

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE
Y EN FRIJO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

TM
Z5853
.M2
FIME
2003
.G3

CHARACTERIZACION MICROBIOLÓGICA Y
OBTENCION DE PRODUCTOS BIOLÓGICOS
DE INTERÉS INDUSTRIAL Y MEDICINAL
DE LA MICROBIOLOGÍA INDUSTRIAL Y
MEDICINAL. N. F. G. M. O.
Y EN FRIO



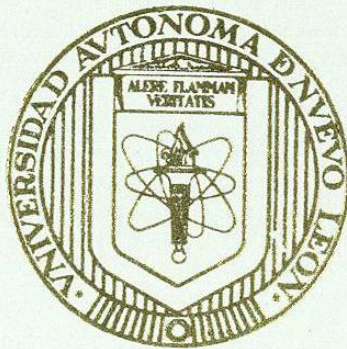
1020149036

Handwritten signature or initials.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE
Y EN FRIJO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

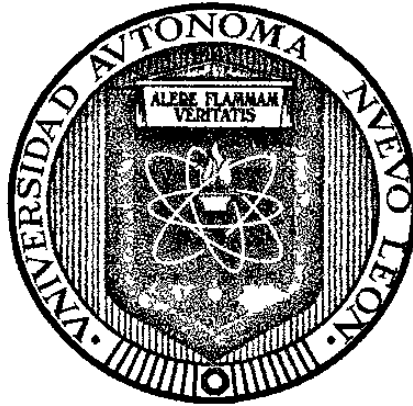
PRESENTA:

NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y
EN FRIO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

**PRESENTA
NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA**

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

8-22

TH

Z5853

.M2

11

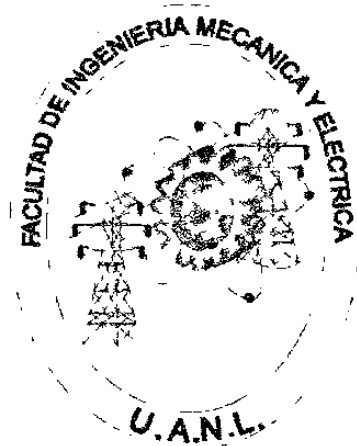
202

.



FONDO
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y
EN FRIO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

**PRESENTA
NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA**

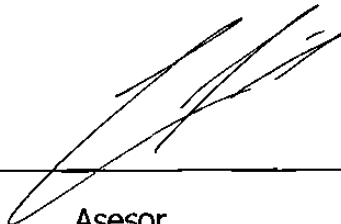
CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Caracterización microestructural y superficial de aceros laminados en caliente y en frío", realizada por el alumno Nelson Federico Garza Montes de Oca, matrícula 890346, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.


El Comité de Tesis



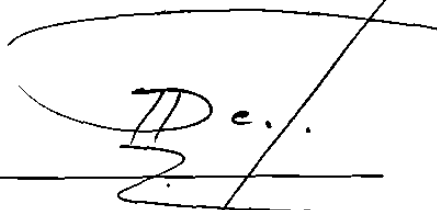
Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



Coasesor
Dr. Carlos Lizcano Zulaica



Vo.Bo
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Junio 2003

Cuando vuelvas para decirme adiós, yo te regalaré un secreto.....mi secreto es muy simple:

“Solo se ve con el corazón, lo esencial es invisible para los ojos”

***El Principito
Antoine de Saint-Exupéry***

DEDICATORIA

***A DIOS POR DARME LA VIDA Y TODO LO QUE EN ELLA JUNTOS HEMOS
ESCRITO .***

A MIS PADRES FEDERICO Y MARICELA, POR TODO SU AMOR .

A MIS HERMANOS LISSETTE, MARICELA, GERARDO, ZEFERINO.

A MI NOVIA GISELA.

AGRADECIMIENTOS.

Antes que todo, quiero agradecer a Dios por permitirme culminar un etapa mas en mi carrera, por que sin su ayuda hubiera sido mas dificil, en verdad amigo, me llevas en tus brazos.

A mi familia, sobre todo a mis padres Federico y Maricela, quienes me han apoyado siempre y siempre (además de aguantar todos los dolores de cabeza que les doy), así como a mis hermanos Liz, Chela, Gera, Zefe, este triunfo es nuestro.

Muy especialmente quiero agradecer a la persona que SIEMPRE y desde que la conocí, ha estado conmigo en todo momento apoyándome y es imposible que falte en este, me refiero a mi novia Gis, gracias por ayudarme a estar tranquilo cuando más lo necesitaba, pero sobre todo muchas gracias por tu interminable amor, PACIENCIA y comprensión, además por todo lo que hemos aprendido juntos, pero en verdad infinitas gracias te doy por haberle regresado la luz y la magia a mi vida, Te amo Gis.

A la familia Azpilcueta Salinas por su apoyo y confianza, pero más que nada por haberme abierto las puertas de su hogar.

A la Dra. Martha Guerrero por haber confiado en mí para trabajar en este proyecto y por todos sus consejos y ayuda.

Al profesor Rafael Colás, por haberme ayudado y orientado SIEMPRE durante el desarrollo de esta tesis a pesar de todas las grandes dificultades que nos encontrábamos, además de darme la oportunidad de conocer otro país y valorar lo que tengo en mi vida, en verdad le estoy muy agradecido.

Al profesor Alberto Pérez Unzueta, por haberme ayudado con las aspectos tribológicos de esta tesis, mucho le estoy agradecido.

A mi amigo Alberto Pérez, por toda la ayuda que me brindó en otros aspectos diferentes a los tribológicos, pero que en verdad mucho me han ayudado y me van a ayudar en mi vida, además de estar siempre para escucharme, mil gracias por todo, y creo que "you are not an useless hippie".

A la empresa Hojalata y Lámina S.A. , en especial, en la división de Tecnología al Ing. Ricardo Viramontes y en Molinos Fríos al Ing. Félix Cárdenas y al Ing. Gerardo Salinas, así como a todo el personal que SIEMPRE nos apoyo en todo. Gracias por creer en este proyecto.

Al Dr. Carlos Lizcano por la revisión de esta tesis y por su apoyo comentarios sobre este trabajo.

A la profesora Mariana Staia y al profesor Elí Saúl Puchi, de la Universidad Central de Venezuela, por haberme recibido en Caracas y haberme ayudado en este proyecto de tesis, así mismo, quiero darle las gracias a los muchachos de los departamentos de Tribología, Acero y Aluminio, por haber hecho mi estancia en Venezuela muy agradable, en especial a Erwin y Kathy.

A mis compañeros en este proyecto Luis y Eduardo, por que juntos aprendimos mucho y aportamos un tanto más, en verdad gracias amigos y si valieron la pena todas las cortadas que nos hicimos y todos los esquimales que nos comimos.

A todos los profesores y compañeros del DIMAT.

A mis amigos que entraron junto conmigo a la maestría, mi ahijado Chava, Adela y Álvaro, por todos los momentos de diversión que pasamos juntos.

A todo el "Wear Team", Julián, Eduardo ("men", te debo la ecuación del flujo de arena), y Efrén (el abrasivo, sucio, etc, etc), por toda su ayuda cuando empezaba mis estudios, y por ayudarme con algunos de los experimentos, mil gracias.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo brindado para realizar para este estudio y por todo lo que me ha dado mientras he estado en ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el GRAN apoyo para realizar este estudio.

Y finalmente a todos aquellos que haya olvidado mencionar, pero que han estado conmigo de una u otra forma, los llevo en mi corazón.

PROLOGO

El avance de la civilización es la gran sumatoria de los pequeños esfuerzos que se dan en tan variados ambientes como son nuestras propias casas, el taller, la escuela, las empresas, los gobiernos, etc. Cada esfuerzo es un pequeño componente para el beneficio de todos y cuando estos esfuerzos son el resultado de un trabajo conjunto, de una vinculación entre empresa y universidad, no hay duda del gran beneficio que pudieran tener. Al leer el presente trabajo, el lector notará, desde los primeros capítulos, lo importante y beneficioso que puede resultar una buena vinculación.

La época actual que vivimos, marcada por una fuerte tendencia a la globalización, soportada por un impresionante desarrollo en las vías de comunicación electrónicas, es importante remarcar que la riqueza de una país ya no puede ser solamente medida en términos del potencial de sus recursos naturales y materias primas. La riqueza actual de los países es el resultado del avance de sus pobladores, de su avance social, cultural, económico, moral y tecnológico. El resultado de años de estudio y de trabajo. El presente trabajo ofrece un sustancial aporte al mejor entendimiento de uno de los procesos industriales más importantes que caracterizan a nuestro desarrollo tecnológico, la fabricación del acero.

El acero es sin duda el material que más aplicación tiene en la vida del hombre, no hay objeto alguno en el mundo que no esté relacionado directa o indirectamente a esta aleación y por consiguiente sus aplicaciones crecen día a día. Aunque de igual manera lo hace la competencia de otros materiales. Por esta situación, los procesos de fabricación y transformación del acero, están obligados a ser lo más eficiente posible, orientados a tener una perfecta armonía en materia energética y ambiental, factores que en nuestros días hacen que un determinado proceso o producto sea competitivo en el mercado.

