59
Figura 3.2 b Apariencia final de la probeta 2 del ensayo tipo Ford	59
Figura 3.2 c Apariencia final de la probeta 3 del ensayo tipo Ford.....	59
Figura 3.3 Aspecto final de la probeta laminada.....	81

INDICE DE GRAFICAS

CAPITULO III	56
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
Gráfica 3.3 Esfuerzo nominal versus deformación nominal	68
Gráfica 3.4 Esfuerzo real versus deformación real	69
Gráfica 3.5 Esfuerzos nominales y reales versus deformación	70
Gráfica 3.6 Ajuste con Hollomon, probeta 1.....	71
Gráfica 3.7 Ajuste con Voce, probeta 1	74
Gráfica 3.8 Ajuste Sah et al., probeta 1.....	76
Gráfica 3.9 Comportamiento de la carga en cada celda	82

NOMENCLATURA

Para referencia rápida

A – Área

De – Diámetro externo

Di – Diámetro interno

E – Módulo de Young

e – Deformación nominal

Fr – Carga de laminación

h – Espesor instantáneo

ha – Espesor final de laminación

hb – Espesor inicial de laminación

L – Longitud de proyección del arco del rodillo

l_f – Longitud final

l_o – Longitud inicial

m – Coeficiente de endurecimiento por deformación

n – Módulo plástico

p – Presión

p^+ – Presión de salida

p^- – Presión de entrada

R – Radio del rodillo

R^2 – Coeficiente de determinación

R' – Radio del rodillo corregido

σ' – Esfuerzo de fluencia en compresión plana

$\overline{\sigma'}$ – Esfuerzo medio de fluencia en compresión plana

w – Ancho

w_0 – Ancho inicial

w_f – Ancho final

\overline{Y} – Esfuerzo de fluencia en tracción uniaxial

α – Ángulo de laminación

α_{b*} – Ángulo de mordedura

ε_r – Deformación de relajación

ε – Deformación

S – Esfuerzo nominal

σ_{SS} – Resistencia mecánica de saturación

σ_0 – Esfuerzo atérmico

σ_{x_a} – Esfuerzo longitudinal a la salida

σ_{x_b} – Esfuerzo longitudinal a la entrada

INTRODUCCIÓN

En el proceso de laminación existen ciertas variables que deben ser controladas y estudiadas con precisión para efectuar un trabajo de calidad, aquellas involucradas con las propiedades mecánicas del material a laminar y las relacionadas con la máquina que se quiere emplear. Al estudiar la laminación se busca conseguir formas más eficientes para realizar dicho proceso optimizando las variables involucradas, ya bien sea para mejorar la calidad del producto final o disminuir el tiempo del proceso que se refleja en dinero.

La carga que necesitan aplicar los rodillos para disminuir el espesor inicial de un material a un valor determinado es considerada la principal variable involucrada al momento de realizar el proceso de laminado, existiendo expresiones como las sugeridas por Orowan, Bland y Ford, Parkins, Ekelund, entre otras, que permiten el cálculo aproximado de dichas cargas de laminación. Las expresiones antes mencionadas toman en cuenta parámetros como: el espesor de la plancha, el coeficiente de fricción efectivo, el radio de los rodillos, el ancho de la plancha, la deformación plana del material y el valor de esfuerzo de fluencia en compresión plana. Este último parámetro es determinado por un conjunto de leyes que rigen el endurecimiento por deformación de un material, entre ellas podemos mencionar la ley de Hollomon, ley de Voce y la ley de Sah et al., siendo éstas a su vez función de la deformación y ciertas variables intrínsecas del material. El estudio implica hallar cual combinación de las expresiones antes mencionadas son las que más se aproximan al proceso real de laminación, específicamente al valor de carga real, el cual es muy importante a la hora de diseñar un equipo o estimar costos en un proceso productivo.

Para la elaboración de esta investigación, la hemos dividido en cuatro capítulos.

El Capítulo I trata del fundamento teórico relacionado con el ensayo de compresión plana tipo Ford, explicándose los diferentes parámetros y variables que intervienen en el proceso, también se realiza una explicación de las curvas esfuerzo-deformación y de las leyes de endurecimiento por deformación que las modelan. De igual manera, se explica la teoría involucrada con el proceso de laminación y las expresiones que aproximan los valores de carga reales.

En el Capítulo II se muestra esquemáticamente la metodología seguida para el desarrollo de la investigación. Se muestra cómo se realizó el ensayo de compresión plana tipo Ford para determinar el comportamiento elasto-plástico del material y así calcular el esfuerzo de fluencia medio en compresión plana. También se muestra como se hizo el ensayo de compresión de anillos para determinar el coeficiente de roce existente entre el aluminio y el acero usando grafito como lubricante. Luego, se explica el procedimiento del ensayo de laminación para determinar el valor de carga de laminación experimental. También se aclaran las consideraciones y modificaciones que se tomaron en cuenta, y se nombran las variables y parámetros relacionados con las máquinas usadas.

Seguidamente, en el Capítulo III se realiza el análisis y la discusión de los resultados obtenidos.

Finalmente, se expone las conclusiones obtenidas en la realización de la investigación y se sugieren ciertas recomendaciones.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Generalidades

En el presente capítulo se establecerán los conceptos teóricos más importantes sobre los cuales se basa éste trabajo, se expondrán las expresiones y modelos matemáticos empleados en los capítulos posteriores, referentes fundamentalmente al proceso de laminación en frío y ensayos de compresión plana tipo Ford.

1.2 Laminación

El proceso de deformación plástica que ocurre al pasar un metal a través de un conjunto de rodillos se conoce como "laminado". Este es el proceso de conformación de metales más usado a nivel mundial porque permite que el material sea llevado a un producto final de alta productividad que comienza desde la colada continua, como se puede evidenciar en la Figura 1.1. Al deformar el material, éste se encuentra sujeto a altos esfuerzos de deformación por la acción de compresión de los rodillos y la fricción que existe entre ellos. Las fuerzas de fricción son también responsables de que exista interacción entre el metal y los rodillos. Los rodillos son las piezas más importantes del equipo de laminación, ya que gracias a ellos es que se produce la reducción de espesor del material; partiendo de las variables fijas de estos: el diámetro y el ancho, se tratan de establecer los valores óptimos que deben tener para cada porcentaje de reducción deseado.

Los tipos de laminado que se pueden encontrar en la aplicación industrial, son el laminado en frío y el laminado en caliente. El laminado en frío de metales ha alcanzado un estatus importante en la industria, con éste se puede producir láminas, chapas y hojas de buen acabado superficial y alta resistencia mecánica.

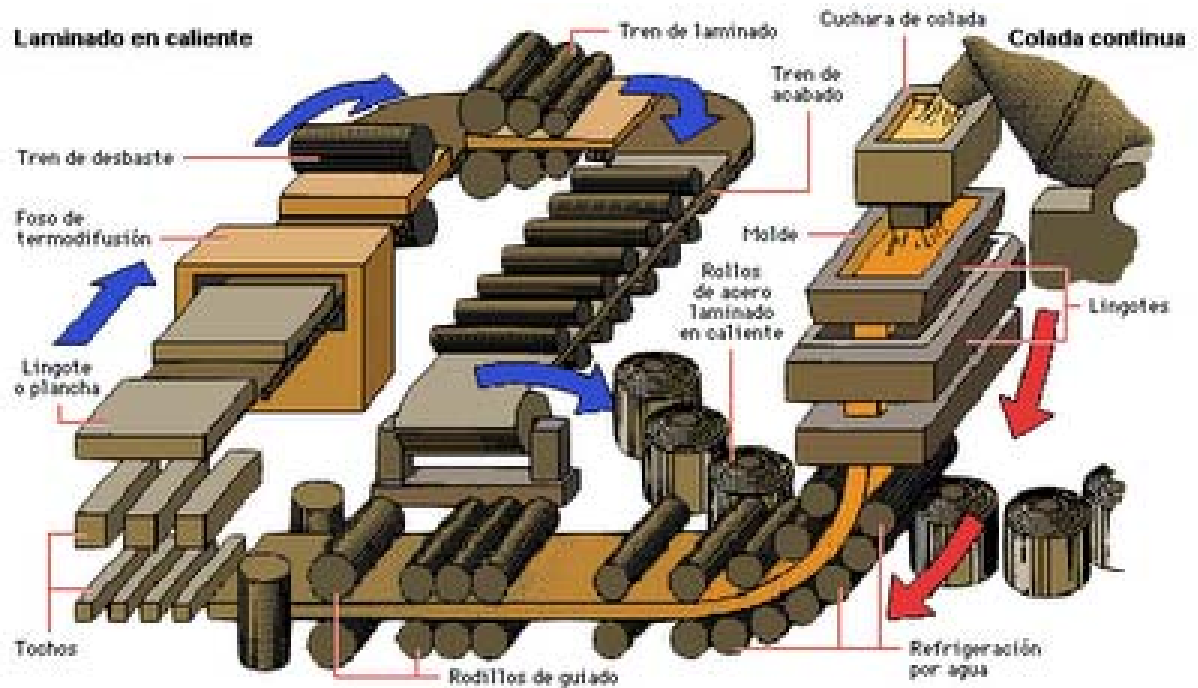


Figura 1.1 Proceso de laminación
(Fuente: www.blogspot/laminacion.com)

1.2.1 Equipos de laminación

Un laminador se compone principalmente de: los rodillos, el sistema de accionamiento para aplicar la fuerza motriz a los rodillos y el control de velocidad de los mismos, los cojinetes y las columnas que soportan los rodillos.

Las fuerzas presentes en la laminación llegan fácilmente a los millones de kilogramos peso, por ende se requieren de construcciones robustas y de motores grandes para alcanzar las fuerzas necesarias en el presente proceso. Las

laminadoras se pueden clasificar dependiendo de la cantidad y ubicación de los cilindros.

a) *Sistema dúo*. Es el tipo más sencillo y corriente y se puede observar en la Figura 1.2(a), y que consta de dos rodillos de acero de gran diámetro, los cuales habitualmente son arrastrados por un motor reductor, en este tipo de laminadores, los rodillos alcanzan una velocidad que varía entre 30 y 60 m/min.

b) *Sistema dúo reversible*. Con este tipo de laminador se logra una mejora en cuanto a la rapidez de las laminaciones y se puede observar en la Figura 1.2(b), en el que el material puede pasar hacia delante o hacia atrás entre los rodillos invirtiendo el sentido de rotación de los mismos.

c) *Sistema trío*. Mostrado en la Figura 1.2(c), que se vale de tres rodillos de los cuales el central es oscilante de manera de acercarse a los exteriores, para alcanzar la adecuada abertura de laminación.

d) *Sistema cuarto reversible*. Es el sistema más comúnmente utilizado para laminación y se puede observar en la Figura 1.2(d), el cual permite tener mayor uniformidad en el espesor de la lámina en sentido transversal y una notable disminución en la potencia necesaria. Su esquema comprende de dos rodillos de trabajo en contacto con el metal, sostenidos por dos rodillos guías de apoyo, lo que garantiza en forma constante la líneas de pasada del material.

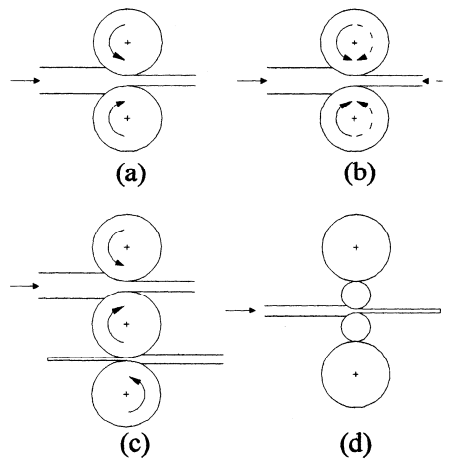


Figura 1.2 Clasificación de los laminado
(Fuente: Dieter)

1.2.2 Material a laminar

Una de las características propias del metal es la resistencia a la deformación, y constituye una característica principal de la fuerza necesaria para conseguir la reducción del espesor en el proceso de laminación. Depende del tipo de aleación y del tratamiento térmico experimentado -si es que existe- (grado de endurecimiento).

En las aleaciones de aluminio este parámetro está relacionado con el tipo y el porcentaje de los aleantes, los cuales tiene como función dar al material determinadas características mecánicas. Para una aleación determinada la resistencia puede variar en función del tratamiento térmico experimentado y por el grado de endurecimiento. A la hora de aplicar los tratamientos térmicos a los materiales a laminar, se hace necesario que previamente se fijen los objetivos para

favorecer las condiciones necesarias de plasticidad, lo que conduciría a obtener una mayor velocidad en la laminación.

Por otra parte en los procesos de laminación, por lo general, el porcentaje de reducción puede variar entre 40 y 60% en función del tipo de aleación, tipo de pasada y potencia del laminador. Usualmente se trata de obtener porcentajes de reducción lo más elevados posibles, ya que si esto ocurre, se obtienen dos beneficios relacionados con la productividad: menor número de pasadas para llegar al espesor final y una mayor velocidad de laminación. Tomando esto en cuenta, se debe recordar que al aumentar el porcentaje de reducción conlleva a la aplicación de mayor presión o mayor velocidad.

1.2.3 Laminación en caliente

Comprende el laminado de metales de dimensiones comprendidas entre 6 y 10 metros de longitud y de 15 a 20 cm de espesor; se realiza a temperaturas superiores a 0,6 veces la temperatura de fusión absoluta del material, por reducción continua reversible de espesor, a presión constante, a través de un par de cilindros, Figura 1.3. El término de laminación en caliente, debería aplicarse únicamente a la laminación de una placa con una temperatura tal, que la recristalización se produjese de manera continua durante el proceso de laminación, obteniendo un material completamente recocido al final de la operación, aunque en la práctica la laminación se realiza a una temperatura inferior a la de recocido.

Este tipo de laminación no permite reducir el espesor del metal, hasta el pedido por los clientes, debido a que las tolerancias en los mismos son demasiado grandes, y a que no son constantes a lo ancho de la lámina, haciendo que los espesores pequeños sean difíciles de conseguirse sin riesgo de roturas, el estado superficial es incompatible con las exigencias del mercado y las características del metal varían a lo largo de la lámina.

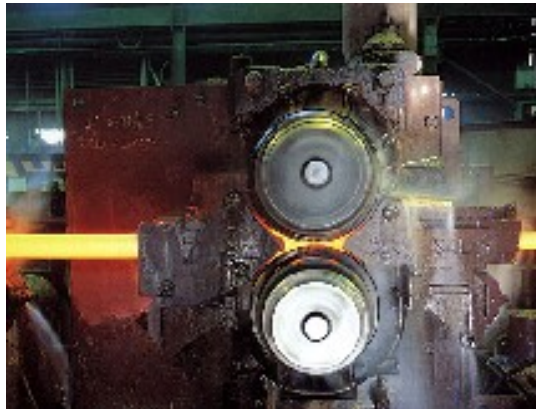


Figura 1.3 Laminación en caliente
(Fuente: www.sidelpa.com)

1.2.4 Laminación en frío

El laminado en frío es el más apropiado para el análisis teórico de todos los procesos de conformado de metales, por ésta razón la teoría de laminación en frío se ha desarrollado ampliamente. Es usual laminar grandes cantidades de material obteniéndose bobinas de longitud ininterrumpidas, de éste modo las cargas permanecen estacionarias y no se ven afectadas por el comportamiento que existe al principio y al final del proceso. En la práctica usualmente son

encontrados diversos trenes de laminación trabajando conjuntamente, en donde es esencial que la tensión del material que está siendo laminado se mantenga entre los límites estrechos para mantener un espesor constante. A medida que el espesor del material se va reduciendo, la longitud de éste aumenta y su velocidad de salida de laminado alcanza valores elevados. A causa de estas elevadas velocidades y de la enorme producción de los trenes de laminación, es importante considerar ciertos aspectos económicos, como la adecuada planificación del número de pasadas de reducción de espesor en el proceso, que son determinadas principalmente por las propiedades mecánicas del material y la capacidad del laminador.

Generalmente, para el proceso de laminación en frío el lubricante utilizado es el aceite mineral, ya que este evita las manchas de oxidación que producen otros refrigerantes, como las emulsiones; además, tiene un gran poder de lubricación, por lo que se pueden realizar mayores reducciones de espesor.

La reducción máxima de sección por cada pasada es directamente proporcional al cuadrado del coeficiente de roce entre los rodillos y el material y al radio de los mismos:

$$(\Delta h)_{\max} = \mu^2 R$$

(1.1)

Por ésta razón, es usual que en el proceso de laminado se obtenga un mayor cambio de sección utilizando lubricantes no tan buenos, tomando en cuenta que si el coeficiente de fricción es demasiado elevado la carga puede llegar a ser excesiva.

Si bien la máxima reducción de sección por pasada aumenta con el radio del rodillo, la carga F_r también crece. R' representa el radio corregido debido a la

deformación elástica presente en los rodillos al realizar un proceso de laminación, expresión propuesta por Hitchcock [24] que será profundizada más adelante:

$$\frac{F_r}{w} = R' \times \int p(R, \alpha) d\alpha$$

Por esta razón, para evitar grandes cargas y la necesidad de equipos pesados, se suele mantener radios pequeños en los rodillos pero con esto se puede llegar a espesores finales más delgados.

$$(h)_{\min} = \mu R \frac{\sigma'}{2920} \quad (1.2)$$

Los rodillos largos y esbeltos tienden a flectarse bajo carga produciendo una variación de espesor a lo largo del material que está siendo laminado, de manera que los rodillos de diámetro pequeño normalmente van soportados por grandes rodillos de apoyo. Para aquellos procesos donde el producto final es muy fino el sistema se puede complicar aún más siendo soportado los mismos rodillos de apoyo mediante rodillos de trabajo de solamente 25 ó 50 mm de diámetro. Estos laminadores de rodillos múltiples son capaces de producir un producto final de 0,250 mm de espesor de materiales tan duros como aleaciones de Zirconio y Titanio. Cuando el esfuerzo de fluencia σ' es pequeño, como en el aluminio, se puede utilizar rodillos de diámetros mayores. Las chapas de aluminio se laminan en laminadores dúo hasta espesores de 0,025 mm.

La teoría de laminado de chapa ayuda a comprender las interacciones de todos estos factores: espesor, dureza de la chapa, reducción de sección, diámetro de los rodillos, holgura entre rodillos, tensión de extensión hacia adelante y atrás, velocidad y coeficiente de rozamiento. Ésta teoría proporciona la apreciación cuantitativa del proceso de laminado, que es una buena orientación para la elección del equipo y de las condiciones de trabajo, así como una base para el cálculo cuantitativo de las cargas de laminado.

1.2.4.1 Defectos debido a la laminación en frío

En la realización del proceso de laminado se suelen presentar *defectos superficiales* que aparecen debido a que el aluminio y sus aleaciones, débilmente aleadas, son muy blandas, por lo que la superficie del material sometido al proceso presenta las huellas de los cilindros. También puede existir *falta de uniformidad o defectos de planeidad* en el espesor de la lámina, que se presenta en forma de ondulaciones y/o abolladuras en las orillas; esto se puede evitar disminuyendo la reducción de espesor por pasada. Otro de los posibles defectos son los *Rayones y las Adherencias* de metal, siendo el primero, todas y cada una de las marcas que se producen en la superficie del material, cada una de ellas constituida por una línea estrecha de unos pocos milímetros de longitud, y una profundidad que oscila entre unas décimas o unas centésimas de milímetros. Mientras que el segundo, se origina por un depósito de metal sobre una superficie en movimiento, y tiende a desaparecer al cepillar la superficie de los rodillos o cilindros. Se presenta con mayor frecuencia cuando se lamina material que previamente ha sido recocido.

1.2.5 Cálculo elemental de la carga de los rodillos

Al considerar un proceso de compresión homogénea entre plataformas bien lubricadas se puede obtener valores de cargas en los rodillos con un cálculo simple pero no estrictamente exactos. Pero en la realidad, normalmente el esfuerzo de fluencia de la pieza terminada será mayor que el de la pieza inicial, debido al endurecimiento por deformación, pero está permitido para al menos una chapa endurecida previamente por deformación suponer un valor medio de esfuerzo. La carga F_r necesaria para comprimir la chapa viene dada por:

$$F_r = \bar{Y}Lw \quad (1.3)$$

En donde L es la longitud medida en la dirección de laminación e igual a la longitud proyectada por el arco de contacto, w es el ancho de la chapa, siendo el área proyectada de contacto Lw , y \bar{Y} es un valor medio de esfuerzo supuesto.

A partir de la figura 1.4, se puede obtener una relación geométrica entre la longitud proyectada L y el cambio de sección Δh .

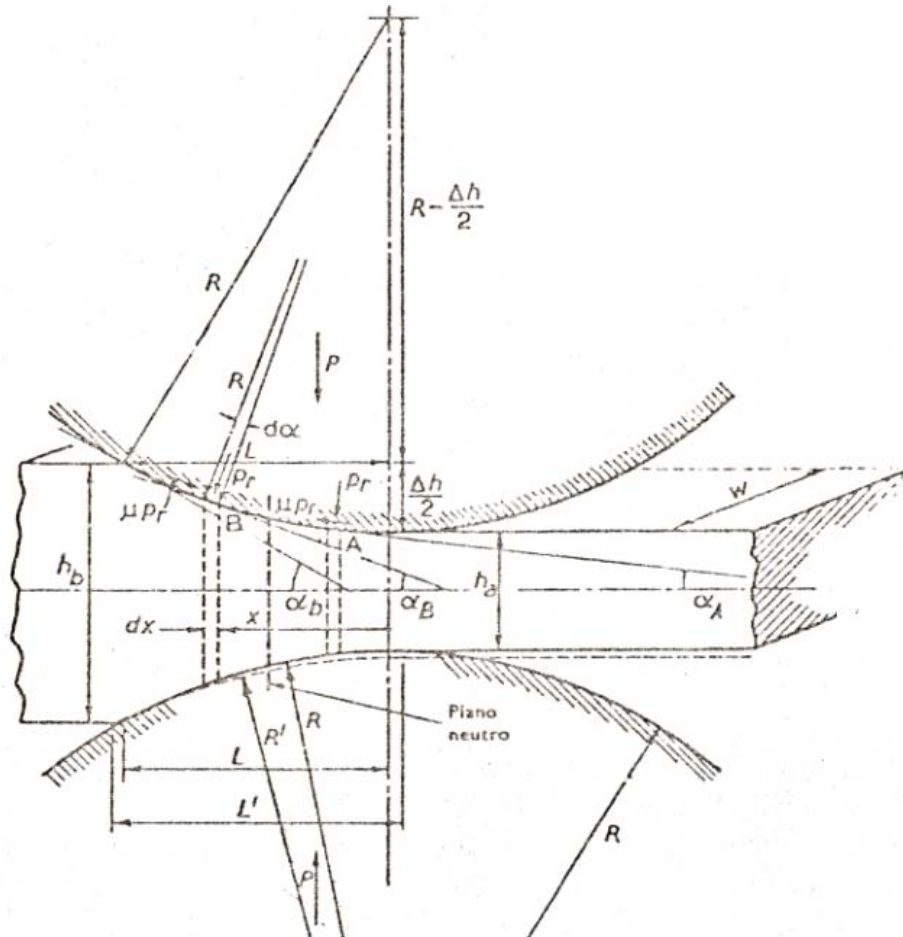


Figura 1.4 Geometría de la laminación

(Fuente: Imagen extraída del Rowe)

$$L^2 = R^2 - \left(R - \frac{1}{2}\Delta h\right)^2 = R\Delta h - \frac{1}{4}\Delta h^2$$

En la práctica se suele usar un rodillo de radio mucho mayor que la reducción de sección, por lo tanto:

$$L \approx \sqrt{R\Delta h}$$

Sustituyendo en la expresión 1.3 obtenemos:

$$\frac{F_r}{w} = \bar{Y} \sqrt{R\Delta h}$$

Actualmente las operaciones de laminado en frío se realizan sobre una chapa ancha relativamente delgada, lo que permite que la deformación lateral sea despreciable haciendo más exacta la suposición de condiciones de deformación plana, así se sustituye \bar{Y} por $\bar{\sigma}'$, siendo éste último el esfuerzo fluencia medio en compresión plana. Además, es sugerido por Orowan [25] añadir un margen de 20% para el rozamiento que no es tomado en cuenta.