Actualmente la creciente tendencia en materia de optimización de los procesos, tanto de fabricación como procesamiento del acero, ha sido apoyada fuertemente con los avances computacionales basados en el desarrollo de modelos matemáticos cada vez más reales, todo esto con la finalidad de crear un lazo fuerte que una el proceso real y la modelación, para con esto mantener a los productos del acero dentro de un marco económico competitivo que sirva para el desarrollo de cada nación.

Este trabajo forma parte de una serie de investigaciones realizadas acerca del la modelación matemática y solución numérica del proceso de laminación en frío de acero el cual, contempla el análisis de aspectos microestructurales y superficiales de la cinta de acero proveniente del proceso de laminación en caliente y que posteriormente se lamina en frío, para obtener un producto de calidad, con inmejorables propiedades y aplicaciones variadas.

Se hace una concisa revisión bibliográfica, de las más recientes investigaciones realizadas, en materia de análisis de superficies y lubricación de la cinta de acero laminada en frío, así como también se otorga una descripción básica de los procesos de laminación y su lubricación, además de tratar el tema de análisis de superficie de materiales, todo esto es el marco teórico que respalda el trabajo de investigación que tiene como objetivo primordial cuantificar la rugosidad superficial de la cinta de acero laminada en frío mediante el empleo de técnicas de microscopía de fuerza atómica y perfilometría óptica por interferometría de luz blanca con la finalidad de relacionar el parámetro de rugosidad superficial de la cinta de acero, con respecto a variables operacionales del proceso, a lo largo del mismo, además de caracterizar la microestructura de aceros de bajo carbono, utilizando técnicas de metalografía cuantitativa. Este trabajo aporta la determinación del tamaño de grano promedio de los aceros, una de las variables de la cual depende el desarrollo de ecuaciones constitutivas que fundamenten el modelo matemático del proceso de laminación en frío. Ambos aspectos, microestructural y superficial, serán tomados en cuenta como variables fundamentales en dicho modelo.

Ricardo Viramontes Brown
San Nicolás de los Garza, N.L
Junio del 2003

INDICE

Dedicatoria	xi
Agradecimientos	xii
Prólogo	xiii
Capítulo 1	
INTRODUCCION.	1
Referencias Bibliográficas.	3
Capítulo 2	
LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS.	4
2.1 Historia de la laminación.	4
2.2 Formado mecánico de metales.	6
2.3 Aspectos generales de plasticidad.	8
2.3.1 Compresión plana.	8
2.4 Molinos de laminación.	11
2.4.1 Clasificación de los molinos de laminación.	11
2.5 Análisis de fuerzas en la laminación.	12
2.6 Fricción en los procesos de laminación.	14
2.7 Laminación en caliente de acero.	15
2.8 Laminación en frío de acero.	16
2.8.1 Teorías de la laminación.	17
2.8.1.1 Teoría de Von Karman.	17
2.8.1.2 Teoría de Bland y Ford.	19
2.9 Lubricación en el proceso de laminación en frío.	19
2.9.1 Importancia de la lubricación en la laminación en frío.	20
2.9.2 Mecanismos de lubricación.	20
2.9.2.1 Lubricación de frontera.	20
2.9.2.2 Lubricación hidrodinámica.	21
2.9.2.3 Lubricación de película sólida.	22
2.9.3 Efecto de la lubricación sobre el coeficiente de fricción en la laminación en frío.	22
Referencias Bibliográficas.	24

Capítulo 3

ANALISIS DE SUPERFICIES.	26
3.1 Naturaleza de las superficies.	26
3.2 Características de las superficies.	27
3.2.1 Rugosidad.	28
3.2.2 Ondulación.	28
3.2.3 Error de forma.	28
3.4 Técnicas de análisis de superficie.	29
3.4.1 Perfilómetro de aguja.	30
3.4.2 Interferometría óptica.	31
3.4.3 Microscopía de fuerza atómica.	32
3.5 Características de la rugosidad de superficie.	35
3.5.1 El valor Ra.	35
3.5.2 El valor Rms.	36
3.6 Análisis de parámetros de rugosidad en aceros laminados en frío.	36
3.6.1 Efecto de la rugosidad de la pieza de trabajo durante la laminación en frío.	37
3.6.2 Efecto de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza de trabajo.	37
3.6.3 Efecto de la microestructura de aceros sobre la rugosidad de la superficie.	38
3.7 Efecto de las condiciones de operación y lubricación sobre la superficie en la laminación en frío.	38
Referencias Bibliográficas.	42

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	44
4.1 Trabajo de campo.	44
4.1.2 Características operacionales de fabricación de los molinos.	46
4.1.3 Corte de las muestras.	47
4.1.4 Obtención de los parámetros de operación durante el proceso de laminación.	47
4.2 Caracterización microestructural.	47
4.2.1 Análisis químico.	48
4.2.2 Análisis metalográfico.	48

4.2.3 Determinación del tamaño de grano.	50
4.3 Ensayo de microdureza Vickers.	52
4.4 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de microscopía de fuerza atómica.	54
4.5 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de perfilometría óptica.	56
4.6 Influencia del proceso de decapado sobre las superficies de los aceros.	58
Referencias Bibliográficas.	59
Capítulo 5	
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION	60
5.1 Análisis químico.	60
5.2 Análisis metalográfico.	60
5.2.1 Evolución de la microestructura durante el laminado en frío.	63
5.3 Tamaño de grano.	64
5.4 Resultados obtenidos de los ensayos de microdureza Vickers.	66
5.5 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por MFA con respecto a algunas variables del proceso.	68
5.5.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor.	70
5.5.2 Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerza de laminación.	72
5.5.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación.	75
5.6 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por Perfilometría Óptica con respecto a algunas variables del proceso.	70
5.6.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor.	81
5.6.2 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la fuerza de laminación.	83
5.6.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación.	86
5.7 Efecto del decapado de acero laminado en caliente, sobre la rugosidad superficial de la cinta de acero.	88
Referencias Bibliográficas.	92

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	93
6.1 Conclusiones.	93
6.2 Recomendaciones.	95
Anexo 1.	96
Anexo 2.	102
Anexo 3.	106
Listado de tablas	111
Listado de figuras	112
Resumen autobiográfico.	116

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La superficie de los materiales es la porción que está en contacto con el medio al cual se encuentran expuestos y las interacciones entre ellos son, por mucho, responsables del comportamiento de los materiales. La morfología de la superficie puede estar relacionada entre otros factores, a la microestructura, comportamiento mecánico, procesamiento y deformaciones al cual se ven sometidos los materiales.

Existen varios métodos para efectuar mediciones relacionadas con la rugosidad de la superficie de los materiales. Algunos usan microscopía electrónica, otros más principios ópticos, mientras que otros utilizan técnicas basadas en el contacto de algún dispositivo sobre la superficie a analizar y pueden ser de naturaleza térmica o eléctrica. La más alta resolución en el análisis de superficies se alcanza por técnicas de microscopía de tunelamiento o microscopía de fuerza atómica [1].

El proceso de laminación de acero se lleva a cabo por el contacto entre la pieza que se somete a deformación mecánica y los rodillos de trabajo. Debido a esta acción se desarrolla una fuerza de fricción que es definida como la fuerza tangencial común a los dos cuerpos en contacto cuando uno de ellos es sometido a la acción de una fuerza externa [2].

La rugosidad de la superficie de cinta de acero laminado en frío depende del modo de deformación, así como también si la cinta está en contacto con la herramienta de trabajo (rodillo de laminación), lo cual no se desea en el proceso, la función de los lubricantes empleados en la laminación es la de

prevenir el contacto directo meta-metal, pero transmitiendo la presión ejercida por la herramienta de trabajo hacia la cinta de acero para deformarla plásticamente. La rugosidad de la superficie entonces permite el atrapado mecánico del lubricante y, por lo tanto tiene influencia en el coeficiente de fricción desarrollado en el proceso de laminado [2,3,].

Durante la laminación de acero, la rugosidad de la lámina cambia en cada paso del proceso, debido a esto, la morfología de su superficie tiende a ser desordenada y una tanto caótica, por lo tanto, técnicas de caracterización de la topografía del acero empleando geometría de fractales han sido utilizadas para cuantificar las superficies [4].

El objetivo de este trabajo es el de cuantificar la rugosidad superficial de aceros laminados en frío, así como la caracterización microestructural de los mismos con la finalidad de relacionar estos parámetros con las condiciones operacionales de la laminación, con esto se pretende iniciar un trabajo que pueda llegar a establecer una relación entre la evolución de la rugosidad de la cinta de acero laminado en frío y el coeficiente de fricción que se presenta en este proceso mecánico.

Referencias

[1] Hutchings, I.M. ,”Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials”, Edward Arnold, Londres U.K.1992.

[2] Ginzburg,V.,Ballas,R,”Fundamentals of Flat Rolling”, Manufacturing Engineering and Materials Processing, Mercel Dekeer 2000, Nva. York.

[3] Pei,T.,William,R., “Entrainment of Lubricant in the Cold Rolling of Steel and Aluminum” International Conference on Steel Rolling Sept 1980.

[4] Hongchao, X., Darong, C., Xianmei K. “Characterization on Three-Dimensional Surface Topography of Cold Rolled Strip, National Tribology Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China.