$$\frac{F_r}{w} = 1,2 \bar{\sigma}' \sqrt{R\Delta h} \quad (1.4)$$

1.2.6 Determinación de la presión de los rodillos a partir del cálculo de los esfuerzos locales

1.2.6.1 Condiciones propuestas por Larke para el cálculo de la presión de los rodillos en el laminado en frío.

Las condiciones propuestas por Larke [23] para el cálculo de la presión de los rodillos en el laminado son las siguientes:

a) *Condiciones de deformación plana.* Casi siempre en toda laminación en frío la chapa tiene un ancho w mucho mayor al espesor h . Por lo tanto es lógico considerar una deformación plana y así poder aplicar la condición de fluencia para la deformación plana, de forma que relacione el esfuerzo de fluencia en compresión plana σ' y la presión ejercida por los rodillos p . Esto es considerable para rozamientos pequeños que comúnmente son usados en los procesos de laminado en frío, pero si los rozamientos son elevados todo esto no se cumple.

b) *Deformación homogénea.* En la mayoría de los procesos de laminado en frío, el metal se deforma de manera homogénea, pero si el rozamiento es elevado o si se hace una pasada ligera, las capas superficiales pueden deformarse mucho más que la región central, y no podemos considerar σ' uniforme en toda la sección.

c) *Coefficiente de fricción constante.* Mediante ensayos que se han realizado para medir el rozamiento, se ha determinado que existe concordancia entre los valores de carga teóricos y los experimentales lo que indica que ésta hipótesis es válida a través de la separación de los rodillos siempre que el coeficiente de rozamiento sea pequeño. Para valores elevados de μ es necesario hacer ciertas modificaciones.

d) *Radio constante en la curvatura de los rodillos.* Para determinar los esfuerzos locales y cargas que experimentan los rodillos se considera que éstos son rígidos. Pero en verdad los rodillos se deforman de manera apreciable, lo cual se debe de compensar suponiendo que se aplastan hasta alcanzar un radio R' algo mayor, permaneciendo con un perfil circular en el área de contacto. Quien determinó la expresión del cambio de magnitud del radio fue Hitchcock [24].

$$R' = R \left(1 + \frac{c}{(\Delta h)} \cdot \frac{F_{r1}}{w} \right) \quad (1.5)$$

Donde el valor de c y sus componentes vienen dados por las siguientes expresiones:

$$c = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \quad \nu = 0,3 \quad E = 220GPa$$

e) *El punto neutro dentro del arco de contacto.* A medida que la chapa reduce su espesor, se alarga e incrementa su velocidad lineal hasta que en la salida su velocidad es mayor que la velocidad periférica de los rodillos y el rozamiento actúa en dirección inversa. Existe un punto neutro dentro de la holgura de los rodillos, en el cual la velocidad superficial de la chapa es igual a la velocidad periférica de los rodillos, no existiendo deslizamiento, y se invierte la dirección de la fuerza de rozamiento. Esto se cumple en toda operación real de laminación. Si el punto neutro no estuviera dentro del arco de contacto, la fuerza de rozamiento actuará solamente en una dirección, y los rodillos se deslizarían sobre la pieza.

f) *Deformación elástica de la chapa despreciable.* En la entrada de la chapa es despreciable ya que en ese sector se comprime elásticamente antes de que la deformación plástica comience y se recupera cuando pasa el punto mínimo del espacio entre los rodillos, pero a la salida los efectos de recuperación elástica son más importantes debido al mayor esfuerzo de fluencia. Estos efectos pueden ser despreciables para pasadas que superan el 10% de reducción.

g) *Velocidad pequeña de endurecimiento por deformación.* Para metales previamente endurecidos por deformación que son utilizados para una segunda o posterior pasada, la hipótesis puede ser considerada. Sin embargo, para metales recocidos los errores pueden ser apreciables, además el acabado superficial cambia considerablemente durante la laminación, variando las condiciones de rozamiento. Por tal razón la mayoría de las operaciones de laminado en frío se realizan con materiales endurecidos por deformación.

h) *Pequeñas fuerzas de tracción aplicadas.* La finalidad de aplicar fuerzas de tracción de avance en un laminador es enrollar la banda de manera adecuada y enderezar la misma. Sin embargo, la tracción también reduce la carga de los

rodillos y puede tener una importancia en la laminación de chapa muy fina ya que reduce el aplastamiento de los rodillos. Cuando se aplican fuerzas de tracción muy elevadas, la variación de p sobre el arco de contacto no puede exceder la variación de σ' .

1.2.6.2 Derivación y solución general de la ecuación diferencial

Los elementos diferenciales A y B que se observan en la Figura 1.5 se encuentran sometidos a ciertas fuerzas en sentido longitudinal. Se puede evaluar dichas fuerzas en el lado de la salida y en el lado de la entrada del punto neutro, el sector de salida que corresponde al elemento A donde las fuerzas actuantes vienen dadas por las siguientes expresiones:

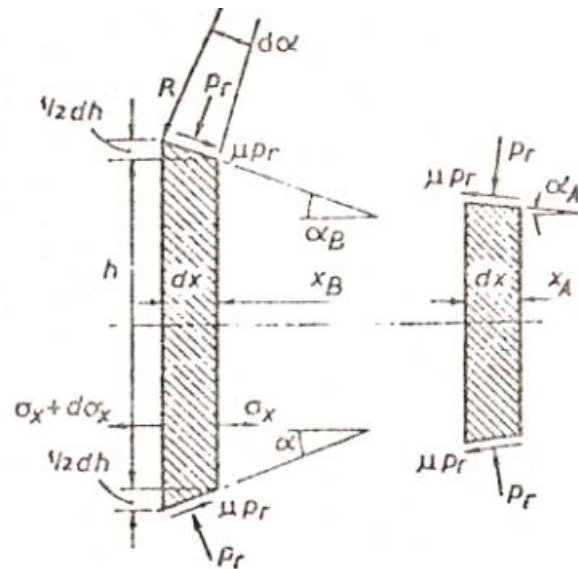


Figura 1.5 Esfuerzos en la laminación
(Fuente: Imagen extraída del Rowe)

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - h\sigma_x \quad \text{Debido al esfuerzo longitudinal}$$

$$2\left(p_r \frac{dx}{\cos \alpha}\right) \text{sen} \alpha \quad \text{Debido a la presión radial en ambos rodillos}$$

$$2\mu\left(p_r \frac{dx}{\cos \alpha}\right) \cos \alpha \quad \text{Debido al rozamiento contra ambos rodillos}$$

Para una laminación estacionaria las fuerzas en el eje x deben estar en equilibrio:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \text{tg} \alpha + \mu p_r dx = 0$$

El elemento B en el sector de entrada del punto neutro da una ecuación similar pero con la fuerza de rozamiento en dirección opuesta:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \text{tg} \alpha - \mu p_r dx = 0$$

Combinando éstas dos se tiene:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \text{tg} \alpha \pm \mu p_r dx = 0 \quad (1.6)$$

De manera similar, por equilibrio en el eje vertical, usando el criterio de fluencia de von Mises y otras simplificaciones, se desarrolla la ecuación 1.6 hasta obtener la ecuación diferencial del proceso de laminación que se expresa de la siguiente manera:

$$h\sigma' \frac{d}{d\alpha} \left(1 - \frac{p}{\sigma'}\right) + \left(1 - \frac{p}{\sigma'}\right) \frac{d(h\sigma')}{d\alpha} = -2Rp(\text{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha)$$

La ecuación diferencial fue derivada primeramente por Von Kármán [22] y la cual lleva su nombre, pero son Bland y Ford quienes sugieren que el primer término de la ecuación se puede despreciar en comparación al segundo, debido a que la variación de la presión con la posición angular es mucho mayor que la variación de la tensión de fluencia y que además la variación de $h \sigma'$ será todavía más pequeña (El σ' se incrementa a medida que el h disminuye). Esta simplificación permite integrar la ecuación directamente para obtener así las expresiones de cargas a la entrada y salida de los rodillos:

$$\frac{p^-}{\sigma'} = c^- \cdot \frac{h}{R} \left(e^{(-\mu H)} \right) \text{ Valor de presión a la entrada} \quad (1.7)$$

$$\frac{p^+}{\sigma'} = c^+ \cdot \frac{h}{R} \left(e^{(+\mu H)} \right) \text{ Valor de presión a la salida} \quad (1.8)$$

Donde el signo – representa el valor de la presión a la entrada y el signo + a la salida, los valores de c representan las constantes de integración que se obtienen a partir de las respectivas condiciones a la entrada y a la salida, μ el coeficiente de fricción, H viene dada por la siguiente expresión:

$$H = 2 \sqrt{\left(\frac{R}{h_a} \right)} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_a}} \cdot \alpha \right)$$

Y el valor de h viene dado por la expresión:

$$h = h_a + R\alpha^2$$

h_a representa el valor de espesor de salida de la chapa laminada y α es el ángulo de contacto.

1.2.6.3 Laminado sin fuerzas de tracción externas

En un proceso de laminado en el cual no se quiere usar tracción externa para que la chapa penetre en los rodillos, es necesario que la componente longitudinal de rozamiento de las superficies de los rodillos sobrepase el valor de la presión radial a la entrada:

$$\mu(p_r dA) \cos \alpha_{b^*} \geq (p_r dA) \operatorname{sen} \alpha_{b^*}$$

$$\mu \geq \operatorname{tg} \alpha_{b^*}$$

El valor máximo conocido como ángulo de mordedura o ángulo de agarre viene dado por la expresión:

$$\alpha_{b^*} = \operatorname{arctg}(\mu)$$

Tomando en cuenta variables geométricas queda:

$$L \approx \sqrt{R\Delta h}; \operatorname{tg} \alpha_{b^*} = \frac{L}{\left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{R}\right)}$$

Esto determina la reducción de sección máxima que se puede obtener a la hora de laminar un material, obteniendo la ecuación 1.1 antes mencionada:

$$\mu \geq \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{R}\right)}; \Delta h_{\max} = \mu^2 R$$

Ahora bien, en ausencia de fuerzas de tracción frontales y posteriores, los esfuerzos longitudinales a la salida (σ_{xa}) y a la entrada (σ_{xb}) deben ser iguales a cero:

$$\sigma_{xa} = \sigma_{xb} = 0$$

Seguidamente, usando las ecuaciones de presiones de entrada 1.7 y salida 1.8 obtenidas anteriormente y tomando en cuenta la ausencia de tracción se obtiene la nueva solución:

$$\frac{p^-}{\sigma'} = \frac{h}{h_b} \cdot e^{(\mu(H_b-H))} \quad \text{Valor de presión a la entrada} \quad (1.9)$$

$$\frac{p^+}{\sigma'} = \frac{h}{h_a} \cdot e^{(\mu H)} \quad \text{Valor de presión a la salida} \quad (1.10)$$

1.2.6.4 Laminado con fuerzas de tracción en la salida y la entrada

Para mantener la chapa plana y también para controlar el espesor normalmente se mantiene una fuerza de tracción en la banda. Aún los laminadores de un sólo par de rodillos normalmente emplean bobinadoras movidas a motor. Esta fuerza de tracción tiene la ventaja de reducir las cargas de laminación. Para determinar las expresiones correspondientes se considera condiciones límites para las fuerzas traccionales de la salida t_a y de la entrada t_b . De tal manera se obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{p^-}{\sigma'} = \left(1 - \frac{t_b}{\sigma'_b}\right) \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu(H_b-H)} \quad \text{Valor de presión a la entrada}$$

$$\frac{p^+}{\sigma'} = \left(1 - \frac{t_a}{\sigma'_a}\right) \frac{h}{h_a} \cdot e^{\mu H} \quad \text{Valor de presión a la salida}$$

1.2.7 Métodos para el cálculo de la fuerza de laminación

1.2.7.1 Método de Orowan, Bland y Ford

Orowan, Bland y Ford [26] calculan la carga de los rodillos integrando de manera gráfica los valores correspondientes de las presiones verticales p , tanto de entrada como de salida que tienen lugar a través del arco de contacto.

A partir de la forma de los cilindros deformados:

$$dx = R d\alpha \cos \alpha \approx R d\alpha \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right)$$

Puesto que no es probable que α exceda de 0.1 radianes (6°), $\frac{1}{2} \alpha^2$ será menor que 0.005 y se puede despreciar. De este modo:

$$p dx \approx p R d\alpha$$

Entonces la carga de los cilindros por unidad de área será:

$$\sigma' = \frac{S}{\left(1 + \frac{\mu w}{2h}\right)}$$

Suponiendo que el radio de los rodillos deformados sea constante en todo el conjunto de la región de contacto, las dos ramas de la curva de presión se pueden integrar por separado:

$$\frac{F_r}{w} = \int_0^{\alpha_b} p \cdot R d\alpha = \int_0^{\alpha_N} p^+ d\alpha + \int_{\alpha_N}^{\alpha_b} p^- d\alpha \quad (1.11)$$

$$Fr = R \times (\text{Área bajo la curva}) \times w$$

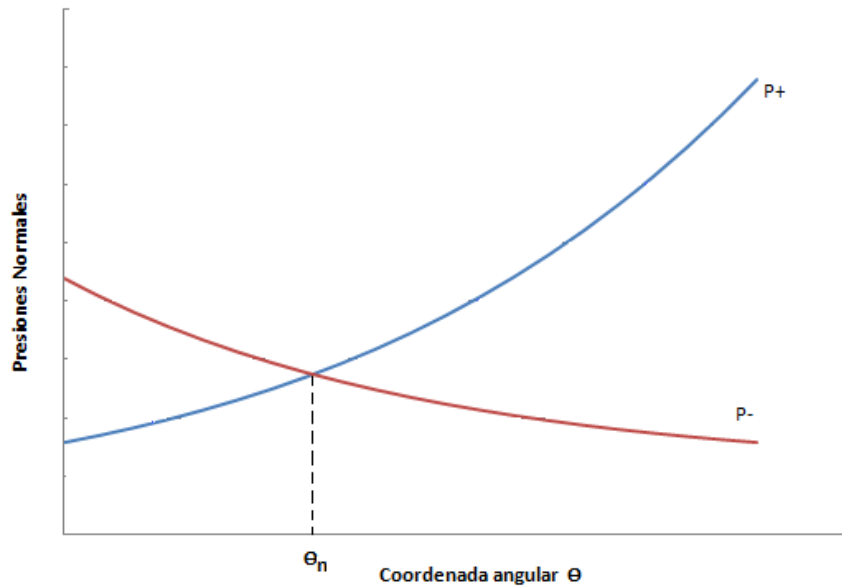


Figura 1.5 Colina de presión

1.2.7.2 Método de Parkins

Una forma mucho más simple de estimar la carga de laminación se obtiene a partir de una modificación de la ecuación propuesta para determinar la carga en un proceso de forja en compresión plana entre plataformas y en la presencia de fricción. Parkins sugirió las siguientes modificaciones:

$$h = \frac{(h_b - h_a)}{2}$$

$$L = \sqrt{(R\Delta h)}$$

Obteniendo así

$$F_r = w\sqrt{(R\Delta h)} \cdot \bar{\sigma}' \left(1 + \mu \frac{\sqrt{(R\Delta h)}}{(h_b + h_a)} \right) \quad (1.12)$$

Donde $\bar{\sigma}'$ es el esfuerzo fluencia medio en compresión plana. Dicho parámetro puede determinarse gráficamente ó algebraicamente de la curva esfuerzo contra deformación a la velocidad de deformación apropiada del material.

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon \quad (1.13)$$

Donde el valor de ε es la deformación plana debida a la reducción de espesor al final de la pasada.

1.2.7.3 Método de Ekelund

En 1927, mediante el análisis del esfuerzo de los rodillos, Ekelund [27] propuso una ecuación para el cálculo de la carga de los mismos. Incluyendo los efectos de la deformación de los rodillos, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$F_r = \bar{\sigma} w \sqrt{(R' \Delta h)} \cdot \left(1 + \frac{1,6 \mu \sqrt{(R' \Delta h)} - 1,2 \Delta h}{(h_b + h_a)} \right) \quad (1.14)$$

Esta ecuación viene en función del rozamiento y proporciona valores bastante buenos de las cargas de los rodillos para un amplio margen de tamaño y reducciones.

1.2.8 Distorsiones en los rodillos de laminación

1.2.8.1 Flexión de los cilindros. Aumento del diámetro central (alabeo)

La carga distribuida a lo largo de la chapa produce un momento flector alrededor de los cojinetes de los cuellos de los rodillos donde se soportan éstos. Por supuesto los rodillos son muy cortos y rígidos, pero a pesar de todo se flexionan en una pequeña proporción, de la manera que se muestra en la Figura 1.6a, aunque aquí se muestra a una escala muy exagerada. Esta flexión se puede calcular con bastante exactitud.

El resultado de la flexión de los rodillos es que las chapas laminadas resulten más gruesas en el centro que en los bordes (generar una corona), quizás

una pocas centésimas pero resultan inaceptables para chapas de gran precisión. Este defecto se puede corregir con la elaboración de rodillos de perfiles convexos de manera que los efectos combinados de flexión y de aplastamiento longitudinal proporcionen una interface plana y una chapa paralela como se muestra en la Figura 1.6b, de igual manera este fenómeno se puede corregir con la adición de ciertos gatos hidráulicos que flexionen a los rodillos para así contra restar el defecto del producto final.

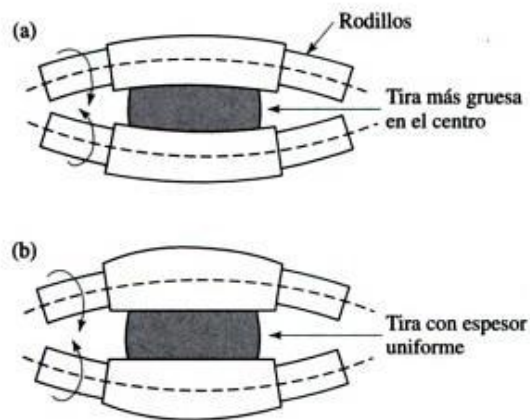


Figura 1.6 (a) Flexión de los rodillos. (b) Flexión de los rodillos rectificadas con combadura. (Fuente: Kalpakjian S., Schmid S)

1.2.8.2 Distorsión elástica del laminador (Control de espesor).

A pesar de que los rodillos de laminación están hechos de un material de fundición rígido, éstos pueden sufrir deformaciones bajo grandes cargas de trabajo. En consecuencia, la luz entre los rodillos se incrementa linealmente al incrementar la carga durante el proceso de laminación, como se puede evidenciar en la Figura 1.7 (a), esta línea se conoce como módulo del laminador, y es un factor importante que se debe tener en cuenta cuando se ajusta la luz entre cilindros y así garantizar el espesor final de la chapa que se desea. Siendo g la luz o la holgura entre cilindros antes de que entre la chapa y h_a el espesor de salida o

calibre, la recuperación elástica del laminador s viene dada por la siguiente expresión.

$$h_a = g + s \quad (1.15)$$

La Figura 1.7 (b) se obtiene utilizando la ecuación (1.11) de la colina de fricción, para calcular la carga requerida para laminar una chapa de espesor inicial h_b hasta diversos espesores finales h_a .

A medida que la carga requerida por la reducción de espesor aumenta, el huelgo real también aumenta y el espesor de la chapa realmente producido se calcula a partir de la intersección de estas dos líneas, también obteniéndose el valor de la carga real como se muestra en la Figura 1.7 (c).

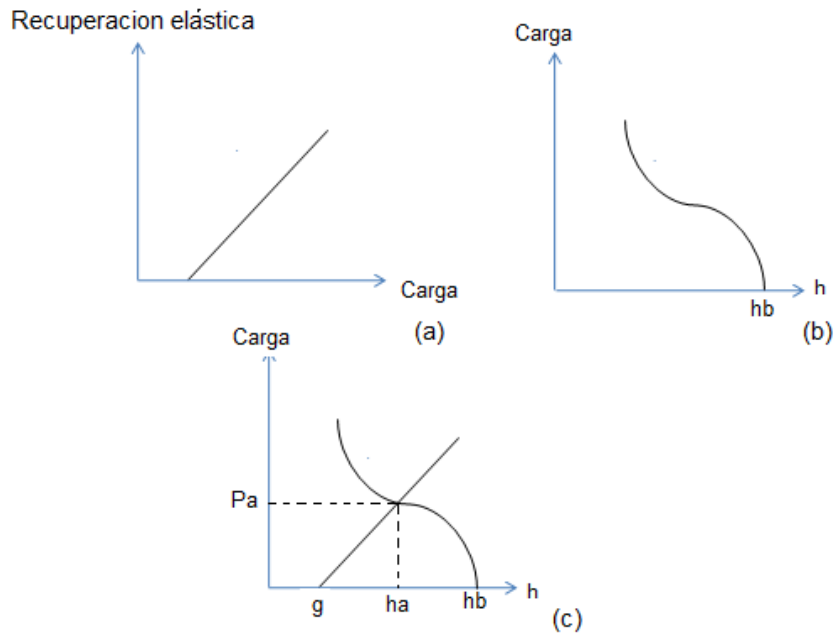


Figura 1.7 Control de espesor
(Fuente: Rowe)

1.3 Compresión con deformación plana

En todas las operaciones de conformado de metales, tal como el laminado en frío la pieza trabajada se encuentra sometida a una serie de esfuerzos y deformaciones. El objeto principal de la teoría de conformado de los metales es poder calcular el grado de deformación que experimentará la pieza y las fuerzas necesarias para producirla, para lo cual es esencial de antemano conocer las características de deformación del material. Debido a que en la laminación se genera un estado de deformación bastante aproximado al estado de deformación plana se utiliza el ensayo tipo Ford para determinar estas características, gracias a que en este ensayo se somete al material a unas deformaciones similares a los experimentados en un proceso de laminación.

1.3.1 Ensayo de compresión tipo Ford.

En año 1952 Ford y Watts desarrollaron el ensayo de compresión plana, el cual se realiza sobre una chapa de espesor h y ancho w que se comprime entre dos plataformas o indentores iguales de ancho b y longitud mayor que w , como se muestra en la figura 1.8. La condición de deformación plana implica que en una dirección ésta sea nula, es decir que la deformación lateral es despreciable, lo cual se logra haciendo que el ancho de la chapa w sea al menos 5 y preferiblemente 10 veces b . Otra consideración importante en este ensayo es la relación h/b entre el espesor de la chapa y el ancho del indentor; si ésta es muy pequeña, implica un ancho de plataforma relativamente grande, lo cual incrementaría la influencia del rozamiento, y en caso de ser alta tendríamos un espesor de chapa grande, por lo que el ensayo se convertiría en un procedimiento de indentación mediante una

simple cuña. Por consiguiente la relación h/b se elige de una manera que esté entre $1/4$ y $1/2$ con lo que se logra:

1. Un error máximo del 2% proveniente de la contracción geométrica del material.
2. La presión es realmente representativa del esfuerzo de fluencia.
3. La influencia del rozamiento se reduce, si además se lubrica debidamente entre la chapa y los indentores.

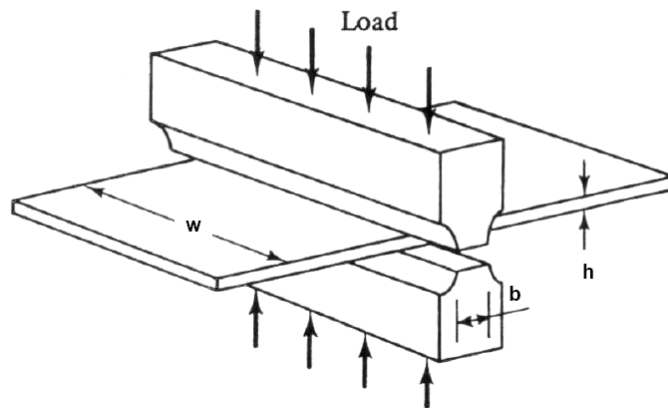


Figura 1.8 Ensayo de compresión tipo Ford
(Fuente: Seminario ensayos de compresión plana para la
Determinación de curvas esfuerzo-deformación (E.S Puchi-Cabrera))

1.3.2 Relaciones importantes de las curvas Esfuerzo-Deformación (Compresión Plana)

1.3.2.1 Deformación nominal (e)

Similar al ensayo de tracción la deformación nominal se define como la variación del espesor dividida por el espesor inicial. Es importante saber que el espesor final es menor que el inicial por tal razón se toma el valor absoluto de su diferencia para mantener un signo positivo, además la deformación nominal no tiene unidades, aunque a menudo se utiliza milímetros entre milímetros; el valor de la deformación obviamente es independiente del sistema de unidades.

$$e = \frac{(h_o - h)}{h_o} \quad (1.16)$$

1.3.2.2 Deformación real (\square)

Se define como el logaritmo natural de la relación espesor inicial y espesor instantáneo para cierta carga instantánea P.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_o}{h}\right) \quad (1.17)$$

1.3.2.3 Esfuerzo nominal (S)

Es la relación que existe entre la carga aplicada y el área de contacto. Para un ensayo de tracción uniaxial éste valor representa al esfuerzo nominal debido a que el área de la probeta varía a medida que se estira la misma a diferencia del valor real, como se muestra en la figura 1.9.

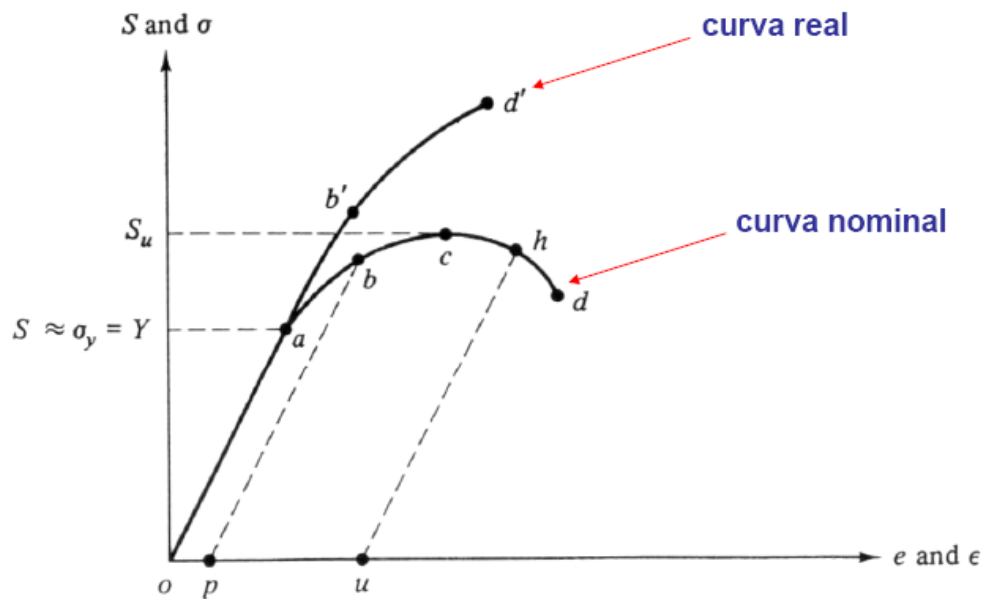


Figura 1.9 Curva esfuerzo Vs deformación nominal y real (Ensayo tracción)

En cambio en el ensayo de compresión tipo Ford el área de compresión se mantiene constante, se puede considerar que éste valor si representa el esfuerzo real pero debe ser corregido por el efecto de la fricción. Por lo tanto éste valor sigue representando el esfuerzo nominal de compresión plana.

$$S = \frac{P_c}{A_o} \tag{1.18}$$

1.3.2.4 Esfuerzo real en compresión plana (σ')

Para determinar el esfuerzo real de un ensayo de compresión plana es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones debidas al roce que existe entre el indenter y la probeta al momento de ejercerse la carga. Para minimizar el efecto del roce se utiliza un lubricante, sin embargo el coeficiente de fricción nunca alcanza un valor de cero, entonces el esfuerzo real se puede deducir

tomando en cuenta los esfuerzos que actúan en un diferencial de presión, tal como muestra la Figura 1.9:

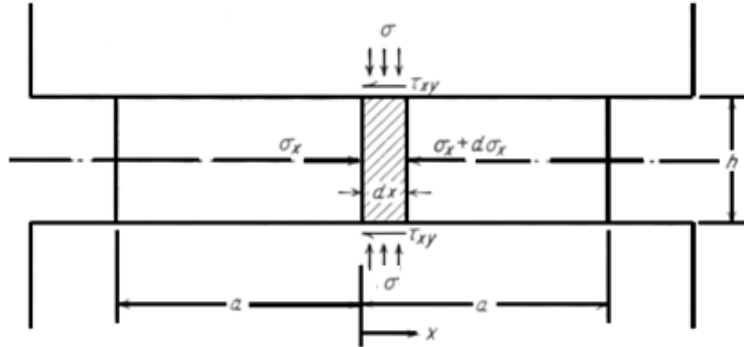


Figura 1.10 Esfuerzos presentes en una chapa sometida a compresión plana.
(Fuente: Seminario compresión plana (Prof. Puchi))

Y desarrollando se obtiene:

$$(d\sigma_x - d\sigma_x - \sigma_x)h - 2\tau(dx) = 0$$

$$\cancel{\sigma_x}h - \cancel{\sigma_x}h - d\sigma_x h - 2\tau_{xy} dx = 0$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{2\mu\sigma}{h}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma^r \rightarrow \text{En condiciones de deformación plana}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma^r = \sigma - \sigma_x \rightarrow \text{Asumiendo que } \sigma \text{ y } \sigma_x \text{ son esfuerzos principales positivos}$$

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{d\sigma_x}{dx} \rightarrow \frac{d\sigma}{dx} = -\frac{2\tau_{xy}}{h}$$

$$\tau_{xy} = \mu\sigma \rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{2\mu}{h} dx$$

$$\ln \sigma = -\frac{2\mu}{h} x + \ln C$$

$$\text{Si } x = a = \frac{w}{2} \rightarrow \sigma_x = 0 \text{ y } \sigma = \sigma^r$$



$$S = \sigma^r \exp\left[\frac{2\mu}{h}(a-x)\right] \approx \sigma^r \left[1 + \frac{2\mu(a-x)}{h}\right]$$

$$S = \int_0^a \frac{S dx}{a} = \sigma^r \frac{\exp\left(\frac{2\mu a}{h}\right) - 1}{2\mu a/h}$$

Valida para el ensayo tipo Ford

$$S = \sigma^r \left(\frac{h}{\mu w}\right) \left[\exp\left(\frac{\mu w}{h}\right) - 1\right]$$

(1.19)

Esta ecuación no debe aplicarse si

$$\frac{\mu w}{h} \geq \ln\left(\frac{1}{2}\mu\right)$$

$$S = \sigma^r \left(1 + \frac{\mu w}{2h}\right)$$

$$\text{Si } \frac{\mu w}{h} \leq 0,25$$

La figura 1.11 representa gráficamente el comportamiento de un material sometido a compresión plana mediante un ensayo Ford. La línea roja representa la curva de presión contra disminución de espesor y la curva verde representa la curva de esfuerzo contra deformación, tomando en cuenta efectos del roce.

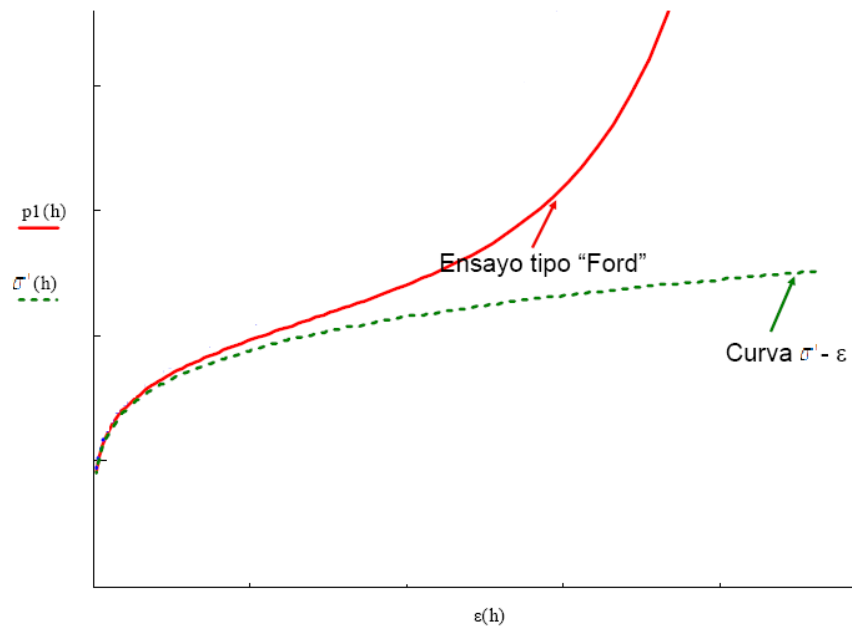


Figura 1.11 Curva esfuerzo/carga Vs deformación (Ensayo Ford)
(Fuente: Seminario compresión plana (Prof. Puchi))

1.3.2.5 Relación entre la deformación nominal y la real

Si de la ecuación de deformación nominal 1.16 despejamos h_0/h y lo sustituimos en la ecuación de la deformación real, se obtendrá:

$$\varepsilon = \ln(1 - e) \quad (1.20)$$

1.3.2.6 Porcentaje de reducción de espesor (%Rh)

Se define como la variación del espesor dividida entre el espesor inicial.

$$\%Rh = \frac{(h_0 - h)}{h_0} \times 100$$

1.3.3 Expresiones matemáticas de las zonas elásticas y plásticas de la curva Esfuerzo Vs Deformación real

1.3.3.1 Zona Elástica

En la zona elástica de la curva se muestra como el material recupera sus dimensiones originales cuando la carga desaparece, cuyo comportamiento es lineal de la forma $\sigma = E\varepsilon$ (Ley de Hooke), donde E representa el módulo de elasticidad. Tomando logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación anterior resulta:

$$\ln \sigma = \ln E + \ln \varepsilon$$

Llamando:

$$y = \ln \sigma$$

$$c = \ln E$$

$$x = \ln \varepsilon$$

Se tiene:

$$y = c + x$$

Cuyo gráfico es una línea recta en coordenadas logarítmicas, en donde la pendiente es constante e igual a la unidad, lo que indica un ángulo de 45° con el eje X y la constante c , la ordenada desde el origen.

1.3.3.2 Zona Plástica

Seguido de la zona elástica se encuentra la zona plástica, en donde el material queda deformado permanentemente presentando un endurecimiento debido a dicha deformación.

Existen varias expresiones que representan dicho comportamiento, éstas son conocidas como *leyes de endurecimiento por deformación*, las cuales pueden ser de tipo potencia o de saturación exponencial.

1.3.3.2.1 Ley de Hollomon

La expresión propuesta por Hollomon [29] que representa el comportamiento de tipo potencia tiene la forma:

$$\sigma = K \varepsilon^m \quad (1.21)$$

Donde K es el esfuerzo necesario para provocar una deformación real unitaria ($\varepsilon=1$) y m es el coeficiente de endurecimiento por deformación. Si tomamos logaritmo natural en ambos miembros resulta:

$$\ln \sigma = \ln K + m \ln \varepsilon$$

Llamando a cada término de la siguiente manera:

$$y = \ln \sigma$$

$$x = \ln \varepsilon$$

$$b = \ln K$$

Tenemos:

$$y = b + mx$$

La representación gráfica será una línea recta en coordenadas logarítmicas en la cual la pendiente m es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Si se conjugan las dos ecuaciones anteriores (Zona elástica y zona plástica) en coordenadas logarítmicas, obtenemos el gráfico de la figura 1.12.

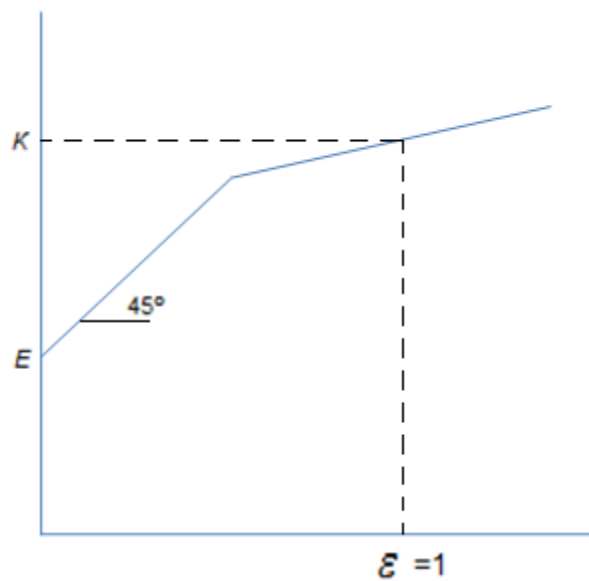


Figura 1.12 Zona elástica y plástica en coordenadas logarítmicas

1.3.3.2.2 Ley generalizada de Sah et al.

La dependencia que tiene la deformación de acuerdo al esfuerzo de fluencia a cualquier temperatura y a un valor determinado de velocidad de deformación es satisfactoriamente descrito por expresiones de saturación exponencial como la que propone *Voce* (1948,1955) y *Sah et al.* (1969) [28]. En estas expresiones se involucran parámetros como el esfuerzo atómico y la

resistencia mecánica de saturación, modelando de mejor manera el comportamiento del material ya que subsana la deficiencia de la ley de Hollomon en donde el material se endurece infinitamente. Esta ley se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = \sigma_o + (\sigma_{ss} - \sigma_o) \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \right]^n \quad (1.22)$$

1.3.3.2.3 Ley de Sah et al.

La ecuación propuesta por **Sah et al.** viene determinada por σ_o que representa el esfuerzo atómico, σ_{ss} la resistencia mecánica de saturación, ε_r deformación de relajación y el parámetro n que representa el modulo plástico tiene un valor de $\frac{1}{2}$ que se deriva de los principios de la teoría de dislocación.

$$\sigma = \sigma_o + (\sigma_{ss} - \sigma_o) \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.23)$$

1.3.3.2.4 Ley de Voce

Para **Voce** el valor del módulo plástico n es igual a 1, y la ley generalizada se reduce a la siguiente:

$$\sigma = \sigma_{ss} - (\sigma_{ss} - \sigma_o) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right) \quad (1.24)$$

1.4 Generalidades del aluminio

1.4.1 Propiedades del aluminio

La combinación de la ligereza con resistencia y alta conductividad eléctrica y térmica es la propiedad que convirtió el aluminio y sus aleaciones en materiales de construcción importantísimos para la elaboración de aviones, de automóviles, de máquinas de transporte, para la electrotecnia, la fabricación de motores de combustión interna, etc.

El aluminio puro tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 90 MPa, pero existen aleaciones de aluminio cuya resistencia a la tracción alcanza hasta más de 530 MPa. El módulo de Young para aluminio puro es de 69 GPa, al agregarles componentes aleantes no existe un cambio apreciable de esta propiedad, siendo aproximadamente una tercera parte del valor de la misma propiedad para el acero.

El aluminio es un metal muy ligero con un peso específico de 2.7 g/cm³ un tercio del peso del acero, los únicos metales más ligeros son el litio, el berilio y el magnesio. Su resistencia puede adaptarse a la aplicación que se desee modificando la composición de su aleación. Otra propiedad importante del aluminio es la formación natural de una capa de óxido que lo hace muy resistente a la corrosión. Los diferentes tipos de tratamiento de revestimiento pueden mejorar aún más esta propiedad. Resulta especialmente útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación.

Este metal es un excelente conductor del calor y electricidad que en relación al cobre es mucho mejor por su relación peso ya que es casi dos veces mejor. El calor y la luz son bien reflejados, esta característica junto con su bajo peso, hacen de este material ideal para reflectores de tubos fluorescentes, bombillas o mantas de rescate. El aluminio es dúctil y tiene una densidad baja lo

que permite que los productos de aluminio se fabriquen en una fase muy próxima al diseño final del producto también posee un punto de fusión bajo que permite que permite al aluminio procesar de diferentes maneras.

Las láminas de aluminio utilizadas para el almacenaje de productos de consumo humano, incluso cuando se lamina a un grosor de 0,007 mm, siguen siendo completamente impermeable y no permite que las sustancia pierdan ni el más mínimo aroma o sabor, además de no ser tóxico y 100% reciclable sin merma de sus cualidades con un pequeño gasto de energía del 5% de la energía necesaria para producir el metal primario inicial.

La excelente capacidad de conformabilidad de este material hace posible su manufactura mediante extrusión, de perfiles y tubos con secciones transversales completamente arbitrarias. También con casi todos los demás procesos habituales de conformación en frío y en caliente, se pueden fabricar toda clase de productos semielaborados y piezas terminadas. Por su parte los procedimientos de soldadura en aluminio pueden ser al arco eléctrico, bajo atmósfera inerte que puede ser argón, helio, por puntos o por fricción. Uno de los más usados en aleaciones de aluminio es el TIG (Tungsten Inert Gas), se utiliza en espesores comprendidos entre 1 y 6 mm. Por otro lado existe la soldadura por fricción que se utiliza para unir chapas de metal, sin alcanzar su punto de fusión y obteniéndose una unión en fase sólida.

1.4.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio se utiliza principalmente en forma de aleaciones de aluminio puro combinado con otros elementos, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del metal, aumentando en especial la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión. Los elementos aleantes como el hierro y el silicio

combinado con el magnesio incrementan la resistencia mecánica del aluminio y el magnesio en si genera una alta resistencia tras el conformado en frío, el cobre incrementa las propiedades mecánicas y reduce la resistencia a la corrosión, el manganeso incrementa también las propiedades mecánicas pero cambia la calidad de la embutición, el cromo genera una mayor resistencia combinado con elementos como cobre, manganeso y magnesio y el Zn reduce la resistencia a la corrosión.

Para designar aleaciones de aluminio de colada, se utiliza un sistema numérico de cuatro dígitos que incorpora un decimal. El primer dígito indica el aleante mayoritario o grupo por ejemplo en la serie 1XX.X: Aluminio > 99,00%, 2XX.X: Cobre, 3XX.X: Silicio con adiciones de cobre y magnesio, 4XX.X: Silicio, 5XX.X: Magnesio, 7XX.X: Cinc, 8XX.X: Estaño, 9XX.X: Otros elementos.

Los dos dígitos siguientes no tienen un significado importante, simplemente sirven para identificar las diferentes aleaciones de este grupo. En el caso del grupo 1XX.X, indican el grado de pureza del aluminio. Finalmente, el último dígito indica en qué forma se encuentra el producto.

1.4.3 Aleación AA8011

La aleación AA8011 correspondiente a la serie 8xxx y según la denominación 8011-M, propuesta por la empresa productora, presenta las siguientes características químicas semejantes a 0.63% Si, 0.72% Fe, 0.01 Cu, 0.002 Mg, 0.01 Ti. Es conveniente destacar que por su contenido de Fe y Si como principales elementos aleantes, se puede comparar con aleaciones de la serie 1xxx

como por ejemplo la aleación 1100, la cual presenta contenidos similares de Fe y Si.

El Si y el Fe se encuentran presentes en las aleaciones de aluminio, muchas veces en cantidades significativas, las cuales afectan el comportamiento de estas aleaciones, por lo cual es importante considerar su efecto en este tipo de sistemas. Siendo la presencia de partículas de segunda fase formadas por dichos elementos capaces de estabilizar una estructura de granos finos o subgranos, pudiéndose desarrollar combinaciones interesantes de resistencia y ductilidad.

CAPITULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Generalidades

El desarrollo experimental se llevo a cabo a partir del uso de muestras de aluminio provenientes de la colada continua, específicamente aluminio AA8011. Estas muestras fueron utilizadas para determinar el valor del coeficiente de fricción entre dicho material y el acero usando grafito en polvo como lubricante, las propiedades mecánicas y el flujo plástico del material mediante el ensayo tipo Ford para así poder modelar el comportamiento a través de las leyes de endurecimiento por deformación y por último, la medición de las cargas de laminación reales para una reducción determinada de espesor.

2.2 Esquema de la metodología utilizada

De manera esquemática se muestra en la figura 2.1 la metodología que se llevo a cabo en la investigación

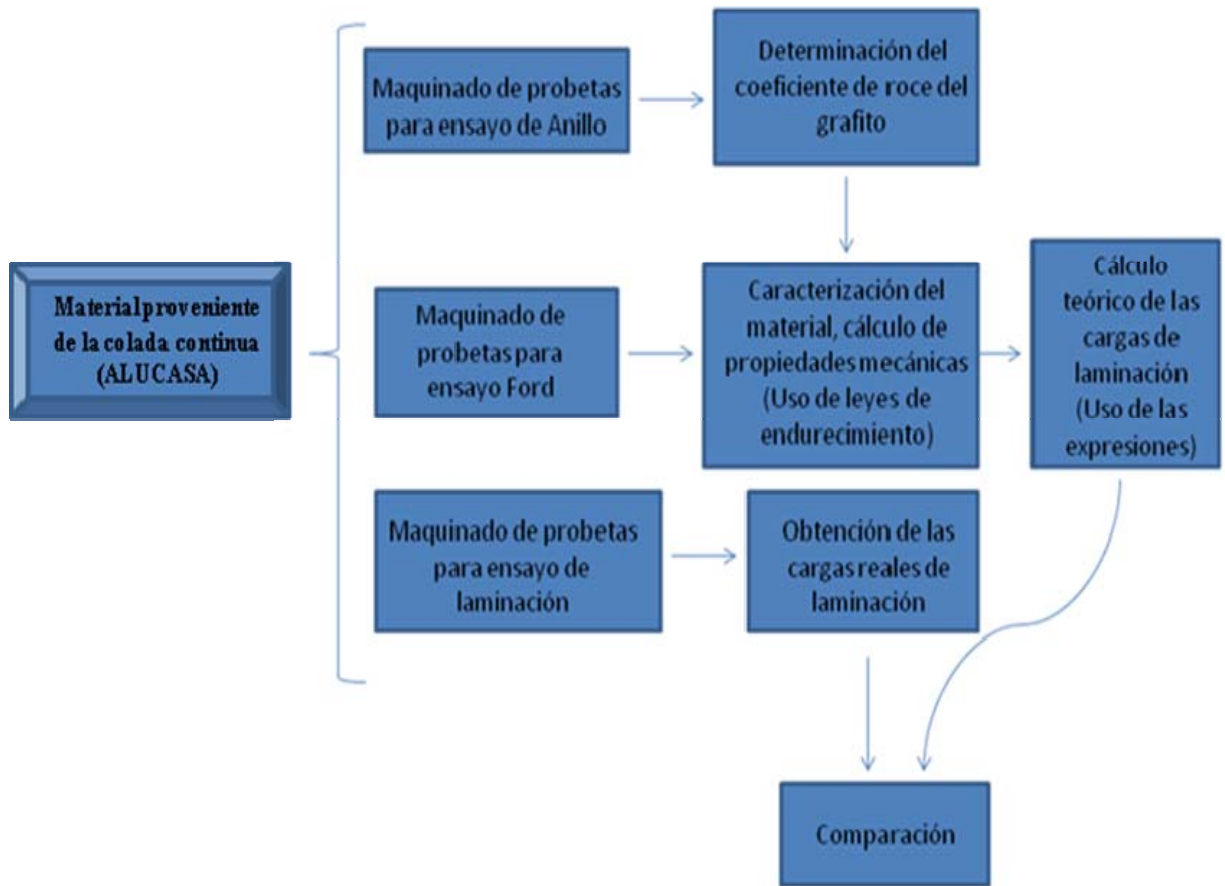


Figura 2.1 Esquema general del desarrollo experimental

El cálculo de las cargas de laminación se llevo a cabo utilizando cada ley de endurecimiento por deformación combinada con cada expresión de cálculo de carga como se puede apreciar en la siguiente figura 2.2

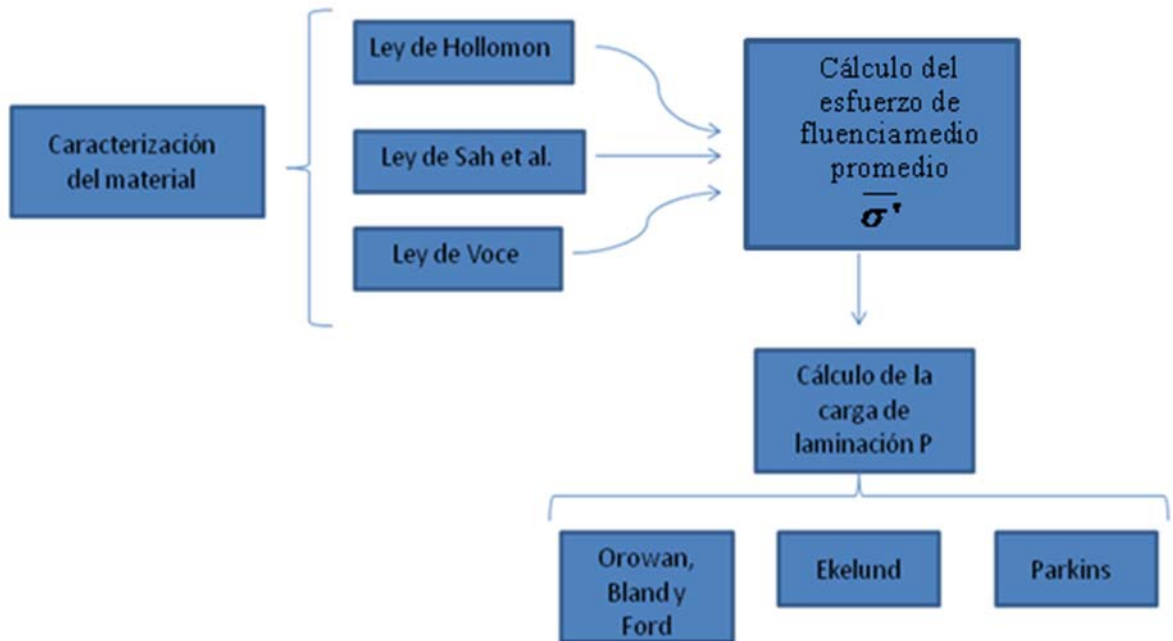


Figura 2.2 Esquema del cálculo de la carga de laminación

2.3 Ensayo de compresión de anillos para la determinación del coeficiente de fricción del lubricante

El grafito es un lubricante sólido que tiene propiedad de proporcionar relativamente una baja fricción, sin embargo sus propiedades a la fricción son bajas únicamente en un entorno de aire u humedad; en vacío el grafito es abrasivo y es un mal lubricante.