CAPITULO 2

LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS

2.1 Historia de la laminación

Es muy difícil conocer con exactitud cuando fue realmente el inicio del proceso de laminación de productos planos y más aún lo es el hecho de saber quien o quienes comenzaron con el desarrollo de este proceso, más sin embargo indudablemente se sabe que al principio de su desarrollo, este proceso estuvo limitado al procesamiento de metales no ferrosos a temperatura ambiente como el plomo. Se tiene conocimiento de que fue mejorado a través del tiempo por artesanos que trabajaban el oro y piedras preciosas con fines ornamentales.

Durante el siglo XIV pequeños rodillos impulsados manualmente se utilizaron para procesar oro, plata y quizá plomo. Leonardo Da Vinci en el año de 1480 realizó el bosquejo de lo que él concebía como dos molinos de laminación, (Figs. 2.1 y 2.2) uno para procesar plomo y obtener hojas no muy delgadas y el otro para obtener barras. Estos son los planos de los cuales se tiene evidencia como las primeras ideas de laminación que existieron aunque no se conoce si realmente se hayan llegado a construir [1].

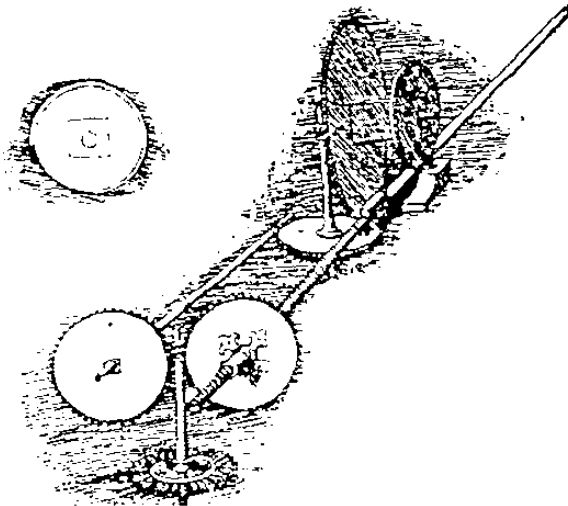


Fig. 2.1 Diagrama de Leonardo da Vinci de una máquina para formar plomo con fines ornamentales [1].

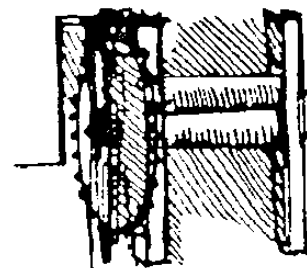


Fig. 2.2 Diagrama de un molino laminador por Leonardo da Vinci [1].

Se sabe además que hacia el final del siglo XVI existían ya por lo menos un par de instalaciones diseñadas y construidas incorporando ideas generales de la laminación. Se sabe también que un francés de apellido Brullier, en el año de 1553 produjo láminas de oro y plata que serían destinadas a acuñar monedas, también se tiene conocimiento de la acuñación de monedas, a partir de láminas de metales nobles en las cortes del Papa en 1581.

Durante el mismo período, se incrementó el uso del plomo en los techos y desagües de catedrales. Salomón de Caus fue un francés que en el año de 1615 construyó un molino manual para la fabricación de lámina de plomo (Fig. 2.3) que sería empleada en la construcción de órganos musicales [1].

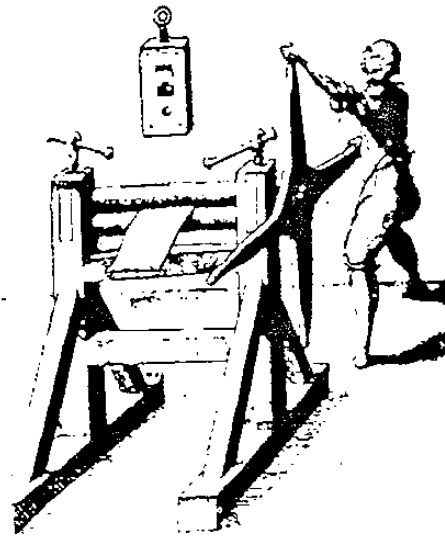


Fig.2.3 Molino construido por Salomón de Caus para laminar plomo [1].

La práctica moderna de la laminación de productos planos data del año de 1783 cuando una patente fue adjudicada a Henry Cort de la compañía Fonteley Iron Mills en Inglaterra. Esta compañía utilizaba rodillos matizados para laminar barras de hierro, tal vez Cort no fue el primero en emplear rodillos matizados para la

fabricación de láminas de hierro, pero sí fue la primera persona que logró acoplar todos los conocimientos de varios de los procesos de aceración y de formado de metales que eran conocidos en aquel tiempo [1].

El proceso de laminación de productos planos ha sido enriquecido día con día, desde su inicio en los talleres de fabricación de joyerías, hasta en la actualidad en las grandes instalaciones siderúrgicas. Existen grandes avances tecnológicos en materia de tecnología de procesos de laminación (tanto en la laminación en caliente como en la laminación en frío), que sin duda estos procesos tienden a ser más eficientes y precisos, siendo esto debido a que la tendencia de los productos obtenidos por los procesos de laminación está encaminada a obtener productos con excelentes acabados superficiales y tolerancias dimensionales, lo cual se ha ido mejorando paulatinamente a través del paso del tiempo y con la adquisición de nuevos conocimientos.

2.2 Formado mecánico de metales

La habilidad de ser deformado plásticamente, es una propiedad de suma importancia para un metal de uso general en ingeniería. No sólo lo hace capaz ser tenaz y resistente en servicio, sino que también lo hace capaz de ser formado en el estado sólido a través de varios procesos de trabajado [2].

Se puede decir que el formado mecánico de un cuerpo se logra cuando éste se somete a la acción intencional de fuerzas externas de una magnitud necesaria para modificar la forma externa de la pieza.

Dos razones son las que hacen al formado mecánico de los metales materia de suma importancia:

- 1) El trabajado mecánico de los metales permite obtener formas que no pueden ser desarrolladas por otros medios o procesos, ya que resultaría costoso o ineficiente.

2) El trabajado mecánico permite obtener mejores propiedades mecánicas en metales y aleaciones (endurecimiento por deformación por ejemplo).

Cientos de procesos han sido desarrollados para aplicaciones específicas de trabajado de metales, de cualquier manera, estos procesos pueden ser reducidos a unas cuantas categorías dependiendo de la manera en que se aplican las fuerzas a la pieza de trabajo. Así la clasificación sería [2,3]:

- a) Procesos de compresión directa.
- b) Procesos de compresión indirecta.
- c) Procesos a tensión.
- d) Procesos a corte.

Este trabajo se enfoca al estudio los procesos de compresión directa. Dentro de estos procesos se encuentra al proceso de laminación y al proceso de forja (Figs. 2.4 y 2.5), siendo el primero de los mencionados el objeto primordial de estudio en este trabajo y que será explicado mas a detalle en secciones posteriores, pero de manera general se puede definir al proceso de laminación como *“El proceso que consiste hacer pasar un metal en medio de dos rodillos con la finalidad de obtener reducción en su espesor”*. En este proceso la pieza de trabajo está sometida a grandes esfuerzos de compresión debido a la acción de los rodillos de trabajo del molino de laminación, por lo tanto el modo de deformación al que está sometido el material, es el de compresión plana, este modo de deformación se tratará en la siguiente sección.

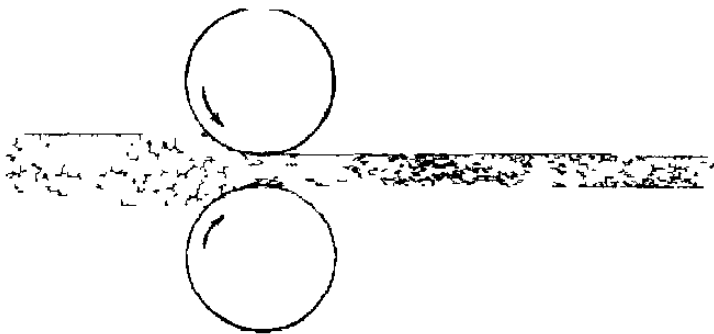


Fig.2.4 El proceso de laminación [2].

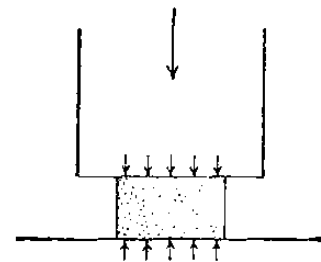


Fig.2.5 El proceso de forja [3].

2.3 Aspectos generales de plasticidad

2.3.1 Compresión plana

El modo de deformación predominante que se presenta en los procesos de laminación es el de deformación plana. En compresión plana, la mayor parte de reducción en altura que se logra en la pieza de trabajo se traduce en elongación en una dirección (dirección del frente de avance de la pieza de trabajo), por lo que el ensanchamiento en las direcciones laterales se considera despreciable.

Puede considerarse el caso de una sección rectangular de una pieza de trabajo, la cual posee altura "y" y longitud "l", (Fig. 2.6), y se toma un elemento de volumen de longitud infinitesimal "dx" y altura "y", el cual está sometido a una presión "p" aplicada sobre su superficie, de tal manera que la fuerza ejercida en el elemento es p dx.