Una prueba que se ha ganado la aceptación general, en particular para procesos de deformación volumétricos es la *prueba de compresión de anillos* [11]. Un anillo es sometido a compresión mediante dos caras planas y a medida

que su altura se reduce, el anillo se expande radialmente hacia afuera, disminuyendo su radio interno y aumentando el externo.

Se calcula la relación de variación del diámetro interno y la variación de altura, cifras que nos indican con el uso de la gráfica de la figura 2.3 el valor del coeficiente de fricción.

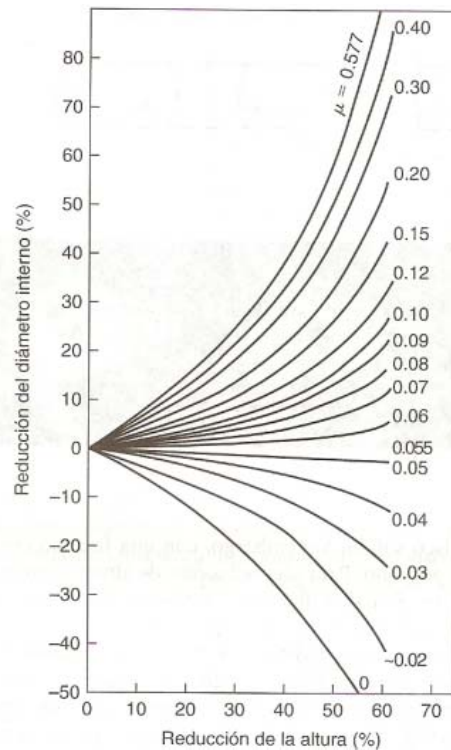


Figura 2.3 Gráfica para determinar coeficientes de fricción a partir de la prueba de compresión de anillos.

(Fuente: Kalpakjian S., Schmid S)

2.3.1 Preparación de la probeta (Anillo)

Se realizó un proceso de maquinado con el uso del torno del taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica para obtener 3 probetas de la forma de un anillo,

y así mediante la aplicación de fuerzas de compresión determinar el coeficiente de fricción del lubricante usado promediando cada uno de los valores obtenidos en la máquina universal de ensayos marca Losenheim ubicado en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela. La dimensión del anillo fue elegida dentro del rango sugerido en la teoría. En la Figura 2.4 se puede observar el aspecto inicial de cada anillo.



Figura 2.4 Apariencia inicial de la probeta de anillo

Se hicieron tres probetas con la siguiente geometría:

	Diámetro externo Inicial (mm) D_{e0}	Diámetro interno Inicial (mm) D_{i0}	Altura inicial (mm) h_0
Probeta 1	19,16	8,44	5,93
Probeta 2	19	8,4	5,98
Probeta 3	18,94	8,5	5,94

Tabla 2.1 Dimensiones iniciales de las probetas de anillos

2.4 Ensayo de compresión tipo Ford

2.4.1 Preparación de la probeta

La probeta a ser ensayada debe cumplir que el ancho w sea al menos 5 y preferiblemente 10 veces el ancho de los indentores b y que la relación h/b se encuentre entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$, como se observa en la Figura 2.2, siendo el valor de b igual a 8. Con el uso de la cepilladora ubicada en el taller de la Escuela de Mecánica se garantizó que las dimensiones de las 3 probetas se mantuvieran dentro del rango requerido, obteniendo así las dimensiones que se muestran en la Tabla 2.2:

	Ancho Inicial (mm) w_0	Espesor Inicial (mm) h_0	Longitud Inicial (mm) l_0
Probeta 1	47,2	3,35	102,3
Probeta 2	49,5	4,1	109
Probeta 3	51,1	4,05	106,5

Tabla 2.2 Dimensiones iniciales de las probetas usadas en el ensayo Ford



Figura 2.5 Probeta para el ensayo Ford

Luego del maquinado de la probeta de aluminio AA8011 se le dio un acabado superficial final mediante el uso de las pulidoras que se encuentran en el laboratorio de “Metalografía” de la Escuela de Ingeniería Mecánica. En la Figura 2.6 se puede observar el aspecto logrado en las probetas luego de realizarle el maquinado y el lustrado, parámetro muy importante ya que se requiere llevar al mínimo la fricción en el ensayo tipo Ford.



Figura 2.6 Apariencia inicial de la probeta del ensayo Ford

2.4.2 Realización del ensayo

Para la realización del ensayo se utilizó una máquina de ensayos universal marca “Losenhausen” Figura 2.7 y 2.8 que se encuentra en el laboratorio de “Ensayos mecánicos” ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Se cumplió con los siguientes pasos:

- 1- Se lubricó en su totalidad la probeta, los prensachapas del dispositivo de ensayos Ford y los indentores del mismo con polvo de grafito.
- 2- Se procedió a poner la probeta entre los prensachapas del dispositivo y se comprobó que la misma estuviera alineada con los topes que sirven de guía.

- 3- Se giró la rueda de mano hasta comprimir el dispositivo y lograr que los indentores tocan la probeta.
- 4- Se ajustó la aguja del medidor principal llevándola a la posición cero con el uso de un contrapeso ubicado en el tornillo posterior de la máquina.
- 5- Se verificó el valor de inicio en la escala de desplazamiento para así determinar el cero.
- 6- Para el registro de datos, se colocó un papel milimetrado en un rodillo que gira proporcionalmente al desplazamiento de las mordazas.

El montaje completo en la máquina de ensayos universal se puede observar en la Figura 2.7.

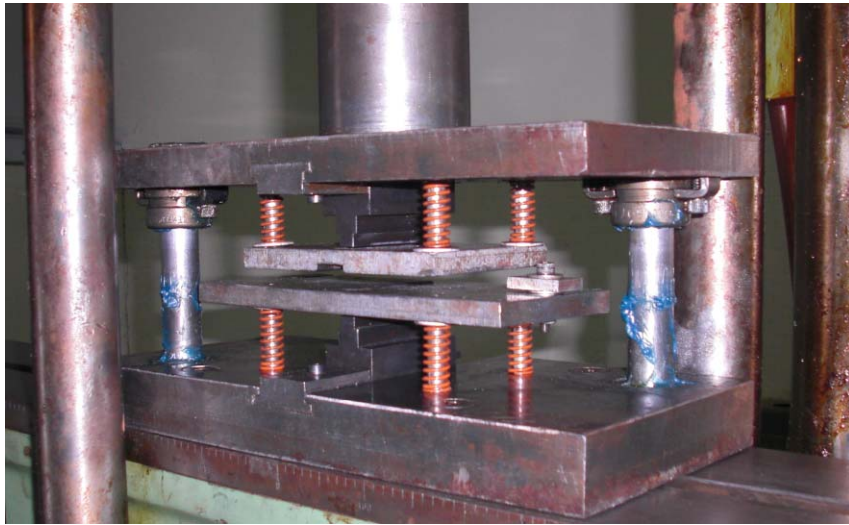


Figura 2.7 Mordazas para ensayo tipo Ford



Figura 2.8 Montaje del ensayo de compresión plana en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos

Una vez montada la probeta, alineada y previamente presionada se procedió a ajustar la velocidad y carga de trabajo. Para el ajuste de la velocidad se acciona la rueda de mando ubicada en el banco de mando, esta tiene tres posiciones de trabajo, que son posición corta, posición central, y posición larga: avance lento, accionamiento manual y avance rápido respectivamente. Para realizar buenas mediciones se debe seleccionar una escala adecuada de aplicación de fuerzas, la escala se selecciona balanceando los contrapesos ubicados en la parte posterior del banco de mando, la escala usada fue de 20 MP (Megapondios). Seguidamente se procedió a aplicarle carga hasta obtener la mayor variación de espesor posible y así obtener un mayor registro de datos en la curva de carga versus variación de espesor. Es importante destacar que fue necesario hacer ciertas modificaciones a los resultados que arrojó este ensayo, con el fin de

obtener valores de esfuerzo y deformación propias de la probeta, por lo cual se realizaron correcciones debidas al roce y a la deformación elástica que ocurre en los elementos de máquina. Seguidamente se demuestra la deducción de la ecuación a usar para la corrección de la reducción de espesor debido a la deformación elástica de la máquina:

$$\Delta h_{total} = \Delta h_{maq} + \Delta h_{muest} \quad (2.0)$$

Aplicando la ley de Hooke

$$F = K \times \Delta h \quad (2.1)$$

Ahora sustituyendo la ecuación 2.1 en la ecuación 2.0, tenemos

$$\frac{F}{K_{total}} = \frac{F}{K_{maq}} + \frac{F}{K_{muest}}$$

Donde K_{maq}

$$K_{maq} = \frac{K_{muest} \times K_{total}}{K_{muest} - K_{total}}$$

Finalmente tenemos

$$\Delta h_{muest(correg)} = \Delta h_{total} - F \left[\frac{K_{muest} - K_{total}}{K_{muest} \times K_{total}} \right] \quad (2.2)$$

Donde:

K_{total} Representa la pendiente de la curva carga-compresión y:

$$K_{muest} = \frac{A_o E_{muest}}{h_o} \quad (2.3)$$

Otra consideración que se debe tomar en cuenta es la relación que existe entre el desplazamiento vertical de las mordazas y el movimiento angular del rodillo el cual está determinado por el radio del mismo, esto condiciona el registro que se obtiene en el papel milimetrado haciendo que la escala esté aumentada. Por tal razón se debe multiplicar cada desplazamiento registrado por la relación de radios que es igual a 0,08, para así obtener el verdadero valor del desplazamiento.

Posteriormente, los valores de carga y alargamiento son estudiados para obtener los parámetros esfuerzo nominal y deformación nominal, esfuerzo real y deformación real, respectivamente, con el uso de las ecuaciones 1.16, 1.17, 1.18 y 1.19.

El esfuerzo de fluencia medio en compresión plana del material estudiado se determinó mediante el ajuste de las leyes de endurecimiento por deformación en la zona plástica de la curva esfuerzo contra deformación real obtenida en el ensayo de compresión plana Ford y aplicando finalmente la expresión 1.13.

Es importante indicar que se realizaron tres ensayos de compresión plana tipo Ford de probetas distintas para promediar todas las propiedades que se requerían y así tomar en cuenta cualquier variación o agente que haya influido en los resultados.

2.5 Ensayo de Laminación

Para éste ensayo se utilizó una laminadora simple duoreversible a escala de laboratorio, ubicada en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales (Figura 2.9) con las siguientes descripciones técnicas:

Datos del Laminador

Radio de los rodillos	$R = 89,1 \text{ mm}$
Carga máxima de los rodillos	$P_{\max} = 100 \text{ ton}$
Velocidades de la caja de transmisión	$N = 33, 67, 100, 134 \text{ RPM}$
Fuente motriz eléctrica =	10 HP



Figura 2.9 Laminadora escala laboratorio, Escuela de Ingeniería Metalúrgica

Se realiza el ensayo de laminación pasando tres chapas donde los datos y apariencia iniciales de las probetas se muestran en la Figura 2.10, y la tabla 2.3.



Figura 2.10 Aspecto inicial de la probeta a laminar

	Ancho Inicial (mm) w_o	Espesor Inicial (mm) h_o	Longitud Inicial (mm) l_o
Probeta 1	60,03	2	141
Probeta 2	59,1	2,13	142
Probeta 3	61,76	1,9	140,2
Promedio	60,29	2,01	141,06

Tabla 2.3 Dimensiones iniciales de las probetas del ensayo de laminación

Como se puede apreciar en la tabla 2.3 hubo una pequeña diferencia en los valores de espesor inicial para cada una de las probetas y esto fue debido al maquinado de dichas piezas, sin embargo esta diferencias en los espesores es compensada buscando un valor promedio para las tres muestras.

Al momento de realizar este ensayo se llevó a cabo los siguientes pasos:

- 1- Conectamos las celdas de carga de capacidad 50000 lbf a unos indicadores los cuales fueron calibrados.
- 2- Se procedió a separar los rodillos hasta una distancia de aproximadamente 1,6 mm con el uso del volante de mano que se encuentra en la parte superior del tornillo sinfin para así obtener una reducción de espesor en la probeta de aproximadamente 0,4 mm.
- 3- Tomando en cuenta las normas de seguridad se procedió a pasar las probetas entre los rodillos del laminador y simultáneamente se registró la carga de laminación en ambas celdas de carga.
- 4- Los valores de carga obtenidos para cada probeta fueron promediados.

CAPITULO III

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Ensayo de compresión de anillos

En la figura 3.1 se muestra el aspecto final de la probeta luego de haber realizado el ensayo de compresión de anillo.



Figura 3.1 Apariencia final de la probeta de anillo

Al comparar la figura 2.4 que representa el aspecto inicial de la probeta con la figura 3.1 donde se muestra el aspecto final de la misma se observa claramente que luego de haberla ensayado presenta una disminución considerable del diámetro interno, un aumento de su diámetro externo y una disminución de su espesor. Este resultado era de esperarse debido a que si el coeficiente de fricción fuera igual a cero el diámetro interno y externo del anillo se expandieran como si fueran un disco macizo, sin embargo al usar el grafito como lubricante existe una

pequeña fricción lo que genera la disminución del diámetro interno y el aumento del diámetro externo.

Se midieron las dimensiones finales de los anillos y se obtuvo los siguientes valores:

	Diámetro externo final (mm) Def	Diámetro interno final (mm) Dir	Altura final (mm) hf
Probeta 1	26,2	7,09	3,07
Probeta 2	26,08	7,37	2,98
Probeta 3	25,26	7,28	2,95

Tabla 3.1 Dimensiones finales de las probetas de anillos

El porcentaje de reducción de diámetro interno y de altura para la probeta 1 viene dado de la siguiente manera:

$$\Delta D_i = \%reduccD_i = \frac{(8,44 - 7,09)}{8,44} = 0,16 = 16\%$$

$$\Delta h = \%reducch = \frac{(5,93 - 3,07)}{5,93} = 0,48 = 48\%$$

Luego, con el uso de la gráfica de la Figura 2.3 se obtuvo el valor del coeficiente de roce μ siendo igual a 0,10.

De igual manera, se realizó el análisis para las otras dos probetas y así promediar finalmente los valores de coeficiente de roce como se puede ver en la Tabla 3.2.

	ΔD_i	Δh	μ
Probeta 1	0,16	0,48	0,10
Probeta 2	0,12	0,5	0,085
Probeta 3	0,14	0,5	0,095
Promedio	–	–	0,096

Tabla 3.2 Valores de coeficientes de roce entre aluminio y acero con el uso de grafito

Observando la tabla 3.2 se puede notar que los porcentajes de reducción de espesor y de diámetro interno para cada una de las probetas fueron similares obteniendo así valores de coeficiente de fricción cercanos para los tres ensayos. Al promediar estos valores de coeficientes de fricción se puede apreciar que hubo una disminución del coeficiente de roce al compararlo con el valor de 0,47 que existe entre el acero y aluminio sin lubricante [20]. Este valor promedio fue utilizado posteriormente en cálculos relacionados con el ensayo de compresión plana tipo Ford.

3.2 Ensayo de compresión plana tipo Ford

Al haber sometido las probetas de estudio al ensayo de compresión plana se procedió a desmontarlas y verificar su apariencia final, analizar si ocurrió alguna fisura y el comportamiento del flujo del material a lo largo y ancho de la probeta. Además, se procedió a medir las dimensiones finales, las cuales se puede observar en la Figura 3.2 a, b, c y en la Tabla 3.3.

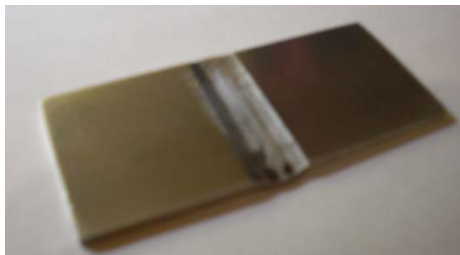


Figura 3.2 a Apariencia final de la probeta 1 del ensayo tipo Ford



Figura 3.2 b Apariencia final de la probeta 2 del ensayo tipo Ford



Figura 3.2 c Apariencia final de la probeta 3 del ensayo tipo Ford

Al detallar las figuras 3.2 a, 3.2 b y 3.2 c se observa la deformación lograda en el ensayo de compresión plana tipo Ford, esta tiene la apariencia de un canal y es producida por la presión que ejercen los indentores los cuales provocaron una reducción de espesor en dicha área, este resultado era de esperarse ya que es característico de este tipo de ensayo en donde la deformación se presenta en un plano formado por el eje en donde ocurre la compresión y el eje longitudinal de la probeta. Además, hay presencia de una pequeña deformación a lo ancho de las probetas llamado “orejamiento” sin embargo esta es despreciable comparada con la deformación del espesor y el alargamiento de las mismas. De igual manera se aprecia que no ocurrieron fisuras ni fracturas en ninguna parte del lugar de compresión y que el material fluyó de manera similar a ambos lados de la sección en donde los indentores ejercieron presión. Finalmente, se puede observar que la deformación ocurrió de forma alineada, la parte izquierda y derecha del canal de compresión se encuentran en el mismo plano, indicando que los indentores estaban alineados a la hora de realizar la compresión.

Seguidamente, en la tabla 3.3 se muestran los valores de ancho, largo y espesor de las probetas finales.

	Ancho final (mm) w_f	Espesor final (mm) h_f	Longitud final (mm) l_f
Probeta 1	49,4	1,17	111
Probeta 2	50,6	1,53	116,77
Probeta 3	53,02	1,67	114,12

Tabla 3.3 Dimensiones finales de las probetas usadas en el ensayo Ford

3.2.1 Caracterización del material sometido a compresión plana

Al realizar el ensayo de compresión plana tipo Ford se obtuvo el conjunto de puntos de carga versus la reducción de espesor que permitieron hacer un seguimiento al comportamiento de las propiedades mecánicas del material tomando en cuenta las consideraciones expuestas en el Capítulo II. El valor del esfuerzo de fluencia y el valor del esfuerzo de fluencia promedio en la curva real de esfuerzo-deformación se obtuvieron con el uso de las distintas leyes de endurecimiento por deformación, cifras que utilizan en los cálculos posteriores.

En primera instancia, al realizar el ensayo de compresión tipo Ford se obtuvo una gráfica de carga vs reducción de espesor obtenida directamente de la máquina de ensayos universales, manualmente se obtuvieron puntos y estos fueron proyectados en los respectivos ejes, de esta manera encontramos los valores de la tabla 3.4:

Probeta 1

Puntos	Carga (MP) Pc	Δh
1	0	0
2	0,74179	0,7
3	1,80149	1,6
4	2,33134	2
5	2,86119	2,45
6	3,39104	2,91
7	3,92089	3,35
8	4,45074	3,78
9	4,98059	4,22
10	5,51044	5
11	6,04029	7
12	6,57014	9
13	7,09999	13
14	7,62984	17
15	8,15969	21
16	8,68954	25
17	9,21939	28
18	9,75	30

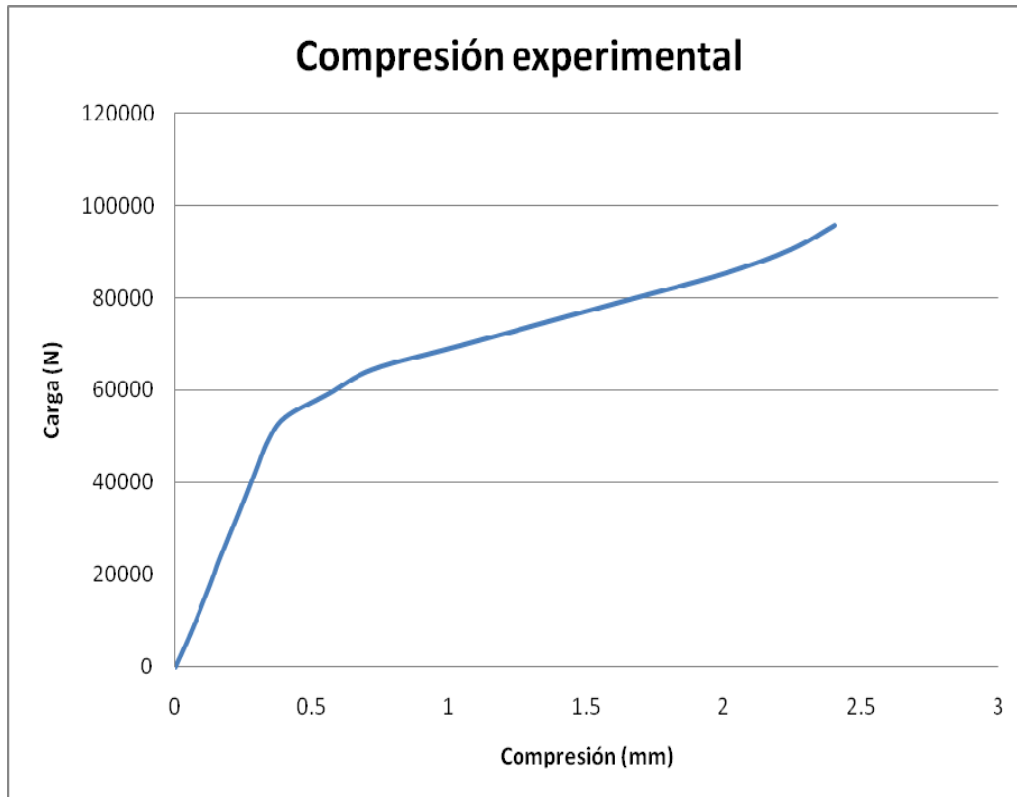
Tabla 3.4 Valores de carga y variación de espesor registrados en la máquina

El valor de variación de espesor fue modificado debido a la relación de radios que se usó para el registro de datos, como se explica en el Capítulo II, este factor es igual a 0,08, obteniendo así lo siguiente (Tabla 3.5):

Puntos	Carga (N) Pc	Δh_{exp}
1	0	0
2	7274.474904	0.056
3	17666.58191	0.128
4	22862.63541	0.16
5	28058.68891	0.196
6	33254.74242	0.2328
7	38450.79592	0.268
8	43646.84942	0.3024
9	48842.90292	0.3376
10	54038.95643	0.4
11	59235.00993	0.56
12	64431.06343	0.72
13	69627.11693	1.04
14	74823.17044	1.36
15	80019.22394	1.68
16	85215.27744	2
17	90411.33094	2.24
18	95614.8375	2.4

Tabla 3.5 Valores de carga y variación de espesor experimental

La curva carga versus reducción de espesor obtenida en el ensayo tipo Ford se puede observar en el siguiente gráfico (Gráfica 3.1):

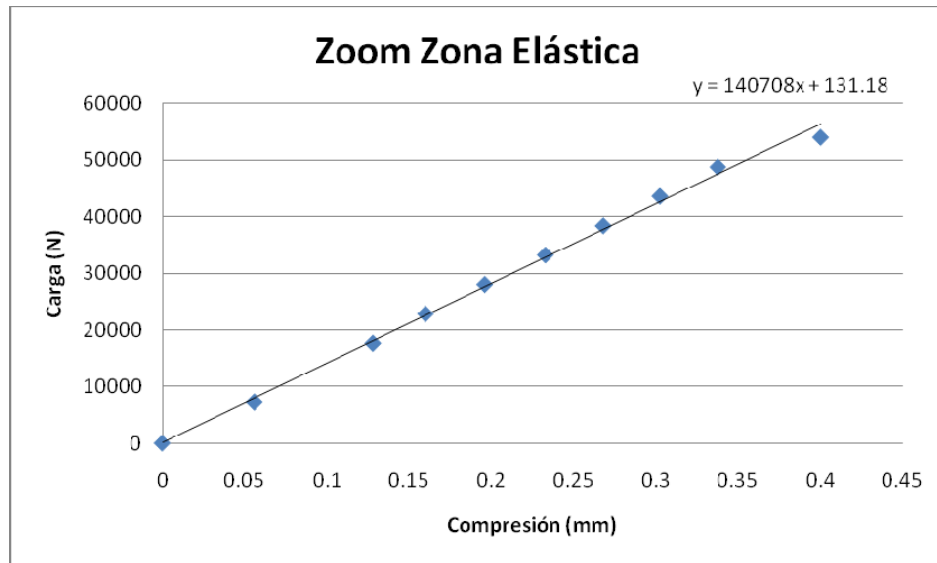


Gráfica 3.1 Carga versus reducción de espesor

A pesar de la existencia del error asociado a la obtención de los valores de la tabla 3.4 de forma manual este se puede considerar aceptable al observar el comportamiento de la grafica 3.1, debido a que la tendencia observada es la esperada para un ensayo de estas características, además la zona plástica es la relevante para el desarrollo de esta investigación y en ésta el error asociado es menor que el de la zona elástica ya que el rango de la escala existente en esta zona es mayor.

Estos valores a su vez deben de ser modificados debido a la deformación elástica que sufre la máquina, se siguió con la formulación expuesta en el Capítulo II.

Se graficó la zona elástica de la curva anterior para así determinar la pendiente de la recta de tendencia (Grafica 3.2).



Gráfica 3.2 Zoom zona elástica

La pendiente de la curva anterior significa el valor de K_{total} quien representa el valor experimental.

$$K_{total} = 140705,8142 \text{ N/mm}$$

Además, con el valor del área de contacto de 377,6 mm², el espesor inicial y el valor del módulo de elasticidad del material (E= 68600) se pudo calcular el valor de K_{muest} .

$$K_{muest} = \frac{EA}{h_o} = 7732346,269 \text{ N/mm}$$

Ahora bien, al usar la ecuación (3.2) podemos obtener el valor corregido de la variación de espesor. Teniendo el siguiente cuadro:

Puntos	Carga (N) Pc	Δh_{correg}
1	0	0
2	7274,474904	0,005240896
3	17666,58191	0,004727891
4	22862,63541	0,000471389
5	28058,68891	0,000214886
6	33254,74242	0,000758384
7	38450,79592	-0,00029812
8	43646,84942	-0,00215462
9	48842,90292	-0,00321112
10	54038,95643	0,022932374
11	59235,00993	0,146675871
12	64431,06343	0,270419369
13	69627,11693	0,554162866
14	74823,17044	0,837906364
15	80019,22394	1,121649861
16	85215,27744	1,405393358
17	90411,33094	1,609136856
18	95614,8375	1,732828348

Tabla 3.6 Valores de carga y variación de espesor sin la deformación de la máquina

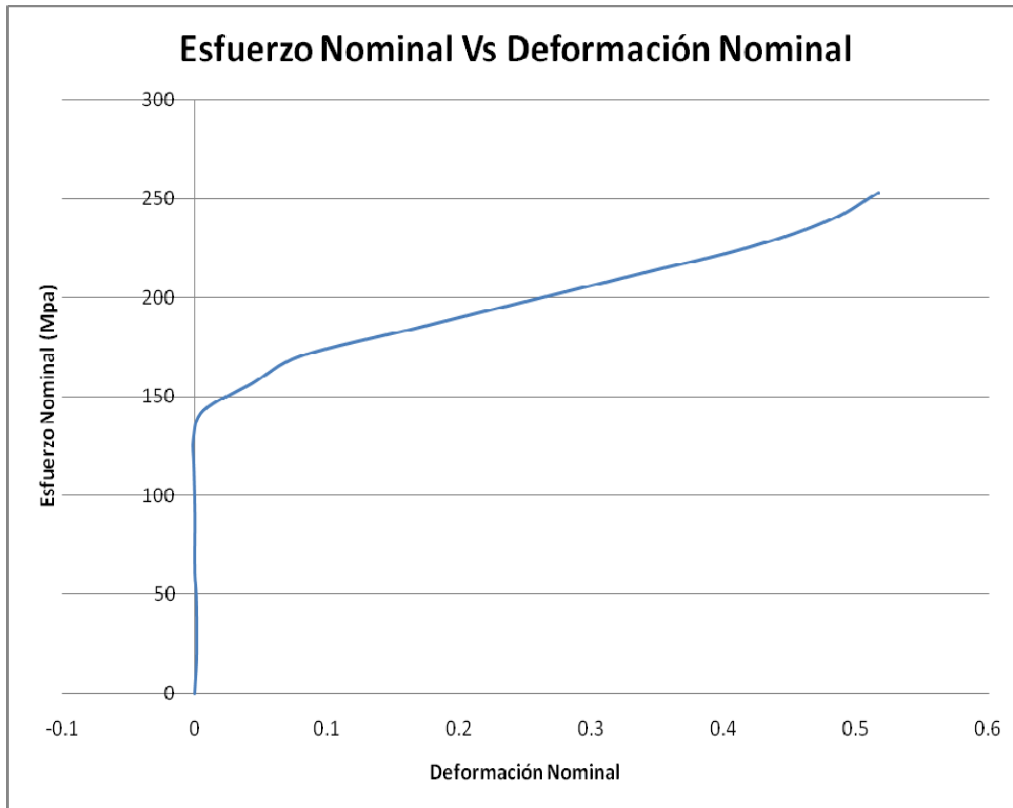
En la tabla 3.6 se puede apreciar que existen algunos valores negativos de reducción de espesor corregidos en la zona elástica, esto se debe al error existente al momento de obtener manualmente los puntos de esta zona que se indicó anteriormente, sin embargo éstos no son relevantes para el desarrollo de la investigación ya que la zona plástica es la que modela el comportamiento real en el conformado de materiales como lo es el proceso de laminación.

Realizando los cálculos de los respectivos esfuerzos y deformaciones tanto nominales como reales. Con el uso de las ecuaciones 1.16, 1.17, 1.18, 1.19 y 1.20 se obtuvo la Tabla 3.7:

Puntos	S(Mpa)	e(mm)	ϵ (mm)	$\mu w/h$	$\exp(\mu w/h)-1$	σ' (Mpa)
1	0	0	0	1,352597	2,86745634	0
2	19,26502888	0,001564447	0,001566	1,350484	2,85929396	9,099140745
3	46,7864987	0,001411311	0,001412	1,350691	2,86009105	22,09513297
4	60,54723361	0,000140713	0,000141	1,352407	2,86672043	28,56381961
5	74,30796852	6,41452E-05	6,41E-05	1,35251	2,86712083	35,05338481
6	88,06870343	0,000226383	0,000226	1,352291	2,86627256	41,55030691
7	101,8294383	-8,89907E-05	8,9E-05	1,352717	2,86792193	48,03005653
8	115,5901733	-0,000643171	0,000643	1,353468	2,87082447	54,49568494
9	129,3509082	-0,000958544	0,000958	1,353895	2,87247866	60,96738753
10	143,1116431	0,006845485	0,006869	1,343401	2,83205336	67,88583022
11	156,872378	0,043783842	0,044771	1,295859	2,65413468	76,59164169
12	170,6331129	0,0807222	0,084167	1,251568	2,49581912	85,56665588
13	184,3938478	0,165421751	0,180829	1,160607	2,19187117	97,63751265
14	198,1545827	0,250121303	0,287844	1,081973	1,950494	109,9197597
15	211,9153176	0,334820854	0,407699	1,013317	1,75472402	122,3767654
16	225,6760525	0,419520406	0,543901	0,952855	1,59310222	134,9797494
17	239,4367875	0,48033936	0,654579	0,913707	1,49354998	146,4799738
18	253,2172603	0,517262193	0,728282	0,891472	1,43871721	156,9009799

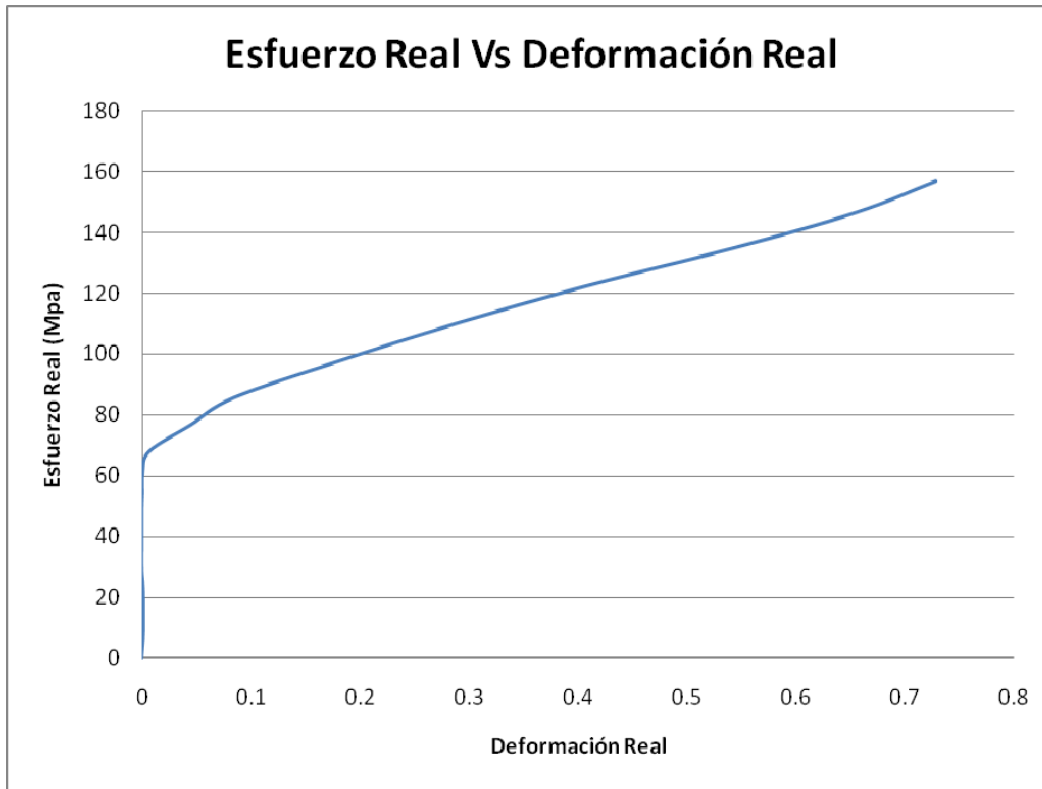
Tabla 3.7 Esfuerzos y deformaciones para el ensayo Ford

Obteniendo así las siguientes gráficas:



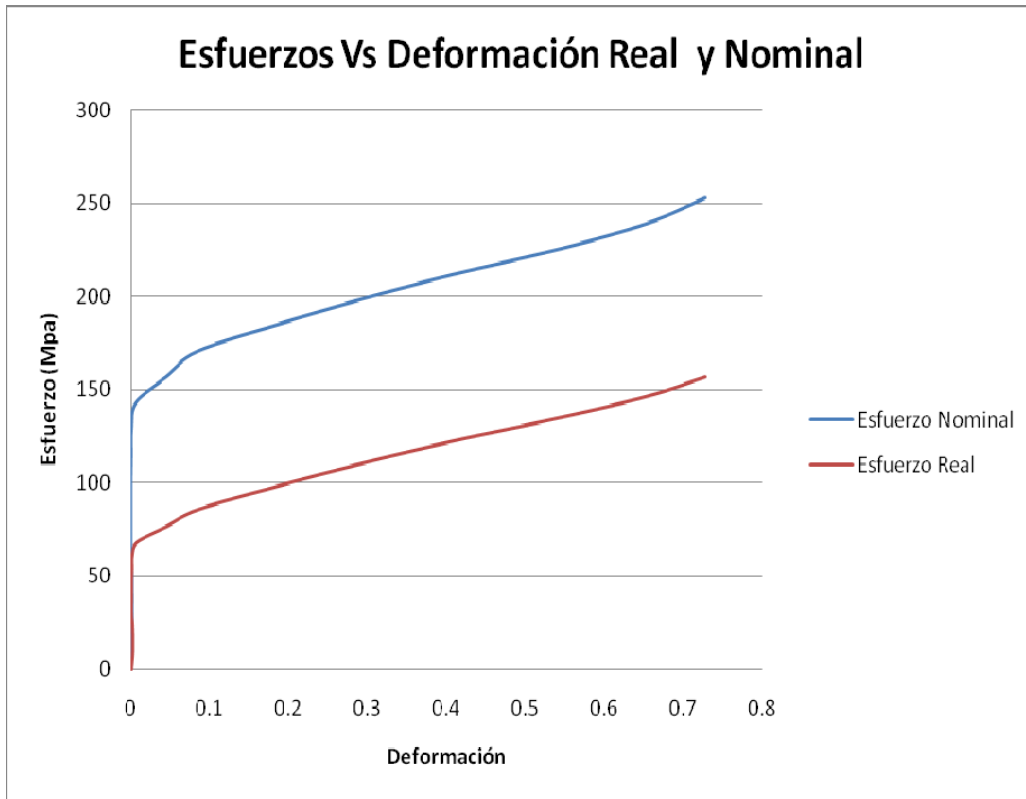
Gráfica 3.3 Esfuerzo nominal versus deformación nominal

Al observar la gráfica 3.3 lo primero que se detalla es que la pendiente de la zona elástica aumentó considerablemente aproximándose al valor del módulo de Young de la aleación AA8011, esto demuestra la importancia de corregir la compresión del material tomando en cuenta la compresión de los elementos de la máquina.



Gráfica 3.4 Esfuerzo real versus deformación real

En la gráfica 3.4 se observa claramente el comportamiento elasto-plástico característico de un ensayo de compresión plana como se muestra en la Figura 1.11. Al ensayar la aleación estudiada se llegó a una deformación aproximada de 0,8 lo cual demuestra la principal ventaja del ensayo de compresión plana tipo Ford en donde se alcanzan deformaciones superiores a las obtenidas en el ensayo de tracción uniaxial, donde ocurre la inestabilidad plástica debido al encuellamiento que impide alcanzar grandes deformaciones, permitiendo analizar con mayor profundidad el comportamiento plástico del material, siendo éste el relevante a la hora de estudiar la conformabilidad de los materiales



Gráfica 3.5 Esfuerzos nominales y reales versus deformación

En la gráfica anterior se puede detallar que existe una diferencia apreciable entre la curva de esfuerzo nominal y esfuerzo real, donde en la primera no se considera el efecto de la fuerza de roce presente en el ensayo Ford mientras que en la segunda curva, es decir la curva de esfuerzo real, si se consideran dichos efectos. Por tal razón, y como era de esperarse, los valores nominales suponen un material de mayor resistencia al real, representando la sumatoria de la resistencia verdadera del material y la resistencia ofrecida por la fricción. Es por esta razón que para estudios de conformabilidad se toma en cuenta la curva real.

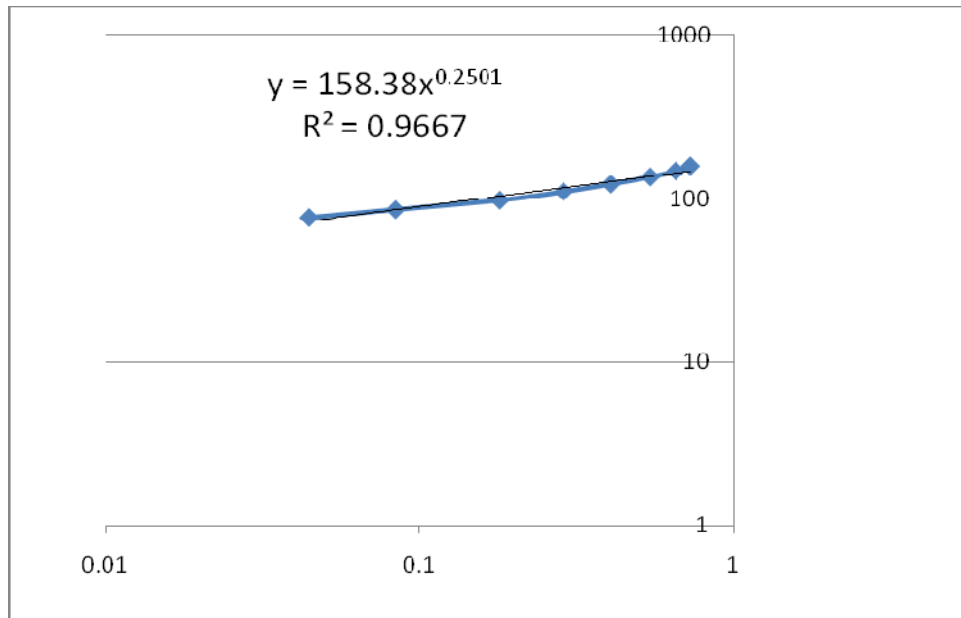
Análogamente se realiza el estudio de las probetas 2 y 3, las gráficas y cálculos correspondientes se observan en el Apéndice A.

3.2.1.1 Modelización a través del uso de las leyes de endurecimiento por deformación

3.2.1.1.1 Modelización con la ley de Hollomon

Para el modelo de Hollomon se tomó en cuenta la teoría del apartado 1.3.2.2.1. En resumen, se graficó los puntos pertenecientes a la zona plástica de la curva esfuerzo-deformación real para cada probeta en una escala log-log linealizando y obteniendo una recta de la siguiente manera:

Probeta 1



Gráfica 3.6 Ajuste con Hollomon, probeta 1

En la Gráfica 3.6 se observa la linealización realizada mediante el uso de una ecuación de tendencia potencial, la cual representa directamente los parámetros involucrados en la ley de Hollomon, obteniendo también el valor de R^2 llamado coeficiente de determinación que indica el grado de ajuste de la expresión obtenida, siendo 1 el mejor ajuste posible. Teniendo en cuenta esto se

puede decir que el ajuste realizado es aceptable ya que el valor de coeficiente de determinación 0,9667 es bastante cercano a la unidad.

Finalmente se obtiene la siguiente expresión según la ley de Hollomon para la probeta 1:

$$\sigma' = 158,38\varepsilon^{0,2501}$$

Buscando el valor de deformación alcanzada en el ensayo de laminación con el valor de espesor inicial y final de las probetas ensayadas se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_o}{h}\right) = \ln\left(\frac{2,01}{1,6}\right) = 0,22813$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio integrando desde una deformación 0 hasta 0,22813, posteriormente este valor se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

Para Hollomon se tiene el valor de fluencia medio:

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} 158,38\varepsilon^{0,2501} d\varepsilon$$

$$\overline{\sigma'} = 85,14MPa$$

Análogamente se realiza el estudio de las probetas 2 y 3 (Apéndice B). Se muestra la Tabla 3.8 con el resultado de cada probeta y su respectivo coeficiente de determinación.

	$\bar{\sigma}'$ (MPa)	R^2
Probeta 1	85,14	0,9667
Probeta 2	80,63	0,9664
Probeta 3	88,1	0,9158

Tabla 3.8 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Hollomon

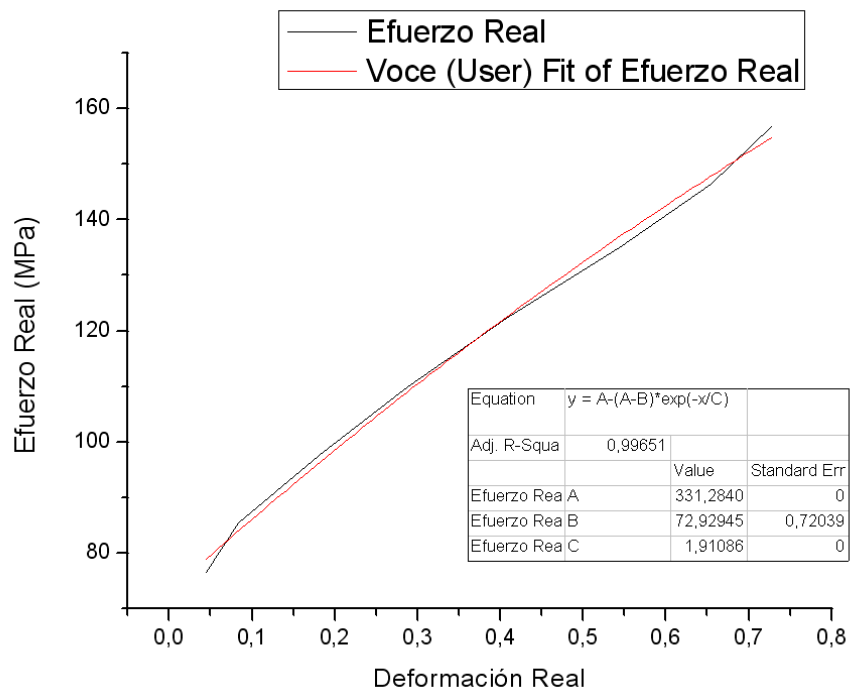
En la Tabla 3.8 se observa que los valores de esfuerzos de fluencia medio en compresión plana y los valores de coeficiente de determinación lo cuales son muy cercanos a la unidad existiendo una pequeña variación en cada una de las probetas, indicando esto que a pesar de su sencillez la ley de Hollomon representa un buen ajuste a la zona plástica para este tipo de aleación.

3.2.1.1.2 Modelización con la ley de Voce

Para la modelización de ésta ley se utilizó una herramienta numérica computacional (Origin Pro 8) que permitió ajustar los datos a la ecuación de Voce y obtener los parámetros involucrados en dicha ley esto lo hace el programa iterando unos valores iniciales hasta conseguir los que más se ajusten a la curva.

Seguidamente se muestra la solución que arrojó el programa para cada conjunto de datos esfuerzo-deformación real de cada probeta, indicando los valores de los parámetros involucrados:

Probeta 1



Gráfica 3.7 Ajuste con Voce, probeta 1

En la Gráfica 3.7 se observa el ajuste realizado mediante el uso del programa Origin Pro 8, obteniendo cada uno de los parámetros involucrados en la ley de Voce y también el valor de R^2 , siendo éste igual a 0,99651, indicando que el ajuste realizado es muy aceptable ya que es bastante cercano a la unidad.

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma' = 331,28 - (331,28 - 72,9294) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{1,91}\right)$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (331,28 - 258,3506 e^{-\varepsilon/1,91}) d\varepsilon$$

$$\overline{\sigma'} = 87,76 \text{ MPa}$$

Análogamente se realiza el estudio de las probetas 2 y 3 (Apéndice B) y seguidamente se muestra la Tabla 3.9 con el resultado de cada una y su respectivo coeficiente de determinación de ajuste.

	$\overline{\sigma'}$ (MPa)	R^2
Probeta 1	87,76	0,99651
Probeta 2	89,2	0,99637
Probeta 3	84,85	0,99497

Tabla 3.9 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Voce

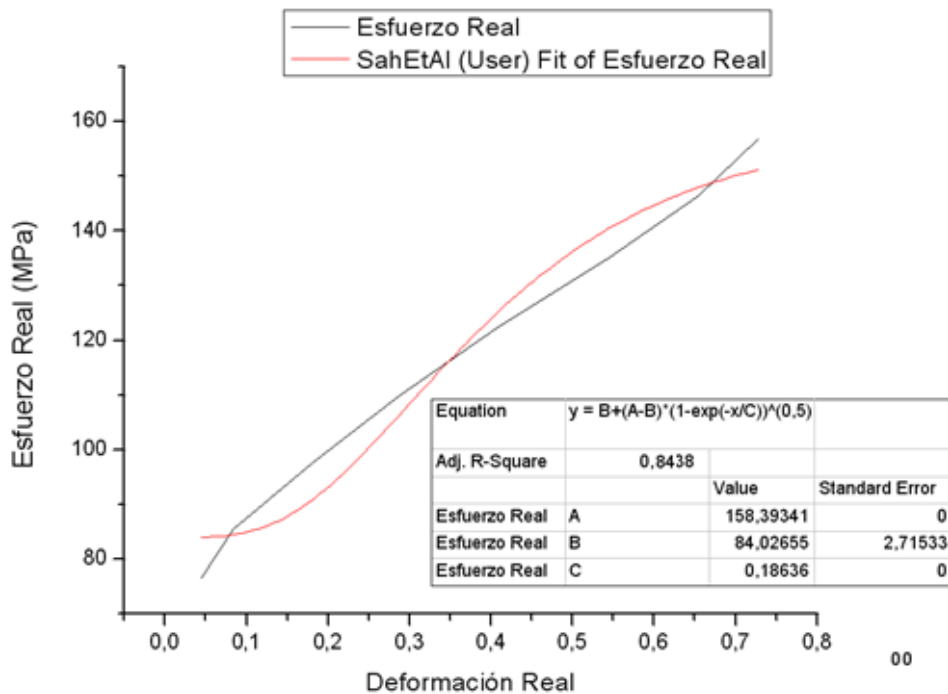
Se puede observar que la ley de Voce representa un buen ajuste a la zona plástica para este tipo de aleación debido a que los valores de coeficiente de determinación son casi iguales a la unidad, de éste modo se podría decir que los

valores de esfuerzo de fluencia medio obtenidos en cada probeta son bastante aceptables.