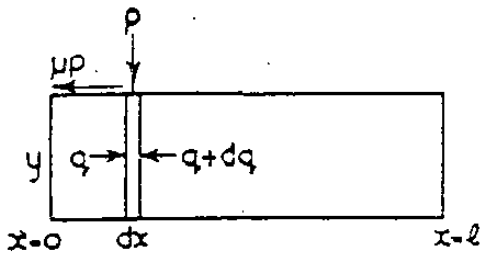


Fig.2.6 Esfuerzos de un elemento infinitesimal de volumen de una pieza en compresión plana [4].

En dicho caso la fuerza de fricción, f_k , producto del contacto entre las dos superficies con coeficiente de fricción μ es :

$$f_k = \mu p dx \quad (2.3.1)$$

La presión horizontal ejercida en el elemento es q , de uno de los lados del elemento en tanto que del otro es, $q+dq$, como se muestra en la Fig. 2.6,

Se hace un balance de fuerzas en la dirección x de tal manera que:

$$\Sigma F_x = 0 \quad (2.3.2)$$

la ecuación resultante sería:

$$2f_k = ydq \quad (2.3.3)$$

pero como:

$$f_k = \mu p dx \quad (2.3.4)$$

resulta que:

$$2\mu p dx = ydq \quad (2.3.5)$$

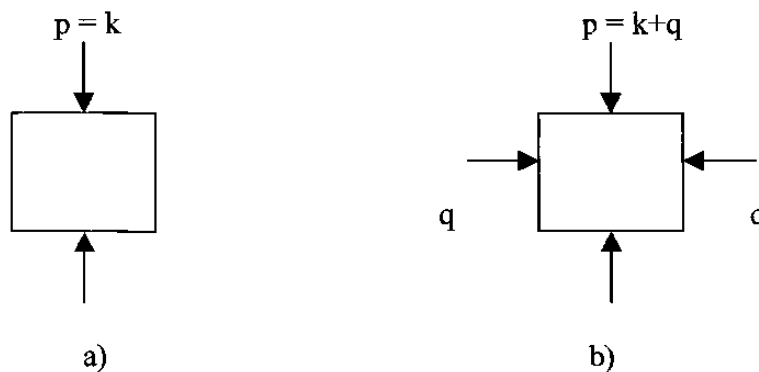


Fig. 2.7 Condición de plasticidad para el elemento en compresión plana [4].

La condición de plasticidad indica que la compresión de la pieza en la Fig. 2.7 a), necesita una fuerza vertical igual a k para poder comprimirla en el modo de deformación plana, además si una fuerza vertical q se aplica en la Fig. 2.7 b), la fuerza total de compresión estaría expresada por:

$$p = q + k \quad (2.3.6)$$

donde :

$$q = p - k \quad (2.3.7)$$

sustituyendo en la ecuación 2.3.5 y arreglando términos se llega a:

$$\frac{dp}{p} = \frac{2\mu dx}{y} \quad (2.3.8)$$

integrando 2.3.3 se tiene que :

$$\ln p = \frac{2\mu x}{y} + C \quad (2.3.9)$$

resolviendo para p:

$$p = ke^{\frac{2\mu x}{y}} \quad (2.3.10)$$

Como condición de frontera se tiene que $p = k$, en el borde la pieza.

Si se grafica p vs. x desde uno de los bordes de la pieza, en la Fig.2.8, por razones de simetría se alcanza un máximo a la mitad de la longitud y el valor de la presión ejercida está dado por [4]:

$$p = ke^{\frac{2\mu(1-x)}{y}} \quad (2.3.11)$$

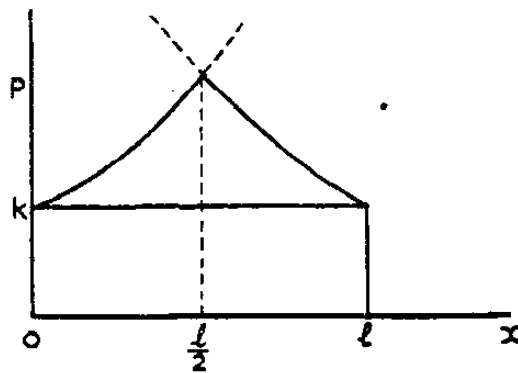


Fig. 2.8 Colina de fricción [4].

De la figura anterior se puede apreciar que la distribución de presión, tiene la forma de una colina desde una base de altura k , la cual representaría una distribución de presión uniforme para una compresión sin fricción. El área por debajo de esta curva representa la contribución que ejerce la fricción, a la presión vertical y, debido a este efecto, es conocida como colina de fricción [4].

2.4 Molinos de laminación

El trabajo efectuado contra la pieza de trabajo durante el proceso de laminación en frío es efectuado en una instalación llamada molino de laminación. Un molino de laminación es una estructura mecánica compuesta básicamente de los rodillos de laminación, rodamientos, así como un sistema de transmisión mediante el cual la potencia de una motor se lleva hacia los rodillos de trabajo para realizar el trabajo sobre la pieza a deformar, las fuerzas en los molinos de laminación son del orden de Mega Newton (MN).

2.4.1 Clasificación de los molinos de laminación

Los molinos de laminación se clasifican de acuerdo a la distribución física de los rodillos que contienen. Los arreglos más comunes son:

- a) Arreglo dos en alto Fig. 2.9 a.
- b) Arreglo tres en alto Fig. 2.9 b.
- c) Arreglo cuatro en alto Fig. 2.9c.
- d) Molino tipo Sendzimir Fig. 2.9 d.

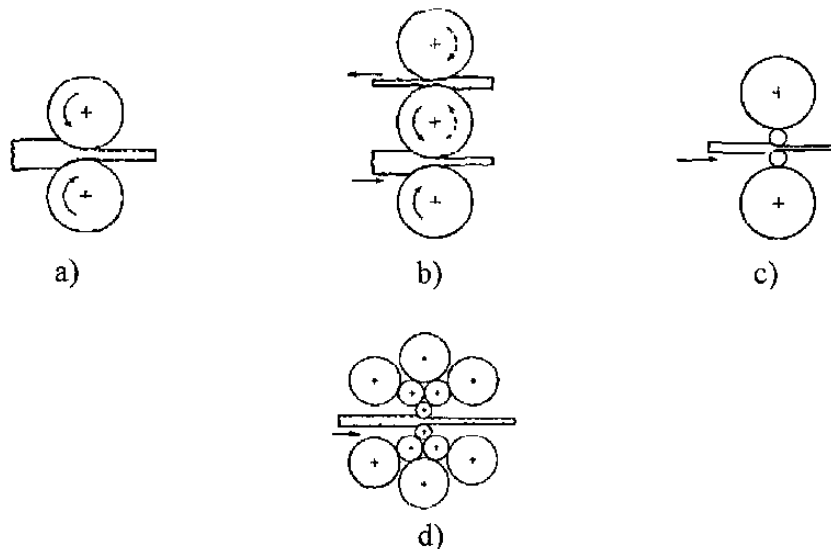


Fig.2.9 Arreglos Típicos de Molinos de Laminación[3].

Los tres primeros arreglos mencionados con anterioridad son muy comunes, el trabajo que éstos efectúan se puede realizar casi sobre cualquier material metálico, mientras que el molino tipo Sendzimir es utilizado en aleaciones de alta resistencia, así como para la producción de hoja metálica delgada.

2.5 Análisis de fuerzas en la laminación

Las fuerzas presentes durante la laminación en frío son del tipo de fuerzas que están presentes en el modo de deformación por compresión plana [5]. Se puede considerar el arreglo de la Fig. 2.10, donde una porción de metal, entra hacia los rodillos de laminación con una velocidad inicial V_0 .

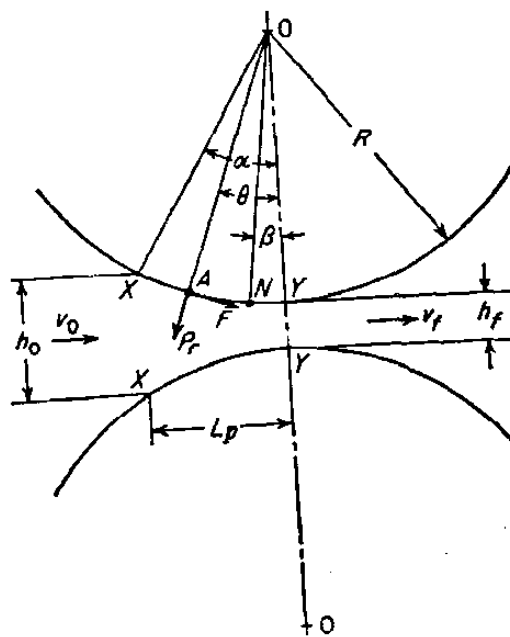


Fig. 2.10 Fuerzas durante la laminación [2,3,5].

Debido a la acción de los rodillos sobre la pieza de trabajo, se ejerce sobre esta última una fuerza compresiva que se denomina P_r , esto es en todo los puntos del arco de contacto entre la lámina y los rodillos, tal como se muestra en el punto a de la Fig. 2.10. El punto N se denomina punto neutro y en este punto se tiene la característica de que la velocidad a la que giran los rodillos y la velocidad con la que se mueve la lámina, es la misma.