3.2.1.1.3 Modelización con la ley de Sah et al.

De igual manera que se hizo para el ajuste de la ley de Voce se hizo para el ajuste de la ley de Sah et al. Con el uso de la herramienta computacional se obtuvo lo siguiente:

Probeta 1



Gráfica 3.8 Ajuste Sah et al., probeta 1

En la Gráfica 3.8 se observa el ajuste realizado mediante el uso del programa Origin Pro 8, obteniendo cada uno de los parámetros involucrados en la

ley de Sah et al. y también el valor de R^2 , siendo éste igual a 0,8438, indicando que el ajuste realizado no es tan aceptable ya que se va alejando de la unidad.

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma' = 84.02655 + (158.39341 - 84.02655) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0.18636}\right) \right)^{1/2}$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (84,02655 - 74,36686 \sqrt{(1 - e^{-\varepsilon/0,18636})}) d\varepsilon$$

$$\overline{\sigma'} = 65,64 MPa$$

Análogamente se realiza el estudio de las probetas 2 y 3 (Apéndice B) y seguidamente se muestra la Tabla 3.10 con el resultado de cada una y su respectivo coeficiente de determinación de ajuste.

	$\bar{\sigma}'$ (MPa)	R^2
Probeta 1	65,64	0,8438
Probeta 2	61,01	0,86317
Probeta 3	64,78	0,85277

Tabla 3.10 Esfuerzo de fluencia medio para cada probeta según Sah et al.

Se puede observar que la ley de Sah et al. representa un ajuste poco confiable a la zona plástica para este tipo de aleación debido a que los valores de coeficiente de determinación se alejan considerablemente de la unidad, de éste modo los valores de esfuerzo de fluencia medio obtenidos en cada probeta se podrían considerar poco aceptables.

3.2.1.2 Cuadro resumen de la modelización a través del uso de las leyes de endurecimiento por deformación

A continuación se presenta la Tabla 3.11 donde se muestra los valores promedios de esfuerzos medios de fluencia en compresión plana y los coeficientes de determinación asociados al modelo de ajuste calculados con el uso de cada ley de endurecimiento por deformación.

	$\bar{\sigma}'$ (MPa)	R^2
Ley de Hollomon	84,62	0,94456
Ley de Voce	87,27	0,99195
Ley de Sah Et Al	63,81	0,85247

Tabla 3.11 Cuadro resumen de los esfuerzos de fluencia medio

Analizando los resultados de la Tabla 3.11, específicamente los coeficientes de determinación se puede observar que la ley de endurecimiento por deformación que se ajusta con mayor exactitud a la curva obtenida experimentalmente en el ensayo Ford para el material es la ley de Voce seguida de la ley de Hollomon y por último la menos exacta la ley de Sah et al. Esto se debe a que la ley de Voce siendo una ley de saturación exponencial considera parámetros extras como por ejemplo el esfuerzo atómico σ_0 y el módulo plástico n a diferencia de la ley de Hollomon que es una simple expresión potencial en la cual se supone que el material se endurece infinitamente (fenómeno que queda subsanada en la expresión de Voce y Sah et al.). Por otro lado al compararla con la ley de Sah et al. se identifica que la principal diferencia está en el valor del modulo plástico n el cual se considera como 1 para Voce y 0,5 para Sah et al. esto se deriva de los principios de la teoría de las dislocaciones y se ha encontrado a través de experimentación que modela bien el comportamiento de los aceros, sin embargo para esta aleación de aluminio dicho valor hace que la dispersión del ajuste sea mayor lo que puede significar que el valor de $n=1$ es el que se ajusta mejor para la aleación de aluminio AA8011.

3.3 Resultados del ensayo de laminación

Luego de haber realizado el ensayo de laminación para cada una de las probetas se obtuvo las siguientes dimensiones finales:

	Ancho Finales (mm) w_f	Espesor Finales (mm) h_f	Δh (mm)
Probeta 1	59,66	1,6	0,40
Probeta 2	58,86	1,6	0,53
Probeta 3	61,86	1,6	0,3
Promedio	60,12	1,6	0,41

Tabla 3.12 Dimensiones finales de las probetas del ensayo Ford

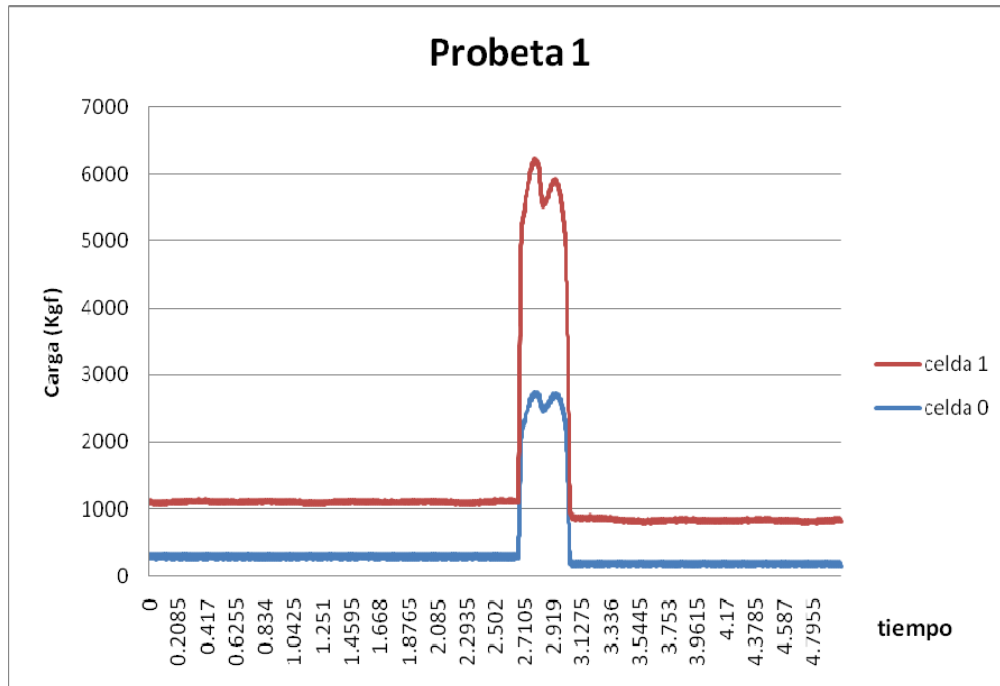
En la Tabla 3.12 se puede observar que los espesores finales para cada una de las probetas es el mismo, esto era de esperarse debido a que la separación de los rodillos utilizada fue constante y la deformación elástica de los mismos para esta reducción de espesor fue despreciable, sin embargo la reducción de espesor alcanzada para cada una de las probetas es diferente debido a que al momento del maquinado de dichas probetas no se alcanzaron exactamente los mismos espesores iniciales, como se puede observar en la Tabla 2.3, no obstante para compensar esto se utiliza en los cálculos posteriores el valor de reducción de espesor promedio.



Figura 3.3 Aspecto final de la probeta laminada

En la Figura 3.3 se puede observar el aspecto final de las probetas laminadas, estas sufrieron un alargamiento, reducción de espesor y una combadura produciéndose ésta debido a que la longitud de la probeta en relación al radio de los rodillos del laminador es pequeña por lo que la probeta tiende a seguir la curvatura de los mismos, sin embargo este efecto no tiene influencia en el registro de la carga ni en el cálculo para la estimación de dicha carga.

El valor de carga para cada probeta se registró usando un programa computacional llamado “Labview” siendo registrado por las celdas de carga ubicadas en los extremos de apoyo de los rodillos de la laminadora. La Gráfica 3.9 muestra las cargas experimentales de la probeta 1.



Gráfica 3.9 Comportamiento de la carga en cada celda

En la Gráfica 3.9 se observa el registro tomado de las dos celdas de carga al momento de la laminación de la probeta 1, como se puede apreciar hay una diferencia entre la carga registrada por la celda 0 y la celda 1, esto se debe a que en el momento de la introducción de dicha probeta a los rodillos de la laminadora se produjo un desbalance en el que la probeta paso más cercana al apoyo en donde se encontraba la celda 0, a pesar de esto no se ve afectado el registro de carga ya que la carga total de laminación se calcula haciendo un promedio de los picos registrados por ambas celda y luego sumándolos. En el registro de la carga de laminación para las demás probetas no ocurrió este desbalance como se puede apreciar en el Apéndice C.

De igual manera se obtuvo la gráfica para las otras probetas (Apéndice C) y determinó los valores de carga junto a sus respectivos valores de reducción de espesor, como se muestra en la tabla 3.14.

	Carga de laminación Kgf (N)	Δh (mm)
Probeta 1	5600,52 (54885,09)	0,40
Probeta 2	6460,17 (63309,66)	0,53
Probeta 3	4990,19 (48903,86)	0,3
Promedio	5680,63 (55670,17)	0,41

Tabla 3.14 Carga experimental de laminación

Se puede observar que existe una diferencia entre dichos valores en donde la probeta 2 registró la mayor carga, siendo seguida por la probeta 1 y finalmente la probeta 3, esto se debe a la magnitud de la reducción de espesor alcanzada en cada probeta siendo proporcional así al valor registrado de la carga para cada una de ellas. A pesar de esto para los calculos posteriores de estimación de carga se utilizó el promedio de las cargas registradas con su respectivo promedio de reducción de espesor.

3.4 Cálculo teórico de la carga de laminación

Para el cálculo de las cargas teóricas de laminación se consideró la cifra de 0,47 como valor del coeficiente de roce entre la chapa de aluminio y el acero del rodillo, valor determinado por ensayos anteriores [30].

3.4.1 Método de Orowan, Bland y Ford

Para aplicar éste método se utilizó como valor del esfuerzo de fluencia la expresión que determina el valor de esfuerzo de fluencia medio, ecuación 1.13, con el uso de cada ley de endurecimiento por deformación y así obtener una mejor aproximación. El cálculo de la carga se realizó con el uso de la expresión 1.11.

3.4.1.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon

$$F_r = w \cdot R \cdot \overline{\sigma'} \cdot \left[\left(\int_0^{\alpha_N} \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu H} d\alpha \right) + \left(\int_{\alpha_N}^{\alpha_b} \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b-H)} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 60,29 \cdot 89,1 \cdot 84,62 \cdot \left[\left(\int_0^{0,0311} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(14,92 \arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) + \left(\int_{0,0311}^{0,0678} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(6,9938 - 14,92 \arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 66543,25 N = 6790,12 Kgf$$

3.4.1.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce

$$F_r = w \cdot R \cdot \overline{\sigma'} \cdot \left[\left(\int_0^{\alpha_N} \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu H} d\alpha \right) + \left(\int_{\alpha_N}^{\alpha_b} \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b-H)} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 60,29 \cdot 89,1 \cdot 87,27 \left[\left(\int_0^{0,0311} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(14,92\arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) + \left(\int_{0,0311}^{0,0678} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(6,9938-14,92\arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 68627,15N = 7002,77Kgf$$

3.4.1.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al

$$F_r = w \cdot R \cdot \overline{\sigma'} \cdot \left[\left(\int_0^{\alpha_N} \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu H} d\alpha \right) + \left(\int_{\alpha_N}^{\alpha_b} \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b-H)} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 60,29 \cdot 89,1 \cdot 63,81 \left[\left(\int_0^{0,0311} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(14,92\arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) + \left(\int_{0,0311}^{0,0678} \frac{(1,6 + 89,1\alpha^2)}{2,01} \cdot e^{0,47(6,9938-14,92\arctg(7,46\alpha))} d\alpha \right) \right]$$

$$F_r = 50178,74N = 5120,28Kgf$$

3.4.2 Método de Parkins

Al haber calculado el esfuerzo de fluencia promedio con el uso de la fórmula 1.13 para cada ley de endurecimiento por deformación aplicamos la fórmula 1.12 para obtener la carga teórica necesaria para realizar el proceso de laminado.

3.4.2.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon

$$F_r = w\sqrt{(R\Delta h)}\bar{\sigma}'\left(1 + \frac{\mu\sqrt{R\Delta h}}{(h_b + h_a)}\right) = 60,29\sqrt{(89,1\cdot 0,4)}84,62\left(1 + \frac{0,47\sqrt{89,1\cdot 0,4}}{(2,01+1,6)}\right)$$

$$F_r = 55099,81N$$

$$F_r = 5622,43Kgf$$

3.4.2.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce

$$F_r = w\sqrt{(R\Delta h)}\bar{\sigma}'\left(1 + \frac{\mu\sqrt{R\Delta h}}{(h_b + h_a)}\right) = 60,29\sqrt{(89,1\cdot 0,4)}87,27\left(1 + \frac{0,47\sqrt{89,1\cdot 0,4}}{(2,01+1,6)}\right)$$

$$F_r = 56825,35N$$

$$F_r = 5798,5Kgf$$

3.4.2.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al

$$F_r = w\sqrt{(R'\Delta h)}\bar{\sigma}'\left(1 + \frac{\mu\sqrt{R'\Delta h}}{(h_b + h_a)}\right) = 60,29\sqrt{(89,1\cdot 0,4)}63,81\left(1 + \frac{0,47\sqrt{89,1\cdot 0,4}}{(2,01+1,6)}\right)$$

$$F_r = 41549,5N$$

$$F_r = 4239,74Kgf$$

3.4.3 Método de Ekelund

De igual manera que el método de Parkins se usaron los valores de esfuerzo de fluencia promedio para cada ley de endurecimiento por deformación y se calcularon los valores de carga necesaria para realizar el proceso de laminado con el uso de la fórmula 1.14. También se consideró la expresión 1.5 de Hitchcock para el cálculo del radio corregido en donde se realizaron iteraciones tomando como criterio que la relación de radios (R/R') fuera la más cercana a la unidad.

3.4.3.1 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Hollomon

$$R' = 89,1 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{55099,81}{60,29} \right) = 92,31mm$$

$$F_r = 60,29 \sqrt{(92,31 \cdot 0,41)} \cdot 84,61 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47 \sqrt{(92,31 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_r = 67330,18N$$

$$R'_1 = 92,31 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{67330,18}{60,29} \right) = 96,38mm$$

$$F_{r1} = 60,29 \sqrt{(96,38 \cdot 0,41)} \cdot 84,62 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47 \sqrt{(96,38 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_{r1} = 69694,74N$$

Luego de haber realizado dos iteraciones se obtiene:

$$F_r = 7111,7Kgf$$

3.4.3.2 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Voce

$$R' = 89,1 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{56825,35}{60,29} \right) = 92,41mm$$

$$F_r = 60,29 \sqrt{(92,41 \cdot 0,41)} \cdot 87,27 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47 \sqrt{(92,41 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_r = 69498,8N$$

$$R'_1 = 92,41 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{69498,8}{60,29} \right) = 96,61mm$$

$$F_{r1} = 60,29 \sqrt{(96,61 \cdot 0,41)} \cdot 87,27 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47 \sqrt{(96,61 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_{r1} = 72014,76N$$

Luego de haber realizado dos iteraciones se obtiene:

$$F_r = 7348,44Kgf$$

3.4.3.3 Cálculo de la carga con el uso de la ley de Sah et al

$$R' = 89,1 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{41549,5}{60,29} \right) = 91,52mm$$

$$F_r = 60,29 \sqrt{(91,52 \cdot 0,41)} \cdot 63,81 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47 \sqrt{(91,52 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_r = 50424,91N$$

$$R'_1 = 91,52 \left(1 + \frac{0,00001620}{0,41} \cdot \frac{50424,91}{60,29} \right) = 94,54mm$$

$$F_{r1} = 60,29\sqrt{(94,54 \cdot 0,41)} \cdot 63,81 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,47\sqrt{(94,54 \cdot 0,41)} - 1,2 \cdot 0,41}{2,01 + 1,6} \right) \right)$$

$$F_{r1} = 51750,29N$$

Luego de haber realizado dos iteraciones se obtiene:

$$F_r = 5280,64Kgf$$

3.5 Cuadro resumen (Valores de carga de laminación)

Leyes de Endurecimiento por deformación	Ley de Hollomon Kgf (N)		Ley de Voce Kgf (N)		Ley de Sah et al Kgf (N)	
	Métodos de cálculo de fuerza de laminación	Carga	Porcentaje de dif. al valor real	Carga	Porcentaje de dif. al valor real	Carga
Método de Orowan, Bland y Ford	6790,12 (66543,17)	16 %	7002,77 (68627,14)	18,2 %	5120,28 (50178,74)	10,93 %
Método de Parkins	5622,43 (55099,81)	1,03 %	5798,5 (56825,3)	2,01 %	4239,74 (41549,45)	33,98 %
Método de Ekelund	7111,7 (69694,66)	20,12 %	7348,44 (72014,71)	22,69 %	5280,64 (51750,27)	7,57 %
Carga Real Experimental	5680,63 (55670,17)					

Tabla 3.15 Resumen de las cargas de laminación

Se puede observar en la Tabla 4.1 que el valor de carga teórica que más se acerca al valor de carga obtenido experimentalmente es el calculado por la expresión de Parkins con el uso de la ley de Hollomon con 1,03% de diferencia del valor real, sin embargo el valor que se tomaría en cuenta en un proceso de conformado real de laminación sería el más cercano superior al valor experimental para sobrepasar la carga requerida y asegurar que se alcanzará, en éste caso la combinación más indicada es la expresión de Parkins con la ley de Voce con 2,01% por encima al valor real.

Al momento de analizar las otras combinaciones se observa que la expresión propuesta por Orowan, Bland y Ford combinada con las leyes de endurecimiento por deformación estudiadas no proporciona la aproximación de la carga experimental de laminación que se esperaría. Teniendo en cuenta que para poder aplicar esta expresión es necesario suponer que las presiones radiales son iguales a las presiones normales al plano de la chapa, se puede adjudicar que la gran diferencia entre el valor experimental y el obtenido mediante las expresiones de Orowan, Bland y Ford ocurre debido a que para la configuración de la laminadora utilizada el arco de contacto es muy grande en relación al radio de los rodillos incumpliendo la condición antes de descrita. Sin embargo se puede observar que al combinar dicha expresión con la ley de Sah et al. se alcanza una buena aproximación con una diferencia al valor real de 10,93%, esto es debido a que se compensan los errores presentes en la expresión de Orowan, Bland y Ford con los errores presentes en el ajuste hecho con la ley de Sah et al, por lo tanto esta combinación no es confiable.

De igual modo la expresión de Ekelund con la ley de Sat et al. logra una buena aproximación con un porcentaje de diferencia al valor real de 7,57 %, compensándose el error que proviene del ajuste con la ley de Sah et al. con un error asociado al radio corregido usado en la expresión de Ekelund. La corrección del radio se aplica cuando se desea hacer aproximaciones de carga para

laminadores de gran radio (escalas industriales) en donde ocurre una deformación elástica más apreciable en los rodillos, siendo esta deformación más significativa sobre los cálculos de estimación de carga de laminación, sin embargo es inexacta para la configuración utilizada en donde los rodillos de la laminadora experimental son pequeños y dicha deformación elástica es despreciable y no afecta en gran medida la estimación de la carga de laminación por el contrario tal corrección provoca una gran dispersión en la estimación de los valores. También se observa que el valor de carga obtenido con la combinación de la expresión de Ekelund con las otras leyes de endurecimiento por deformación se alejan del valor de carga experimental, obteniéndose un porcentaje de diferencia al valor real de 20,12 % con la ley de Hollomon y 22,69 % con la ley de Voce.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

- La ley de endurecimiento por deformación que mejor modela el comportamiento plástico de la aleación AA8011 es la ley de Voce con un coeficiente de determinación asociado de 0,99195.
- La ley de Sah et al. no representa un buen ajuste para la aleación AA8011 con un coeficiente de determinación asociado de 0,85247.
- La expresión teórica para el cálculo aproximado de la carga de laminación propuesta por Parkins con el uso de la ley de endurecimiento por deformación de Hollomon es la que más se aproxima al valor de carga de laminación experimental para la aleación de aluminio 8011, tomando en consideración que el valor absoluto de la diferencia de dichos valores es el más pequeño. Alcanzando un porcentaje de diferencia con el valor de carga real de 1,03%.
- La combinación de la expresión propuesta por Parkins con la ley de endurecimiento por deformación de Voce es la que mejor se acerca por encima al valor experimental de carga, tomando en consideración que el valor absoluto de la diferencia de dichos valores no es el más pequeño. Alcanzando un porcentaje de diferencia con el valor de carga real de 2,01%.

CAPITULO V

RECOMENDACIONES

- Realizar el ensayo de compresión plana tipo Ford con el uso de otros lubricantes diferente al grafito en polvo.
- Realizar el mismo estudio sustituyendo el ensayo de compresión plana tipo Ford por el ensayo de compresión plana tipo canal.
- Realizar el ensayo de laminación para distintos valores de reducción de espesor.
- Realizar el ensayo de compresión plana tipo Ford y de laminación en la estimación las cargas necesarias para reducir cierto espesor en diferentes aleaciones metálicas.
- Para la expresión propuesta por Orowan, Bland y Ford de estimación de la carga de laminación utilizar el método gráfico de partición de ángulos para el cálculo.
- Utilizar un lubricante en el ensayo de laminación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Estanislao M. (2008). *Aplicaciones del aluminio*. Revista Arqhys [Revista en línea]. Disponible <http://www.arqhys.com/arquitectura/aluminio-aplicaciones.html>. [Consulta: 2009, Julio 16].
- [2] Handbook of Aluminum. (1957). *Aluminum Company of Canada LTD*. Canada [Consulta: 2009, Julio 5].
- [3] Weiner I. (2006). *El aluminio: un metal con aplicaciones singulares*. Revista Quiminet [Revista en línea]. Disponible http://www.quiminet.com.mx/ar7/ar_%25E7%25D9%258B%250FD%258Es%255B.htm. [Consulta: 2009, Julio 16].
- [4] Novelis inc (2009). *Aleaciones de aluminio* [Documento en línea] http://www.novelis-painted.com/el_aluminio/aleaciones/index_esp.html [Consulta: 2009, Julio16].
- [5] Edicions UPC (2005). *Metalografía de las aleaciones de aluminio y magnesio* [Documento en línea] <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/EM04903M.pdf> [Consulta: 2009, Julio16].
- [6] Hyoung-Wook Kim, Suk-Bong Kang, Nobuhiro Tsuji y Yoritoshi Minamino (2005). Elongation increase in ultra-fine grained Al-Fe-Si alloy sheets. *Acta materialia* [Revista en línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/html>. [Consulta: 2009, julio 29].
- [7] Rowe W. G. (1972). *Conformado de los metales*, Ediciones Urmo. Bilbao.
- [8] Dieter G. (1986). *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Tercera edición. New York, 480 p.
- [9] Puchi E. S., M. H. Staia, C. Villalobos (1997). On the mechanical behavior of commercial-purity aluminum deformed under axisymmetric

- compression conditions. *International journal of Plasticity*. Vol. 13. No 8-9, pp. 723-742.
- [10] Puchi E. S. (2007). *Ensayos de compresión plana para la determinación de curvas esfuerzo-deformación*. Seminario comportamiento mecánico de materiales. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
- [11] Kalpakjian S., Schmid S (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Pearson Educación Cuarta Edición. Mexico.
- [12] Alexander, J.M. (1971). *Sobre La Teoría de Laminación*. Londres: Imperial College.
- [13] Datsko, J. (1980). *Materials Properties and Manufacturing Processes*. John Wiley.
- [14] DeGarmo E. Paul y otros. (1999). *Materials and Processes in Manufacturing* (8° edición). USA: John Wiley and Sons, Inc.
- [15] Del Rio, J. (1980). *Deformación plástica de los materiales*. Barcelona: Gustavo Gili.
- [16] Doyle, Keyser y otros. (1988). *Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros*. Prentice Hall.
- [17] Duan X. y Sheppard T. (2004). The influence of the constitutive equation on the simulation of a hot rolling process. *Journal of Materials processing technology*. pp. s.v. 100-106.
- [18] Fidias, G.A. (1997). *El Proyecto de Investigación*. Caracas: Episteme.
- [19] Hearn, E.J. (1997). *Mechanics of materials 2* (3ra Edición). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [20] Metal Pass. (2009). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.metallpass.com/metaldoc/paper.aspx?docID=385>[Consulta: 2009, Julio 16]