Además de la fuerza P_r , se tiene la componente tangencial de la fuerza de fricción F , desarrollada debido al contacto de las dos superficies y actuando en la dirección que se muestra en la Fig. 2.10.

Por relaciones geométricas se encuentra que la longitud del arco de contacto L_p es:

$$L_p = [R(h_o - h_f)]^{1/2} \quad (2.5.1)$$

donde h_o y h_f representan la altura de la lámina a la entrada y salida los rodillos. Ahora bien si se divide la presión ejercida P_r entre el producto del ancho de la lámina b y la longitud del arco de contacto L_p se obtiene la presión específica del rodillo p definida como:

$$p = \frac{P_r}{bL_p} \quad (2.5.2)$$

En la ecuación anterior b representa el ancho de la lámina. La presión específica p en la ecuación 2.5.2 representa la presión a lo ancho de toda la lámina.

El ángulo α , ángulo de contacto o ángulo de la mordida, está comprendido entre el plano X-X, que es el plano de entrada de la pieza y el plano de salida Y-Y.

2.6 Fricción en los procesos de laminación

Si se analizan las componentes de la fuerza compresiva P_r y la fuerza de fricción F a partir de la Fig. 2.11.

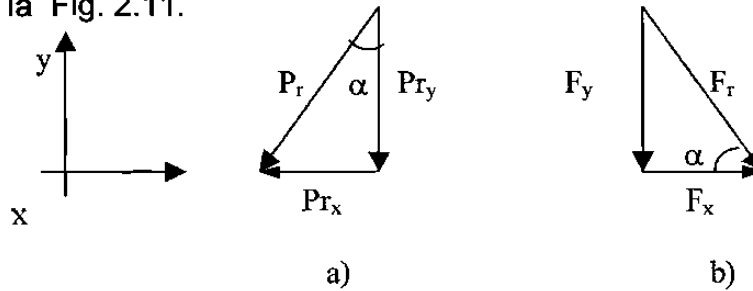


Fig. 2.11 Representación de fuerzas en la laminación.

Si se hace el balance de fuerzas en la dirección del eje x resulta que :

$$P_{r_x} = F_{r_x} \quad (2.6.1)$$

$$F \cos \alpha = P_r \operatorname{sen} \alpha \quad (2.6.2)$$

pero :

$$F = \mu P_r \quad (2.6.3)$$

por lo tanto:

$$\mu = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad (2.6.4)$$

$$\mu = \tan \alpha \quad (2.6.5)$$

Esta última ecuación expresa que la pieza de trabajo no entrará a ser laminada a menos de que el valor $\tan \alpha$ exceda el valor del coeficiente de fricción μ . El valor

del coeficiente de fricción μ depende de varios factores al momento de que se realiza el trabajo de reducción sobre la pieza, dentro de estos factores destacan :

- a) lubricación en el proceso,
- b) condiciones de geometría del proceso: diámetro de los rodillos, espesores de entrada de las piezas de trabajo, etc.
- c) condiciones de operación en el proceso como pueden ser: temperaturas, velocidades de laminación.
- d) características superficiales de las piezas de trabajo.

2.7 Laminación en caliente de acero

El proceso de laminación en caliente de acero es un proceso de formado mecánico mediante el cual se puede transformar directamente un lingote o planchón de este material en formas más delgadas como pueden ser barras, cinta, hojas, con la finalidad de poder dar un proceso posterior y obtener formas más simples o especiales como pueden ser láminas, productos no planos, etc.

En este proceso un lingote o un planchón de acero se calienta en hornos hasta una temperatura que es aproximadamente $0.6T_m$ (siendo T_m la temperatura absoluta de fusión del acero) y posteriormente se somete a velocidades de deformación que pueden alcanzar valores cercanos a $500s^{-1}$.

Debido a las condiciones de temperatura y rapidez de deformación el proceso se lleva a cabo de tal manera que el fenómeno de recristalización se realiza simultáneamente con la deformación [3].

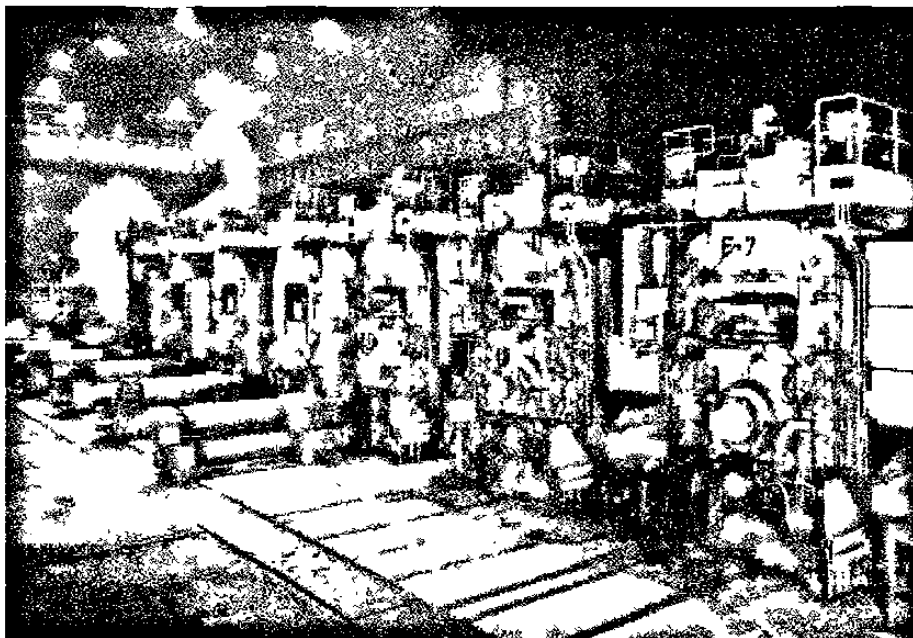


Fig.2.12 Proceso de laminación en caliente de acero. (Cortesía, Universidad de Sheffield, Inglaterra)

2.8 Laminación en frío de acero

Este proceso es utilizado para obtener productos con una mejor calidad superficial y excelentes tolerancias dimensionales en comparación con proceso de laminación en caliente. El proceso se lleva a cabo a temperaturas en las cuales el proceso de recristalización no se realiza (temperaturas no tan elevadas), de ahí proviene el término laminación en frío [2,3,6].

El objetivo del proceso de laminación en frío es la de obtener una cinta de acero de espesor determinado y con propiedades mecánicas deseadas. El proceso básicamente consiste en la reducción en espesor de material laminado en caliente y que antes de entrar al molino frío, pasa por una línea de decapado con ácido clorhídrico con la finalidad de eliminar la capa de óxido superficial resultado del trabajo en caliente.

La distribución de porcentajes de reducción se realiza en etapas comúnmente llamadas pasos de laminación, estas etapas están determinadas en función del

grado de endurecimiento por deformación al que se ve sometido el material en la etapa o paso anterior. En la actualidad es posible reducir material hasta cantidades superiores al 90 %, sucediendo esto durante los últimos pasos.

Es de hacer notar que las más grandes reducciones en el proceso de laminación en frío de acero se obtienen cuando se disminuye el diámetro de los rodillos de trabajo, aunque con esta acción se incrementen los esfuerzos de contacto entre rodillos, lo que traería como posible consecuencia un aumento en la velocidad de desgaste de éstos.

2.8.1 Teorías de la laminación

Son varias las teorías que se han propuesto para el análisis del proceso de laminación, todas con la finalidad de expesar el trabajo en frío ejercido en la pieza de trabajo, en función de la geometría del proceso, las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo y las condiciones de operación del proceso. A continuación se analizarán algunas de estas teorías.

2.8.1.1 Teoría de Von Karman

Von Karman analizó el elemento diferencial de la Fig. 2.13 del proceso de laminación tomado de la Fig. 2.10 bajo las siguientes condiciones [3,4]:

- a) Se considera el arco de contacto circular.
- b) El coeficiente de fricción μ es constante en todo el arco de contacto.
- c) No hay ensanchamiento lateral de la pieza de trabajo.
- d) La velocidad periférica de los rodillos es constante.
- e) Se sigue el criterio de energía de distorsión para deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma' \quad (2.8.1.1)$$

σ_1 =Tensión principal máxima.

σ_3 =Tensión principal mínima.

σ' =Fluencia de deformación plana.

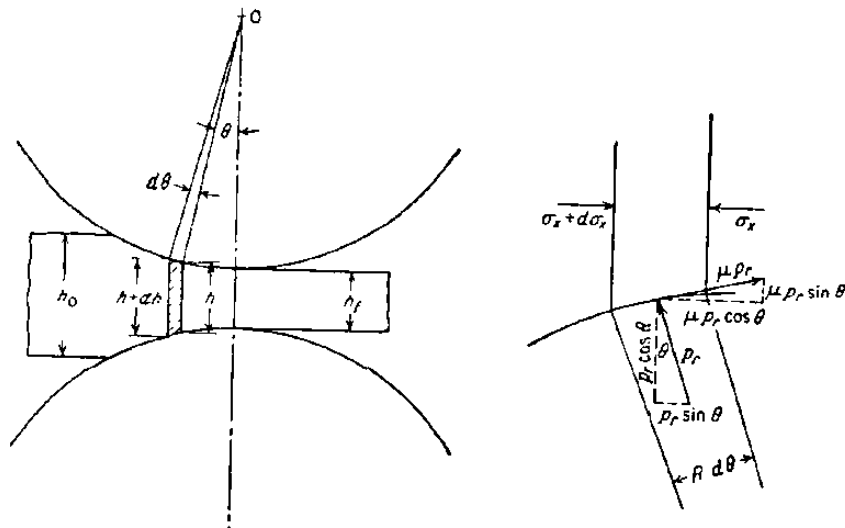


Fig. 2.13 Esfuerzos actuando en un elemento diferencial durante la laminación[3].