- [21] Schey John. (2002). *Procesos de Manufactura* (3° edición). México: Mc Graw Hill.
- [22] Von Kármán, T. A. (1925). *Math Mech*, vol. 5, p.p. 139-141.
- [23] Larke E. C. (1936). *The Rolling of Strip Sheet and Plate* (2° edición). Chapman & Hall, pag. 346
- [24] Hitchcock, J. H. (1935). *Elastic deformation of rolls during cold rolling*. ASME. Research Publication Roll Neck Bearings.
- [25] Orowan E. (1948). *The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling*. Proc. Inst. Mech. Engrs. 150, 140-167.
- [26] Bland D. R. y Ford H. (1948). *The calculation of roll force and torque in cold strip rolling with tensions*. Proc. Inst. Mech. Engrs. 159, 144-153.
- [27] Ekelund S. (1927). *The analysis of factors influencing rolling pressure and power consumption in the hot rolling of steel*. 93, 8-14.
- [28] Sah J. P., G. Richardson and C. M. Sellars, J. Aust. (1969). Inst. Metals, 14, pp 292-297
- [29] Hollomon J. H. (1945). Trans AIME. 162-268
- [30] Arellano H. F. (2007). *Notas sobre fuerzas de contacto*. Seccion 03

APENDICE

Apéndice A

A.1 Caracterización del material sometido a compresión plana

Probeta 2

Puntos	Carga (MP) Pc	Δh
1	0	0
2	2	0,7
3	2,5	0,75
4	3	0,88
5	3,5	0,97
6	4	0,98
7	4,5	0,99
8	5	1,1
9	5,5	1,5
10	6	2
11	6,5	3,3
12	7	5
13	7,5	8
14	8	12,9
15	8,5	17
16	9	22
17	9,5	25
18	9,9	28

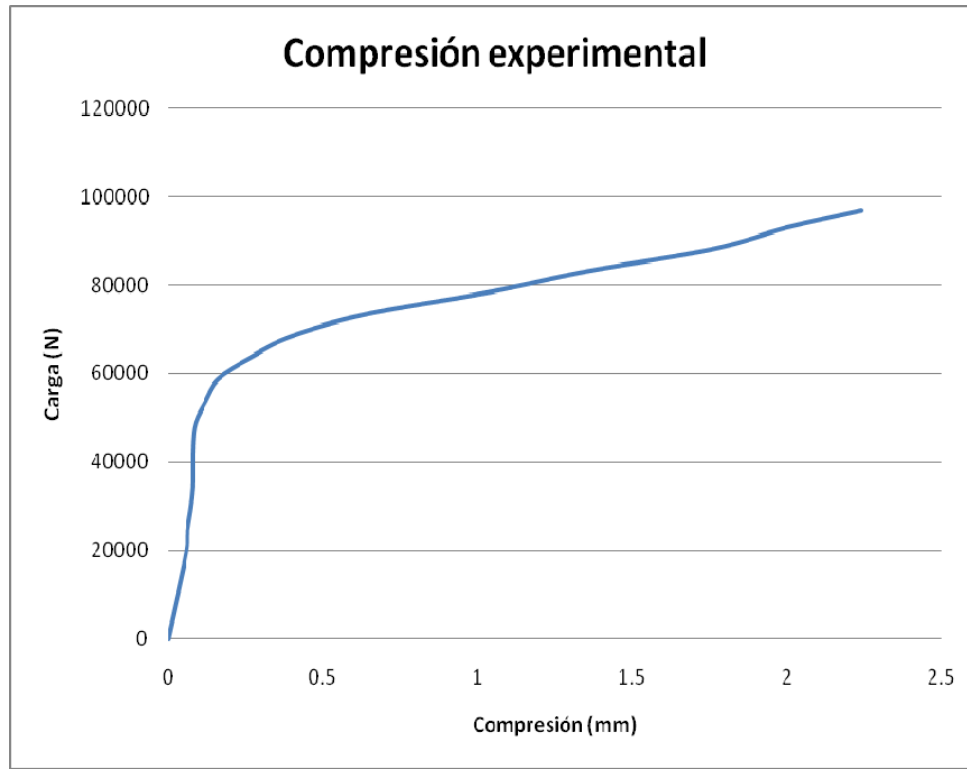
Tabla A.1

De igual manera que la primera probeta, cada valor de carga aplicada fue transformado de Megapodios (MP) a Newtons (N) con el uso de un factor igual a 9806.65 y también el valor de variación de espesor fue modificado debido a la relación de radios que se usó para el registro de datos, como se explica en el Capítulo II, este factor es igual a 0,08, obteniendo así lo siguiente (Tabla 3.6):

Puntos	Carga (N) Pc	Δh_{exp}
1	0	0
2	19613,3	0,056
3	24516,625	0,06
4	29419,95	0,0704
5	34323,275	0,0776
6	39226,6	0,0784
7	44129,925	0,0792
8	49033,25	0,088
9	53936,575	0,12
10	58839,9	0,16
11	63743,225	0,264
12	68646,55	0,4
13	73549,875	0,64
14	78453,2	1,032
15	83356,525	1,36
16	88259,85	1,76
17	93163,175	2
18	97085,835	2,24

Tabla A.2

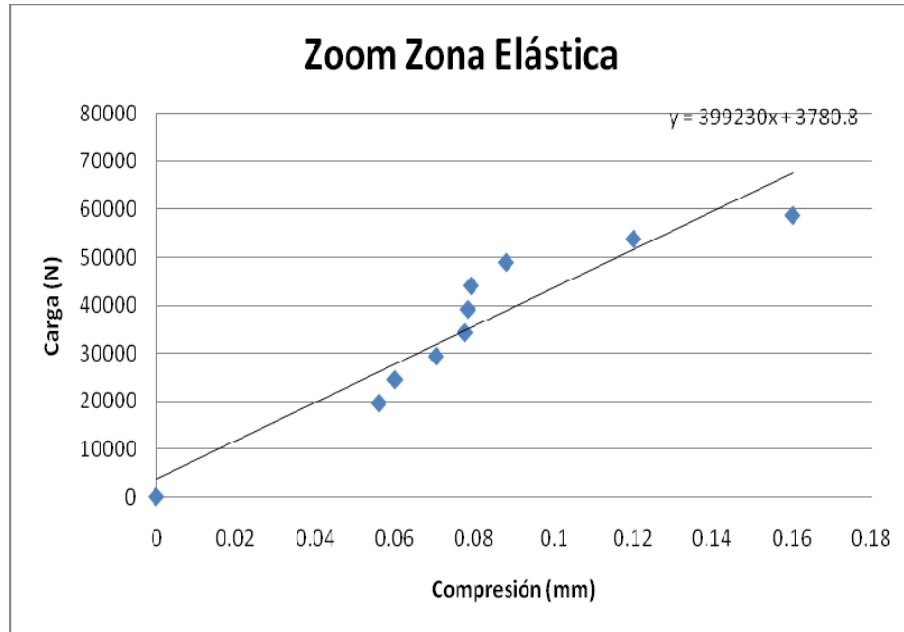
Con esta modificación podemos graficar la curva experimental, resultando la siguiente (Gráfica A.1):



Gráfica A.1

Estos valores a su vez deben de ser modificados debido a la deformación elástica que sufre la máquina. Por tal razón se siguió con la formulación expuesta en el Capítulo II, como se observa a continuación.

Primero se graficó la zona elástica de la curva anterior para así determinar la pendiente de la recta de tendencia (Gráfica A.2).



Gráfica A.2

La pendiente de la curva anterior significa el valor de K_{total} quien representa el valor experimental.

$$K_{total} = 399228,7215 \text{ N/mm}$$

Además, con el valor del área de contacto, el espesor inicial y el valor del modulo de elasticidad del material ($E = 68600$) se pudo calcular el valor de K_{muest} .

$$K_{muest} = \frac{EA}{h_o} = 6625756,098 \text{ N/mm}$$

El área de contacto A , fue determinado al multiplicar el ancho de la probeta con el ancho del indenter (8 mm), obteniendo así un valor de 396 mm².

Ahora bien, al usar la ecuación (2.2) podemos obtener el valor corregido de la variación de espesor. Teniendo el siguiente cuadro modificado:

Puntos	Carga (N) Pc	Δh_{correg}
1	0	0
2	19613,3	0,009832182
3	24516,625	0,002290227
4	29419,95	0,001148273
5	34323,275	-0,00319368
6	39226,6	-0,01393564
7	44129,925	-0,02467759
8	49033,25	-0,02741955
9	53936,575	-0,0069615
10	58839,9	0,021496546
11	63743,225	0,113954591
12	68646,55	0,238412637
13	73549,875	0,466870682
14	78453,2	0,847328728
15	83356,525	1,163786773
16	88259,85	1,552244819
17	93163,175	1,780702864
18	97085,835	2,0114693

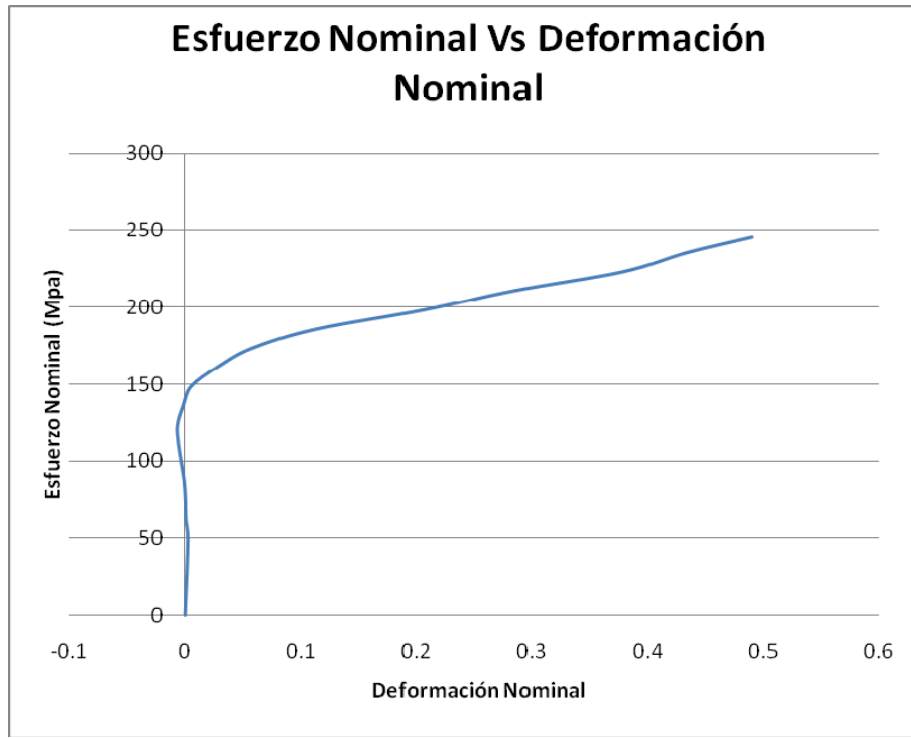
Tabla A.3

Con este nuevo conjunto de datos se pudo realizar los cálculos de los respectivos esfuerzos y deformaciones tanto nominales como reales. Con el uso de las ecuaciones 1.16, 1.17, 1.18, 1.19 y 1.20 se obtuvo la siguiente tabla:

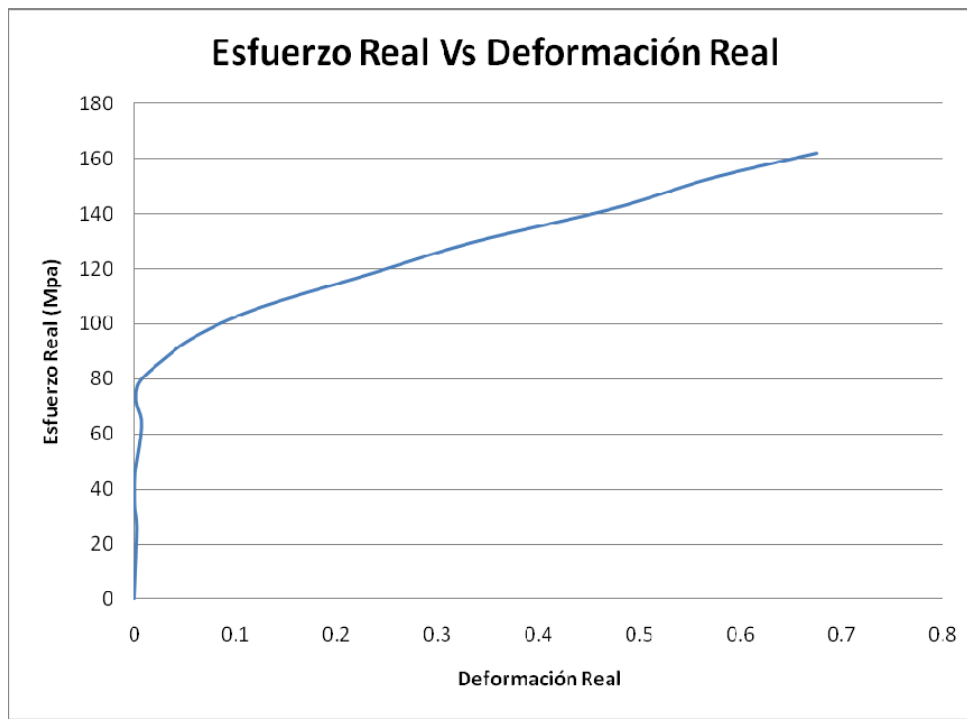
Puntos	S (Mpa)	e(mm)	ϵ (mm)	$\mu w/h$	$\exp(\mu w/h)-1$	σ' (Mpa)
1	0	0	0	1,159024	2,18682266	0
2	49,52853535	0,002398093	0,002401	1,156252	2,17799848	26,29361233
3	61,91066919	0,000558592	0,000559	1,158377	2,18476126	32,82551593
4	74,29280303	0,000280067	0,00028	1,1587	2,18578867	39,38306712
5	86,67493687	-0,000778947	0,000779	1,159928	2,18970333	45,91337887
6	99,05707071	-0,003398936	0,003393	1,162977	2,19944474	52,37736608
7	111,4392045	-0,006018925	0,006001	1,166043	2,20926749	58,81717506
8	123,8213384	-0,006687694	0,006665	1,166828	2,21178795	65,32189342
9	136,2034722	-0,001697927	0,001696	1,160996	2,193111	72,10380253
10	148,5856061	0,00524306	0,005257	1,152979	2,16761599	79,03435002
11	160,9677399	0,027793803	0,028187	1,127682	2,08848854	86,91471918
12	173,3498737	0,058149424	0,059909	1,095331	1,99017375	95,40653254
13	185,7320076	0,113870898	0,120893	1,040537	1,830738	105,5645922
14	198,1141414	0,206665543	0,23151	0,960518	1,61305058	117,9704277
15	210,4962753	0,283850432	0,333866	0,902772	1,46643091	129,5868557
16	222,8784091	0,378596297	0,475774	0,840728	1,31805371	142,1642373
17	235,2605429	0,434317772	0,569723	0,808067	1,24356624	152,8717952
18	245,16625	0,490602268	0,674526	0,777554	1,17614383	162,0806042

Tabla A.4

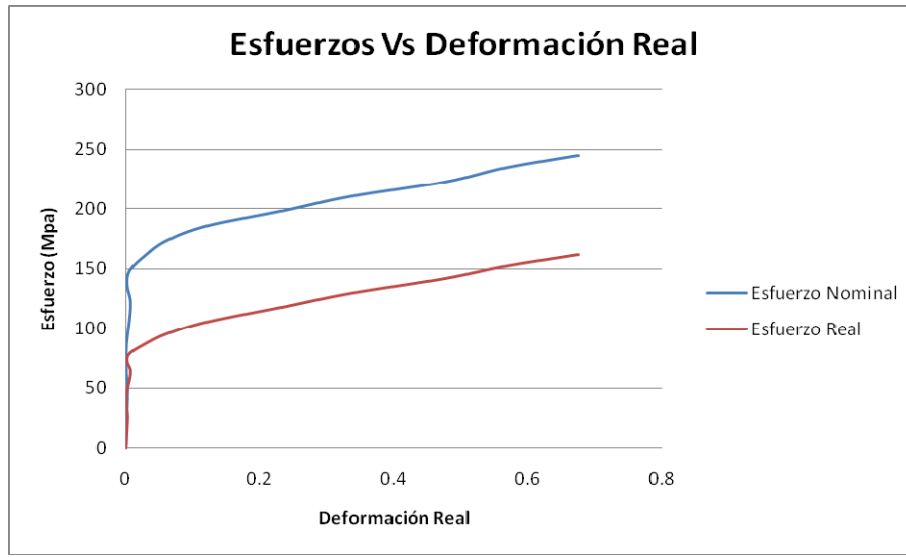
Obteniendo así las siguientes gráficas:



Gráfica A.3



Gráfica A.4



Gráfica A.5

Probeta 3

Puntos	Carga (MP) Pc	Δh
1	0	0
2	1,9794	1,7
3	2,4742	2,1
4	2,9691	2,6
5	3,4639	3
6	3,9588	3,35
7	4,4536	3,8
8	4,9485	4,3
9	5,4433	4,6
10	5,9382	5,2
11	6,433	5,9
12	6,9279	8
13	7,4227	11
14	7,9176	15
15	8,4124	20,5
16	8,9073	25
17	9,4021	28
18	9,7	30

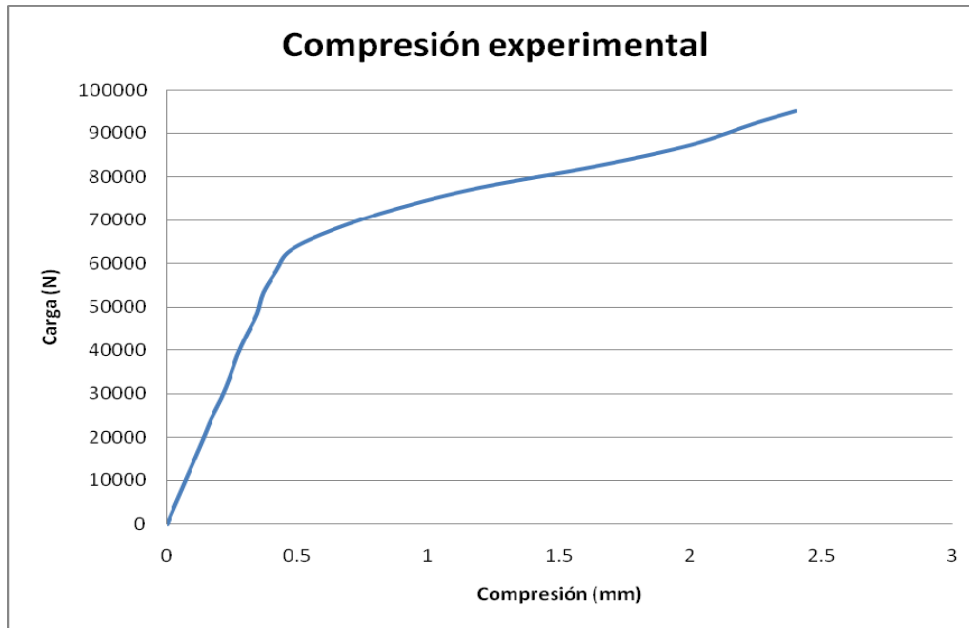
Tabla A.5

De la misma forma que los anteriores casos, cada valor de carga aplicada fue transformado de Megapodios (MP) a Newtons (N) con el uso de un factor igual a 9806.65 y también el valor de variación de espesor fue modificado debido a la relación de radios que se usó para el registro de datos, como se explica en el Capítulo II, este factor es igual a 0,08, obteniendo así lo siguiente (Tabla A.6):

Puntos	Carga (N) Pc	Δh_{exp}
1	0	0
2	19411,28301	0,136
3	24263,61343	0,168
4	29116,92452	0,208
5	33969,25494	0,24
6	38822,56602	0,268
7	43674,89644	0,304
8	48528,20753	0,344
9	53380,53795	0,368
10	58233,84903	0,416
11	63086,17945	0,472
12	67939,49054	0,64
13	72791,82096	0,88
14	77645,13204	1,2
15	82497,46246	1,64
16	87350,77355	2
17	92203,10397	2,24
18	95124,505	2,4

Tabla A.6

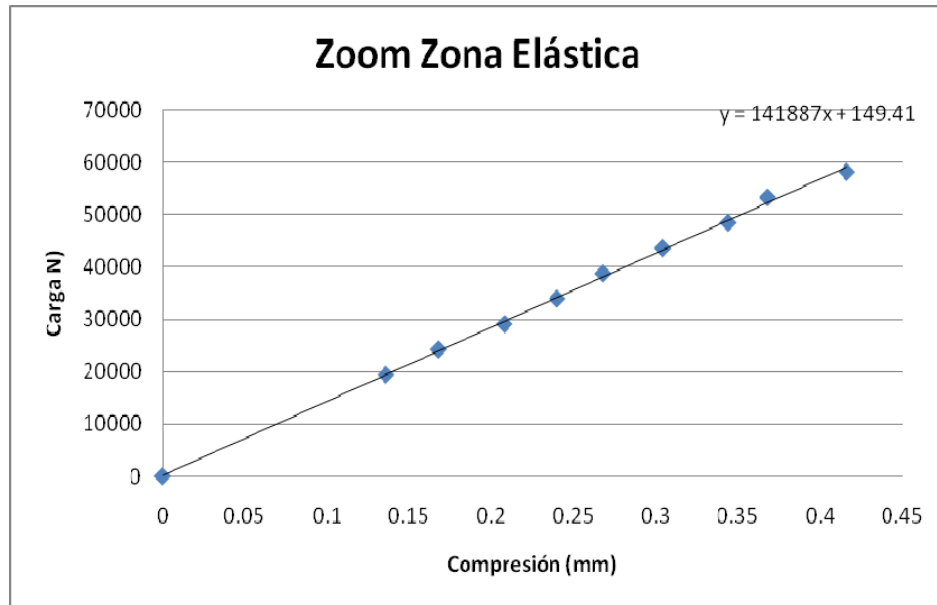
Con esta modificación podemos graficar la curva experimental, resultando la siguiente (Gráfica A.6):



Gráfica A.6

Estos valores a su vez deben de ser modificados debido a la deformación elástica que sufre la máquina. Por tal razón se siguió con la formulación expuesta en el Capítulo II, como se observa a continuación.

Primero se graficó la zona elástica de la curva anterior para así determinar la pendiente de la recta de tendencia (Gráfica A.7).



Gráfica A.7

La pendiente de la curva anterior significa el valor de K_{total} quien representa el valor experimental.

$$K_{total} = 141882,6122 \text{ N/mm}$$

Además, con el valor del área de contacto, el espesor inicial y el valor del modulo de elasticidad del material ($E = 68600$) se pudo calcular el valor de K_{muest} .

$$K_{muest} = \frac{EA}{h_o} = 6924365,432 \text{ N/mm}$$

El área de contacto A , fue determinado al multiplicar el ancho de la probeta con el ancho del indenter (8 mm), obteniendo así un valor de 408,8 mm².