Efectuando el balance de fuerzas en el elemento diferencial se tiene que :

$$\sigma x + d\sigma x(h + dh) + 2\mu Pr R \cos\theta d\theta - \sigma x h - 2Pr \sin\theta d\theta = 0 \quad (2.8.1.2)$$

Simplificando:

$$\frac{d\sigma x h}{d\theta} = 2Pr R(\sin\theta \pm \mu \cos\theta) \quad (2.8.1.3)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Von-Karman, el signo \pm se debe al cambio de dirección de la fuerza de fricción en el punto neutro.

2.8.1.2 Teoría de Bland y Ford

La ecuación 2.8.1.2 propuesta por Von Karman ha sido simplificada por Bland y Ford, considerando que para un régimen bajo de fricción y para ángulos menores a 6° , el $\sin\theta = \theta$ y el $\cos\theta = 1$, resultando en:

$$\frac{d\sigma_h}{d\theta} = 2 P_r R'(\theta + \mu) \quad (2.8.1.4)$$

El término R' es el radio real deformado de curvatura del rodillo, ya que durante el proceso de laminación, el rodillo tiende a deformarse elásticamente, por lo tanto este término se ajusta en base a sus propiedades físicas como lo son el módulo de elasticidad E , la relación de Poisson ν y las características geométricas de la pieza de trabajo.

2.9 Lubricación en el proceso de laminación en frío

El coeficiente de fricción que se desarrolla en el proceso de laminación en frío no había podido ser determinado hasta el año de 1954. Hasta antes de este tiempo se suponía que la teoría del proceso de cálculo del coeficiente en base a la geometría del modelo era correcta y este coeficiente sería el parámetro requerido para tener concordancia entre la teoría y la experimentación.

Esta consideración (cálculo del coeficiente de manera teórica) se justifica, siempre y cuando las condiciones de trabajo del proceso permitan conocer el valor de los esfuerzos generados en el mismo, pero sería más ventajoso si se pudiera medir directamente el valor de la fuerza de fricción.

2.9.1 Importancia de la lubricación en la laminación en frío

La lubricación durante la laminación en frío es una de las características más importantes de este proceso, es decir los lubricantes empleados así como las características superficiales tanto del acero al ser laminado, como las de los rodillos de laminación son los responsables de que el coeficiente de fricción desarrollado tenga un determinado valor.

La función primordial de la lubricación durante la laminación en frío, es básicamente la de prevenir el contacto metal-metal. Ya que no es posible observar directamente el comportamiento del lubricante empleado entre los rodillos de laminación y la cinta de acero, este comportamiento ha sido estudiado a través de métodos basados en mediciones realizadas en la fuerza de laminación y donde el coeficiente de fricción se calcula en base a las ecuaciones de la teoría de laminación [7].

2.9.2 Mecanismos de lubricación

2.9.2.1 Lubricación de frontera

En este tipo de lubricación, la fricción entre superficies de contacto está determinada por las propiedades físicas de ambas. El mecanismo de lubricación de frontera involucra la formación de una capa delgada en la interface sólido-sólido, como resultado de la adhesión de moléculas de un líquido polar [6]. A altas temperaturas la capa se vuelve paulatinamente desordenada por lo cual la fricción se incrementa a partir de una temperatura crítica [6,7].

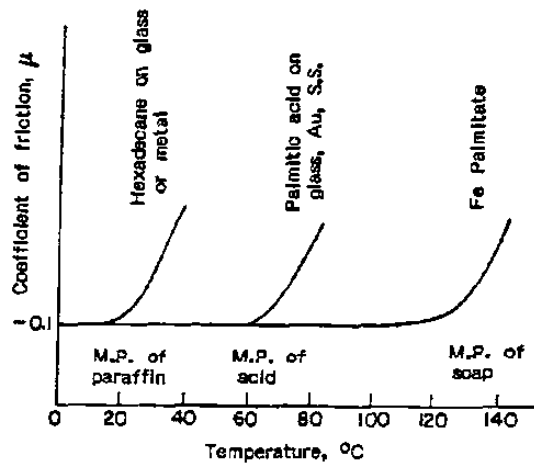


Fig.2.14 Temperaturas críticas en la lubricación de frontera[6].

2.9.2.2 Lubricación hidrodinámica

Este es el caso más simple de lubricación en donde se considera a una película que está en una interfase entre dos cuerpos y que es lo suficientemente delgada como para que la rugosidad de las superficies pueda ser ignorada[6,7].

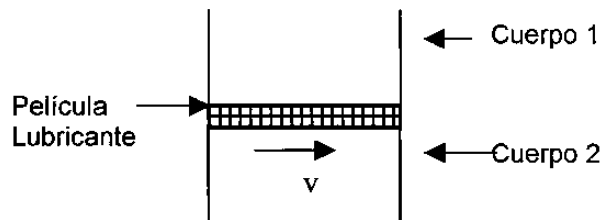


Fig. 2.15 Lubricación hidrodinámica [6].

En este tipo de lubricación el fluido lubricante evita que las dos superficies entren en contacto directo y éste se mueve con una velocidad v , como resultado del movimiento relativo existente entre las dos superficies. En la laminación en frío el

trabajo que se efectúa sobre la pieza de trabajo es transmitido a ella debido a la presión hidrostática desarrollada en el fluido lubricante.

2.9.2.3 Lubricación de película sólida.

Este tipo de lubricación (Fig.2.16) es empleado cuando se tienen superficies totalmente en contacto, en este caso se tiene la formación de una película sólida que protege a las dos superficies, en muchas ocasiones esta película puede ocasionar problemas posteriores a las superficies (corrosión, desgaste) pero en general, podemos clasificar a las capas sólidas como:

- a) Películas de óxido.
- b) Recubrimientos metálicos.
- c) Películas de material polimérico.

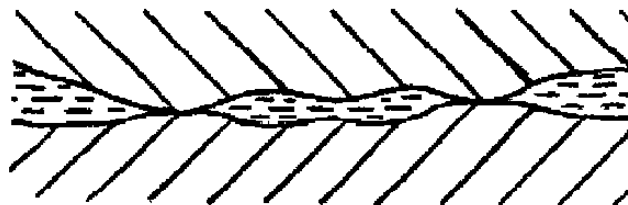


Fig.2.16 Lubricación de película sólida [6].

2.9.3 Efecto de la lubricación sobre el coeficiente de fricción en la laminación en frío

Estudios se han realizado con la finalidad de determinar la influencia del lubricante en el coeficiente de fricción en la laminación en frío [8], como se había mencionado con anterioridad. Bland durante los años 50, empleó un método

basado en relaciones geométricas del proceso y propuso que si el par desarrollado por los rodillos es conocido, junto con la fuerza de laminación, es posible calcular μ en base a la ecuación 2.9.3.1[8]:

$$\mu = \frac{T}{PR} \quad (2.9.3.1)$$

donde:

μ =coeficiente de fricción.

T =Par.

P =Fuerza de laminación.

R =Radio del rodillo.

Estos experimentos se llevaron a cabo empleando lubricantes tales como:

- a) Jabones.
- b) Sustancias ácidas.
- c) Hidrocarburos (parafina, aceites comerciales, lanolina)
- d) Agua.
- e) Aceites naturales (aceite de oliva, ricino).

Bland encontró que los ácidos y jabones disminuyen el coeficiente de fricción de una manera eficiente pero el acabado superficial del acero al final de la laminación era pobre, en cambio con los aceites naturales y la lanolina se obtuvieron los valores mas bajos de μ , pero con resultados desastrosos en el acabado superficial del material [8].

El coeficiente de fricción no sólo depende del tipo de lubricante, la rugosidad superficial es un factor que influye en la acción de retención del lubricante a lo largo del proceso, es por esto que el análisis de la superficie de los productos laminados antes, durante y al final del mismo es de suma importancia. El aspecto superficial en la laminación se discute con más detalle en el Capítulo 3.

Referencias Bibliográficas

- [1] William, R., "Cold Rolling of Steel", Manufacturing Engineering and Materials Processing /2, Marcel Dekker Inc 1978 Nva York.
- [2] Cotrell. A., "An Introduction to Metallurgy", Edward Arnold, 1967 Londres.
- [3] Dieter, G., "Mechanical Metallurgy", Materials Science and Metallurgy Mc Graw Hill
- [4] Hessenberg, W.C.F., "Pressure Distribution in Plane Compression", Research on the Rolling of Strip The British Iron and Steel Research Association, Londres 1958.
- [5] Colás, R., "Laminación de productos planos", Doctorado en Ingeniería de Materiales FIME-UANL, México, Noviembre de 1997.
- [6] Ginzburg, V., Ballas, R., "Fundamentals of Flat Rolling", Manufacturing Engineering and Materials Processing, Mercel Dekeer 2000, Nva York.
- [7] Azushima, A., Kihara, J., Miyagawa, M., "Determination of Lubrication Mechanism by means of Surface Qualification of Cold Rolled Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japon.

[8] Ford H., Witton P., "Surface Friction and Lubrication in Cold Strip Rolling",
Research on the Rolling of Strip The British Iron and Steel Research Association,
Londres 1958.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE SUPERFICIES.

3.1 Naturaleza de las superficies

Las propiedades de la superficie de los materiales ingenieriles dependen de muchos factores. Es por esta razón que el estudio de la superficie de los materiales es sumamente importante, ya que es la porción que está en contacto directo con el medio al cual está expuesta y en la mayoría de las ocasiones de ella depende el desarrollo de algún fenómeno físico o químico de un proceso.

Las características superficiales de los materiales están relacionadas entre otras cosas, a la microestructura del material y al modo por el cual fue procesado [1]. Es por eso que las condiciones de operación en los procesos de obtención y de trabajo de los materiales, constituyen variables de gran importancia para determinar algunas de estas características.

La Fig. 3.1 representa la evolución de la superficie de un metal que fue maquinado, en donde se muestran 4 capas que comprenden, desde el material original hasta la formación de capas como resultado de la exposición a un medio.

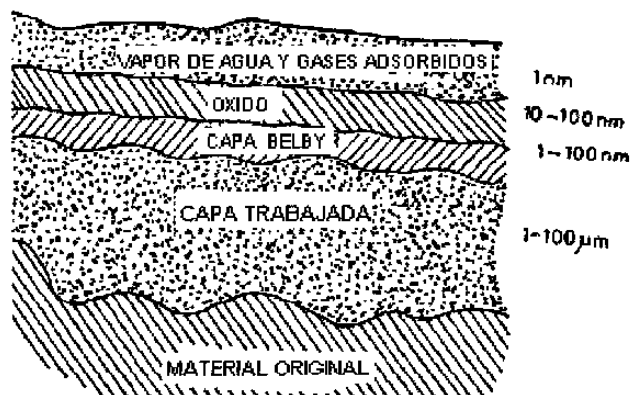
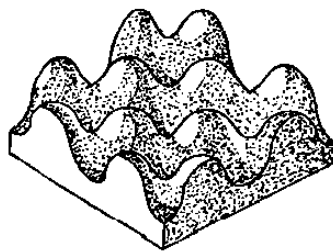


Fig. 3.1 Representación esquemática de la superficie de un metal [2].

El comportamiento mecánico de zonas que tiene diferentes tamaños de grano (en el caso de los metales) es distinto, debido a esto la textura de la superficie de un material contiene una serie de irregularidades con diferentes amplitudes y frecuencias de aparición [2].

3.2 Características de las superficies

La superficie de un material empleado para una tarea específica depende del proceso de formado, colado, moldeo, etc. Cuando un material se analiza en una escala lo suficientemente fina, es posible apreciar irregularidades de su superficie, las cuales a simple vista no podrían ser apreciadas, por ejemplo, la superficie de un metal, que ha sido pulido para obtener un acabado espejo, cuando se analiza por técnicas adecuadas, presentaría irregularidades superficiales que comúnmente son llamadas asperezas Fig. 3.2 [2,3].



3.2 Asperezas de una superficie supuestamente lisa [2,3].

Las características geométricas de la textura de la superficie de un material dependen fuertemente del proceso mediante el cual fue obtenido y, en general, la textura de un material está formada por tres componentes que son : rugosidad, ondulación y error de forma. Un perfil de superficie se considera como la suma de estas tres características [2].

3.2.1 Rugosidad

El término rugosidad de una superficie hace referencia a las irregularidades superficiales en pequeña escala y que por lo tanto no son apreciables a simple vista [2,3], la rugosidad es caracterizada por pequeños valles y crestas de una corta longitud de onda, y que varían en amplitud y desplazamiento en distancias mas grandes que las distancias de separación entre sus átomos Fig. 3.3

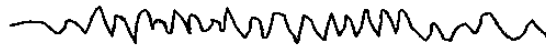


Fig.3.3 Rugosidad de una superficie

3.2.2 Ondulación

La ondulación de una superficie se considera como la irregularidad de las superficies que poseen un longitud de onda mucho mayor en comparación a la de las irregularidades que forman las rugosidad [2] Fig.3.4.



Fig.3.4 Ondulación de una superficie [2].

A menudo estas irregularidades surgen como resultado de operaciones como: tratamientos térmicos, vibraciones mecánicas y errores en los procesos de producción, por mencionar algunos.

3.2.3 Error de forma

El error de forma se considera como una desviación muy alejada de la forma original o esperada de una superficie [2] Fig.3.5.

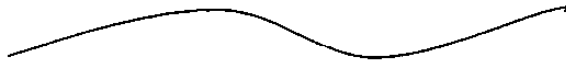


Fig.3.5 Error de forma de una superficie [2].

3.4 Técnicas de análisis de superficie

Son varias las técnicas que a través de los años se han desarrollado con la finalidad de determinar la representación gráfica de la superficie de los materiales en la ingeniería o su topografía. El significado de la palabra topografía, hace referencia a la manera de como se puede representar una superficie en la dimensión.

En sus inicios el análisis de una superficie se limitaba solamente al estudio de parámetros bidimensionales obtenidos mediante el análisis de perfiles, pero con el paso del tiempo, y gracias a los grandes avances en materia de la electrónica y la computación, fue posible obtener la representación tridimensional de una superficie. Una imagen en la que se mostraba las condiciones en las que se encontraba una articulación artrítica del cuerpo humano mediante la topografía de una superficie fue obtenida por Thomas y Sayles [4], durante la década de los setenta, en la Fig. 3.6 se muestra esta imagen.

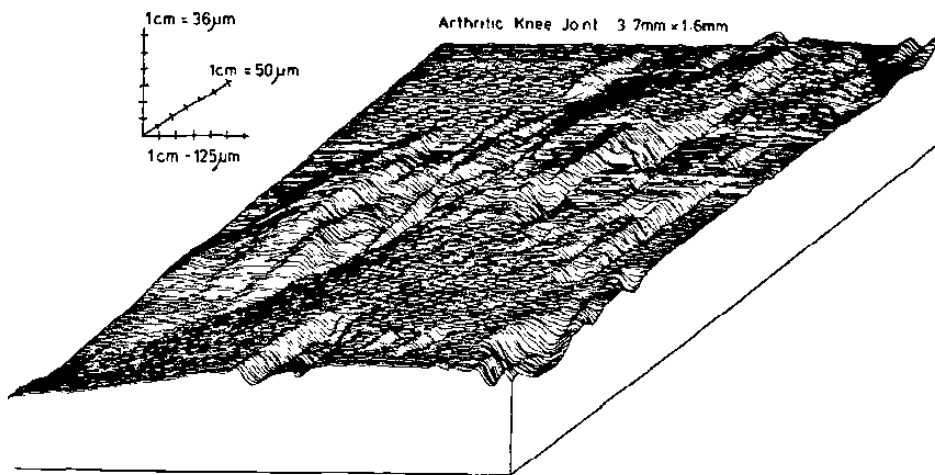


Fig.3.6 Representación topográfica de la superficie de una articulación humana artrítica [4].

3.4.1 Perfilómetro de aguja

El perfilómetro de aguja es uno de los métodos más comunes de medición de superficie [3], Fig.3.7. El principio de este instrumento se basa en el movimiento deslizante de una aguja sobre la superficie de análisis, los desplazamientos verticales de la aguja se convierten a una señal eléctrica mediante un transductor, y, al ser amplificada esta señal, se acciona el mecanismo mediante el cual se grafica el perfil seguido por la aguja. La gráfica obtenida representa el desplazamiento vertical de la aguja en función de la distancia que se recorre a través de la superficie[4].

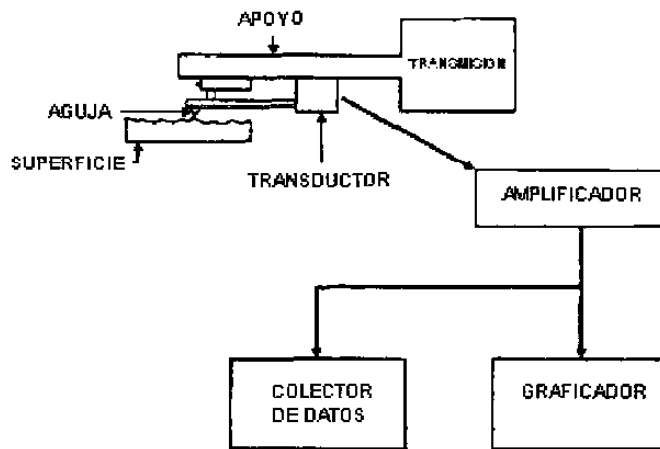


Fig.3.7 Perfilómetro de aguja [3].

Debido a que los desplazamientos en la dirección horizontal son mucho mayores que los que se tienen en la dirección vertical, la magnificación en esta última dirección debe ser mayor, esto con la finalidad de representar el perfil de una manera adecuada Fig.3.8.