Ahora bien, al usar la ecuación (3.2) podemos obtener el valor corregido de la variación de espesor. Teniendo el siguiente cuadro modificado:

Puntos	Carga (N) Pc	Δhcorreg
1	0	0
2	19411,28301	0,001991055
3	24263,61343	0,000492204
4	29116,92452	0,006986582
5	33969,25494	0,005487731
6	38822,56602	-1,789E-05
7	43674,89644	0,002483259
8	48528,20753	0,008977637
9	53380,53795	-0,00052121
10	58233,84903	0,013973165
11	63086,17945	0,036474313
12	67939,49054	0,170968692
13	72791,82096	0,377469841
14	77645,13204	0,663964219
15	82497,46246	1,070465368
16	87350,77355	1,396959747
17	92203,10397	1,603460896
18	95124,505	1,743292529

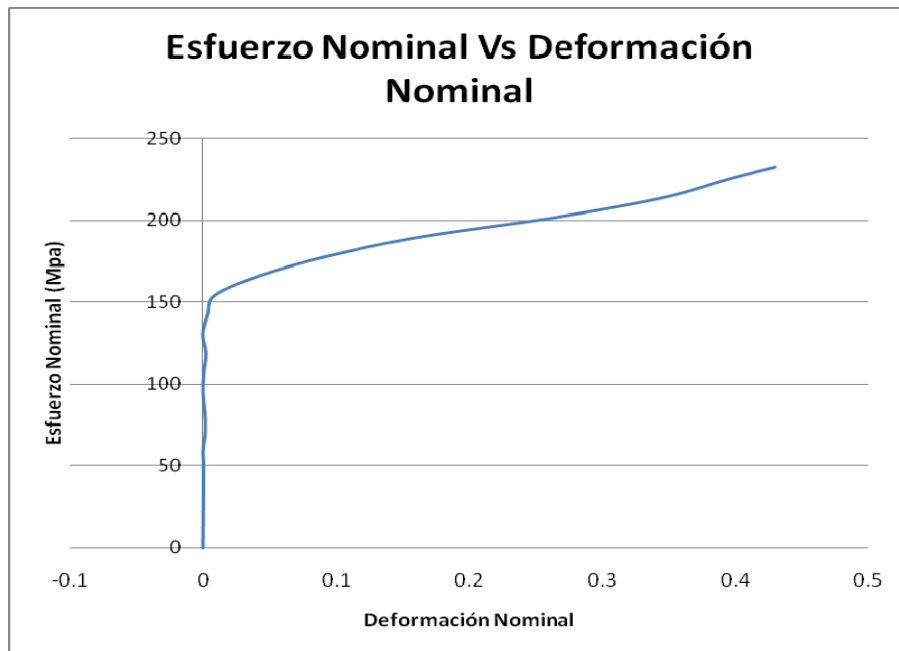
Tabla A.7

Con este nuevo conjunto de datos se pudo realizar los cálculos de los respectivos esfuerzos y deformaciones tanto nominales como reales. Con el uso de las ecuaciones .16, 1.17, 1.18, 1.19 y 1.20 se obtuvo la siguiente tabla:

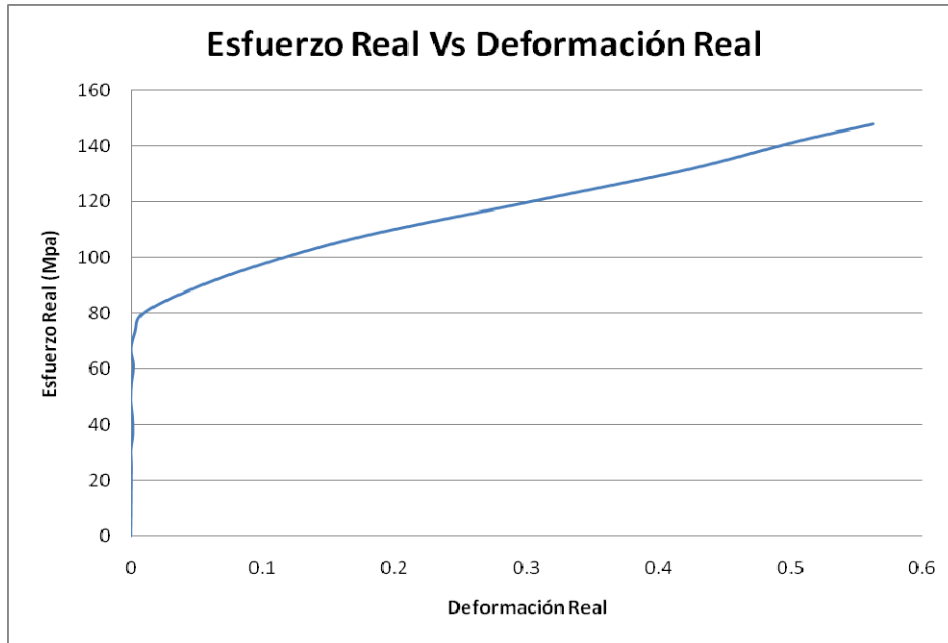
Puntos	S (Mpa)	e(mm)	ϵ (mm)	$\mu\text{w/h}$	$\exp(\mu\text{w/h})-1$	σ' (Mpa)
1	0	0	0	1,211259	2,35771022	0
2	47,48356901	0,000491618	0,000492	1,210664	2,35571236	24,40308597
3	59,35326182	0,000121532	0,000122	1,211112	2,35721604	30,49506309
4	71,22535351	0,001725082	0,001727	1,209173	2,35071359	36,63729965
5	83,09504632	0,001354995	0,001356	1,20962	2,35221134	42,7314703
6	94,96713801	-4,41735E-06	4,42E-06	1,211265	2,35772818	48,78863226
7	106,8368308	0,00061315	0,000613	1,210517	2,35521895	54,9111593
8	118,7089225	0,002216701	0,002219	1,20858	2,34872675	61,08384179
9	130,5786153	-0,000128695	0,000129	1,211415	2,35823374	67,0777082
10	142,450707	0,003450164	0,003456	1,207095	2,34375553	73,36579051
11	154,3203998	0,009006003	0,009047	1,200448	2,32160474	79,79550334
12	166,1924915	0,042214492	0,043131	1,162198	2,19695142	87,9166127
13	178,0621843	0,09320243	0,097836	1,107992	2,02827072	97,2707573
14	189,934276	0,163941783	0,179057	1,040653	1,83106449	107,945752
15	201,8039688	0,264312437	0,30695	0,958038	1,60657714	120,3402249
16	213,6760605	0,344928333	0,423011	0,900612	1,46111006	131,7076204
17	225,5457533	0,395916271	0,504042	0,867716	1,38146601	141,6681395
18	232,6920377	0,4304426	0,562896	0,846772	1,33210749	147,9138789

Tabla A.8

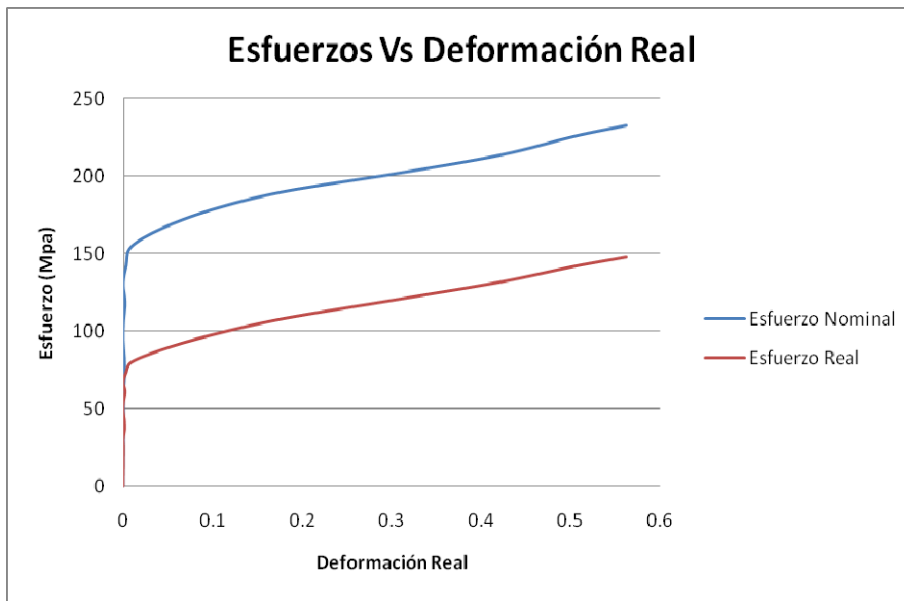
Obteniendo así las siguientes gráficas:



Gráfica A.8



Gráfica A.9

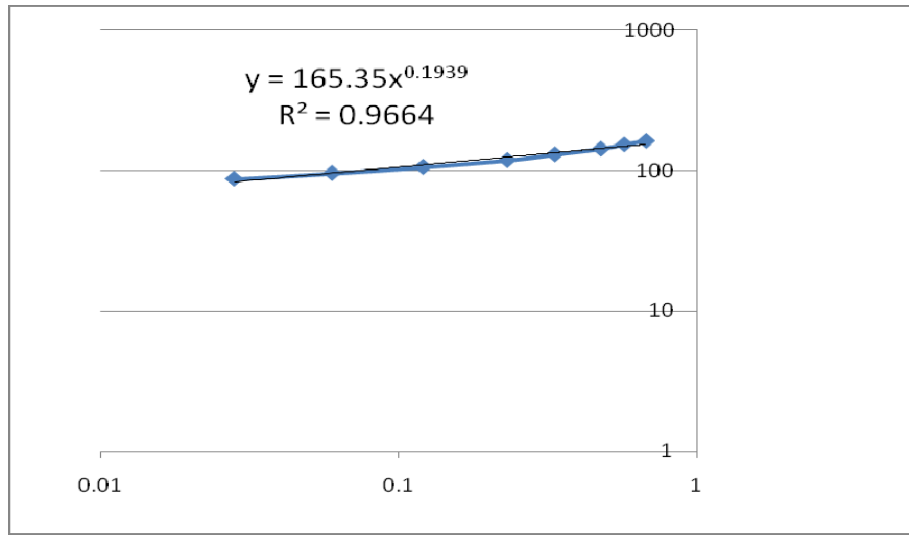


Gráfica A.10

Apéndice B

B.1 Modelización con la ley de Hollomon

Probeta 2



Gráfica B.1

De la misma forma que la primera probeta, la gráfica obtenida se ajustó con una línea de tendencia de orden potencial que se puede observar en el Gráfico B.1, y su ecuación representa directamente los parámetros involucrados en la ley de Hollomon, teniendo definitivamente la siguiente expresión:

$$\sigma' = 165,25\varepsilon^{0,193}$$

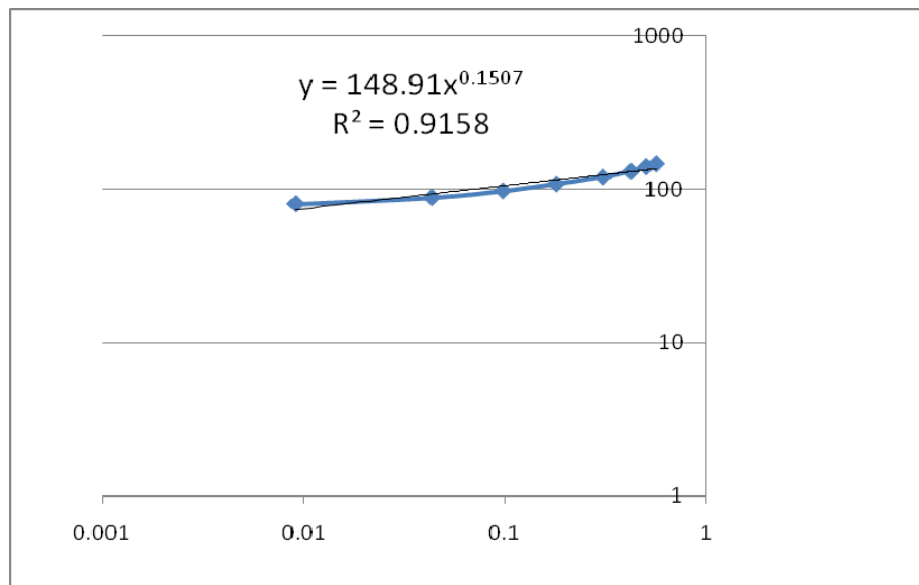
Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio integrando de una deformación 0 hasta 0,22813 que fue la deformación

alcanzada en el ensayo de laminación, posteriormente este valor se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0.22813} \int_0^{0.22813} 165,25\varepsilon^{0,193} d\varepsilon$$

$$\bar{\sigma}' = 80,63MPa$$

Probeta 3



Gráfica B.2

De igual manera, la gráfica obtenida se ajustó con una línea de tendencia de orden potencial que se puede observar en el Gráfico B.2, y su ecuación representa directamente los parámetros involucrados en la ley de Hollomon, teniendo definitivamente la siguiente expresión:

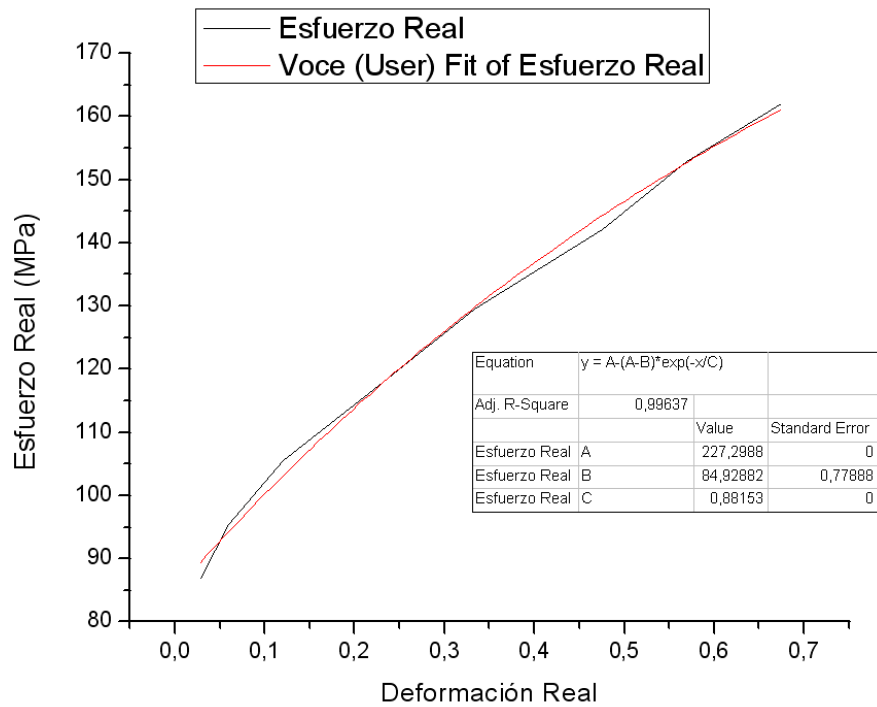
$$\sigma' = 148,91\varepsilon^{0,1507}$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio integrando de una deformación 0 hasta 0,22813 que fue la deformación alcanzada en el ensayo de laminación, posteriormente este valor se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} 148,91\varepsilon^{0,1507} d\varepsilon$$
$$\overline{\sigma'} = 88,1MPa$$

B.2 Modelización con la ley de Voce

Próbata 2



Gráfica B.3

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

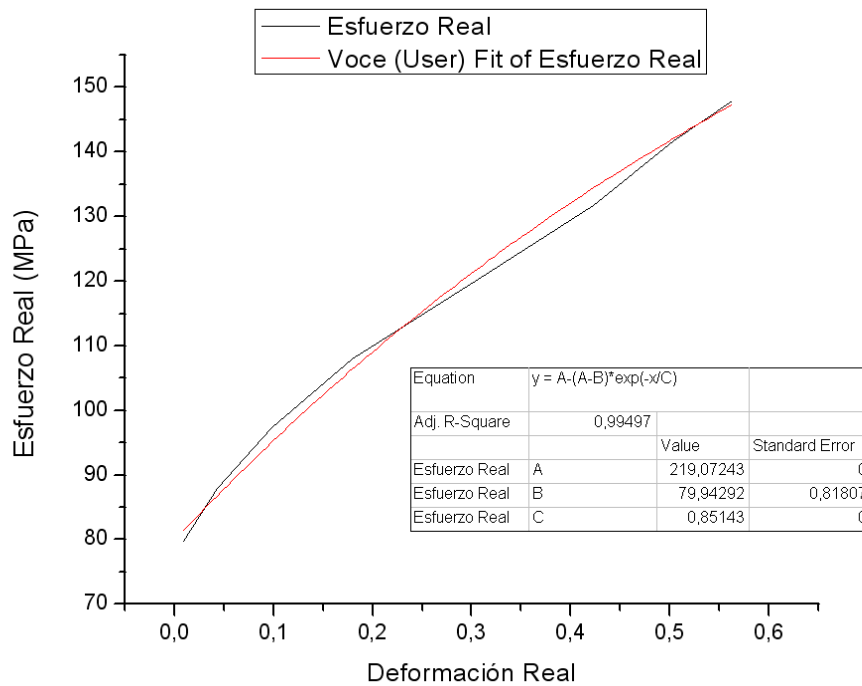
$$\sigma' = 227,298 - (227,298 - 84,9288) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,88}\right)$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (227,298 - 142,3692e^{-\varepsilon/0,88}) d\varepsilon$$

$$\bar{\sigma}' = 89,2 \text{ MPa}$$

Probeta 3



Gráfica B.4

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma' = 216,9034 - (216,9034 - 80,514) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,85143}\right)$$

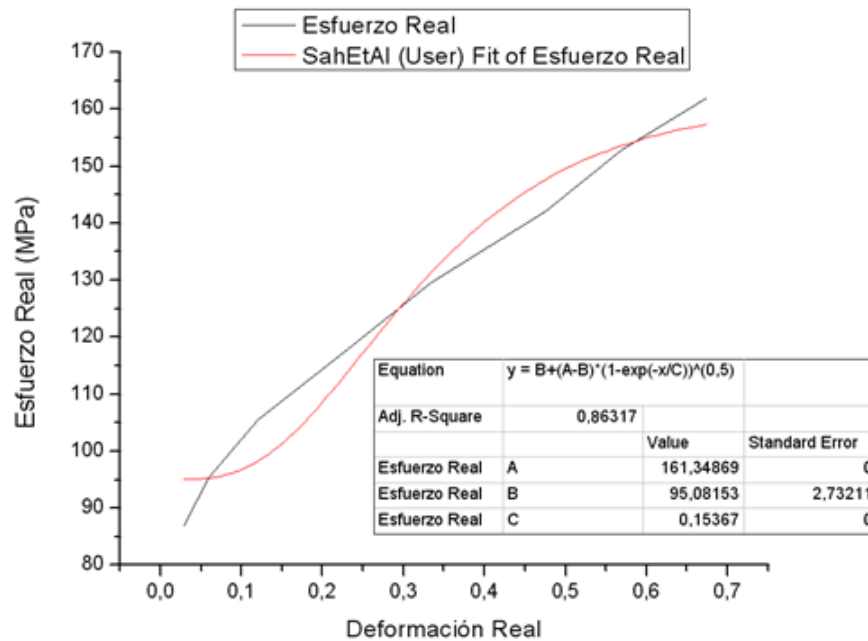
Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Parkins y Ekelund.

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (216,9034 - 136,3894e^{-\varepsilon/0,85143}) d\varepsilon$$

$$\overline{\sigma'} = 84,85 \text{ MPa}$$

B.3 Modelización con la ley de Sah et al.

Probeta 2



Gráfica B.5

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

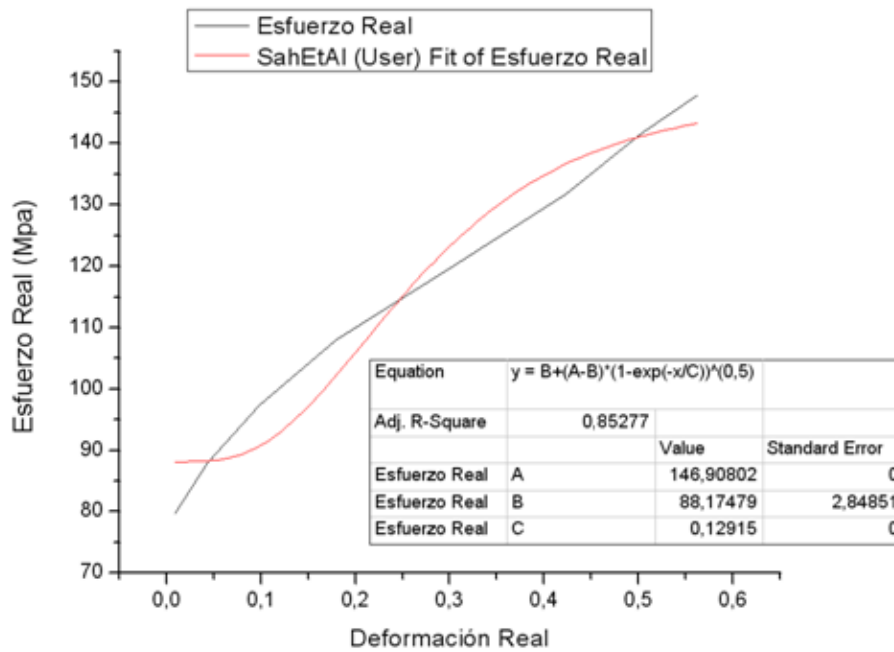
$$\sigma' = 95,08153 + (161,34869 - 95,08153) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,15367}\right) \right)^{1/2}$$

Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\bar{\sigma}' = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (95,08153 - 66,26\sqrt{1 - e^{-\varepsilon/0,15367}}) d\varepsilon$$

$$\bar{\sigma}' = 61,01 \text{MPa}$$

Probeta 3



Gráfica B.6

De forma análoga a la expresión programada (Valores de A, B y C) obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma' = 88,174 + (146,90 - 88,174) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0,129}\right) \right)^{1/2}$$

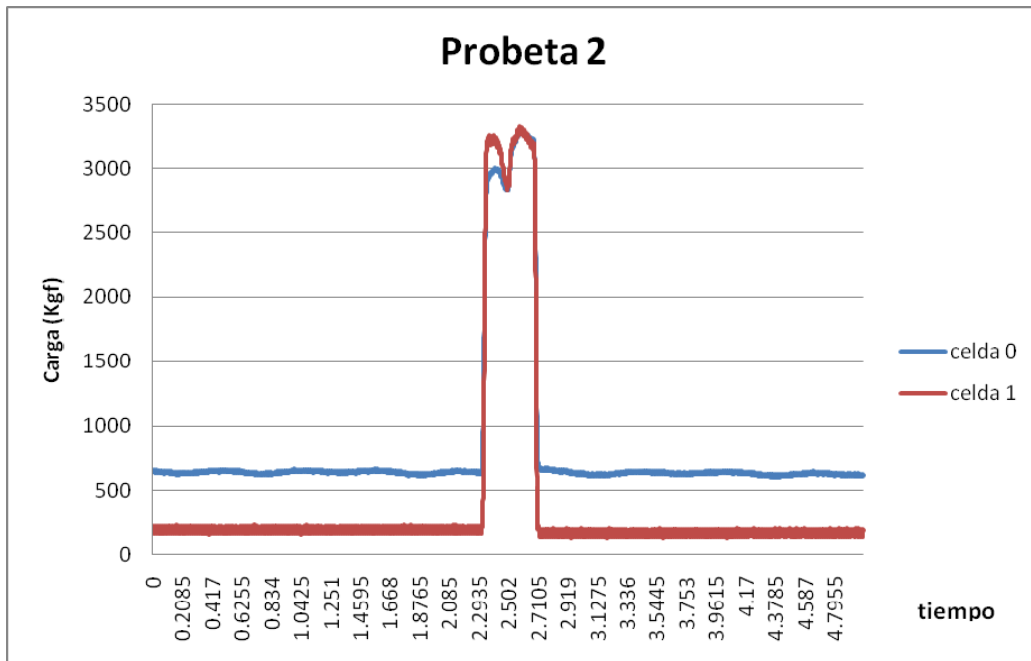
Con el uso de la integral 1.13 se calculó el valor de esfuerzo de fluencia promedio que posteriormente se utilizó en los métodos de Orowan, Bland y Ford, Parkins y Ekelund.

$$\overline{\sigma'} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma'_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \frac{1}{0,22813} \int_0^{0,22813} (88,174 - 58,726 \sqrt{1 - e^{-\varepsilon/0,129}}) d\varepsilon$$

$$\overline{\sigma'} = 64.78 MPa$$

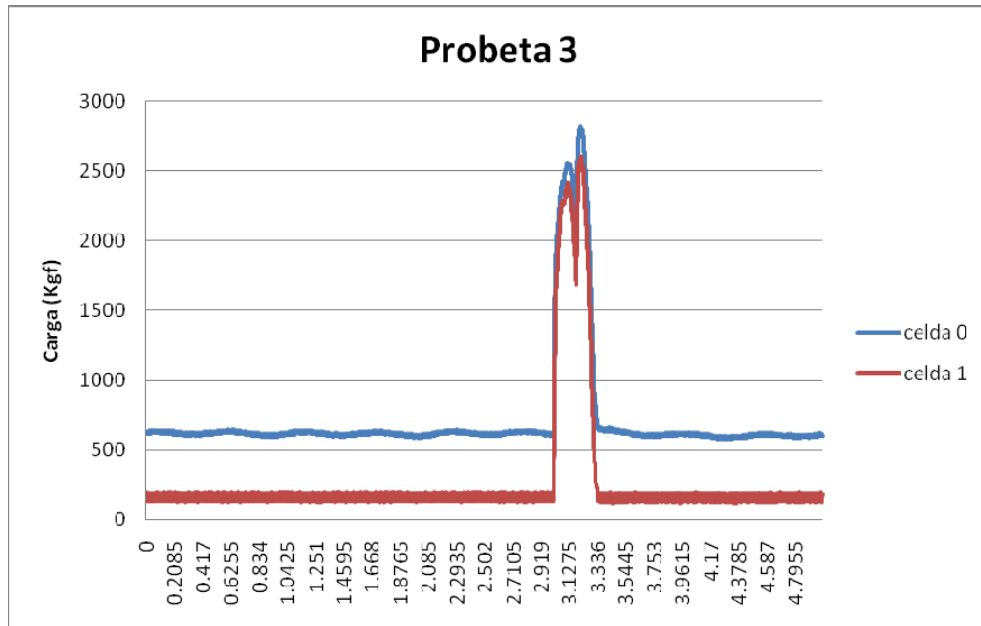
Apéndice C

Seguidamente la Grafica C.1 muestra el registro que se obtuvo de cada celda de carga al momento de laminar la probeta 2.



Gráfica C.1

Seguidamente la Grafica C.2 muestra el registro que se obtuvo de cada celda de carga al momento de laminar la probeta 3.



Gráfica C.2