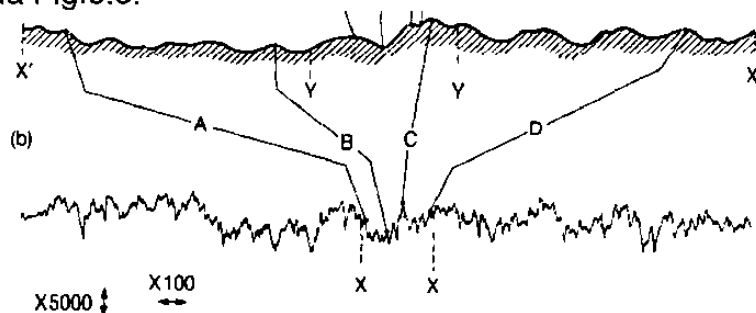


Fig.3.8 Perfil de una superficie analizada mediante un perfilómetro de aguja [3,5].

Una gran desventaja de este método de análisis puede ser el que la aguja ,debido a su forma y tamaño, no pueda penetrar algunas regiones en la superficie, lo que traería como consecuencia, la aparición de regiones de aspecto plano en el perfil.

3.4.2 Interferometría óptica

Este aparato (Fig.3.9) utiliza la técnica óptica basada en el principio de interferencia que existe entre dos haces de luz, los cuales inciden sobre la superficie de la muestra a analizar y que al ser reflejados por ésta crean un patrón de franjas, el cual es captado por un arreglo lineal de foto diodos enlazados a un microprocesador. Este arreglo se puede combinar con un arreglo perpendicular de foto diodos, para con esto obtener la variación en altura que tiene la superficie.[3]

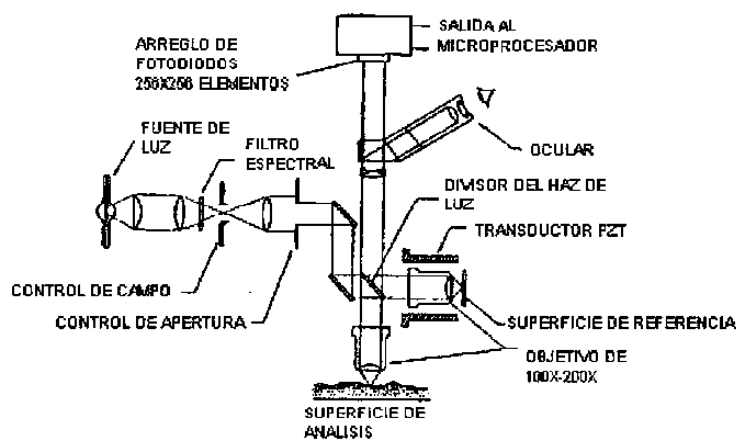


Fig.3.9 Diagrama esquemático de un interferómetro óptico [3].

Las intensidades de la luz requerida en la superficie son calculadas en base a la ecuación 3.4.2.1[5].

$$n\lambda = 2\mu t \cos \theta \quad (3.4.2.1)$$

donde :

n = constante de iluminación.

λ =longitud de onda del haz.

t = espesor entre la superficie recubierta con material conductor.

θ = ángulo del haz incidente con respecto a la normal.

3.4.3 Microscopía de fuerza atómica

El microscopio de fuerza atómica (MFA por su siglas en español) es un instrumento adecuado para analizar superficies de los materiales ingenieriles, no sólo se pueden analizar superficies con este instrumento, es posible además identificar fases presentes en materiales y otros constituyentes. En la actualidad su aplicación en diversas ciencias, crece día con día. El principio de funcionamiento se basa en las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los átomos de la materia, Fig. 3.10.

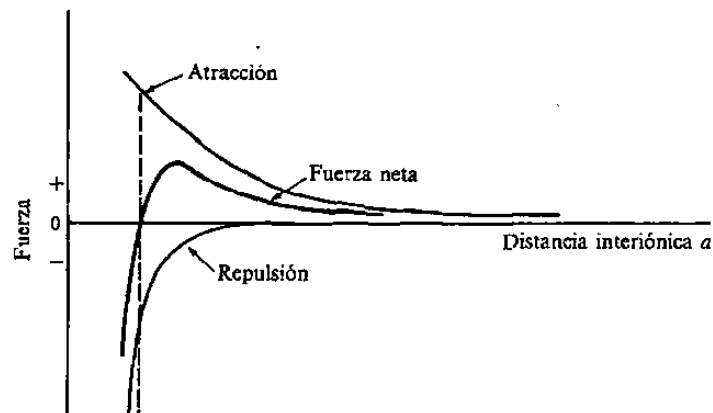


Fig.3.10 Separación entre átomos que corresponde al estado de equilibrio [9].

El instrumento cuenta con una punta la cual está fija a una barra cantiliver y que oscila sobre la superficie a estudiar. Conforme la punta toca la superficie del material, su posición se refleja y se capta por un arreglo de foto diodos mediante los cuales se mide la diferencia en señal y con esto el movimiento que sigue la punta.

El MFA cuenta básicamente con dos modos de funcionamiento el de contacto y el de no contacto. En el modo de contacto, como su nombre lo indica, la punta está en contacto cercano a la muestra a analizar. El recorrido de la punta sobre la superficie sigue un barrido en dos direcciones ortogonales (x,y) Por contacto se entiende que se está ubicado en el régimen repulsivo de la curva de fuerzas intermoleculares de la Fig. 3.10.

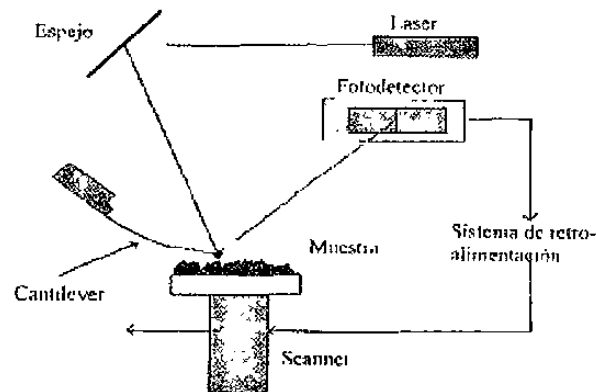


Fig.3.11 Principio de funcionamiento del MFA.

El modo de no contacto consiste en mantener a la punta y al cantilever oscilando a través de la superficie de la muestra a una distancia tal que la interacción entre los átomos y el haz no se encuentran en el régimen repulsivo de la curva de fuerzas intermoleculares. Este modo de operación es difícil de mantener en condiciones atmosféricas normales debido a que cualquier gota de agua o impureza del aire, puede afectar la medición o el barrido de la muestra.

El microscopio de fuerza atómica puede proporcionar una imagen en dos dimensiones, a partir de la cual (Fig.3.12) se pueden hacer mediciones y cálculos con la ayuda de paquetes computacionales, desarrollados con el fin de obtener parámetros que pueden ser rugosidades, volúmenes, áreas, profundidades, etc.

Es posible obtener también una imagen topográfica, que muestre la superficie de la muestra analizada, con esto es posible identificar un sin número de

características que en un momento dado, contiene un material de ingeniería Fig. 3.13.

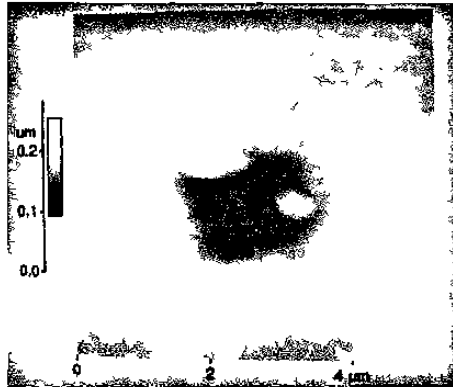
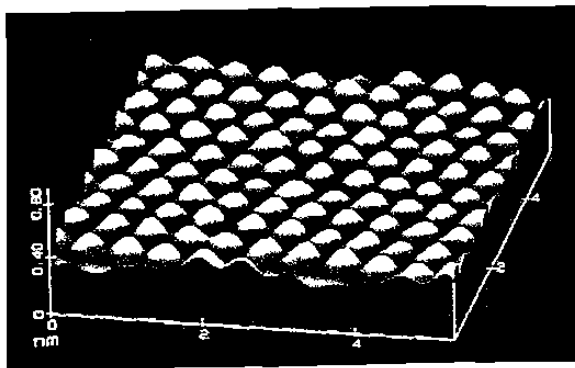
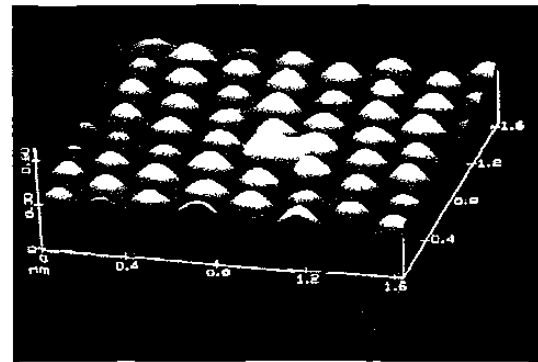


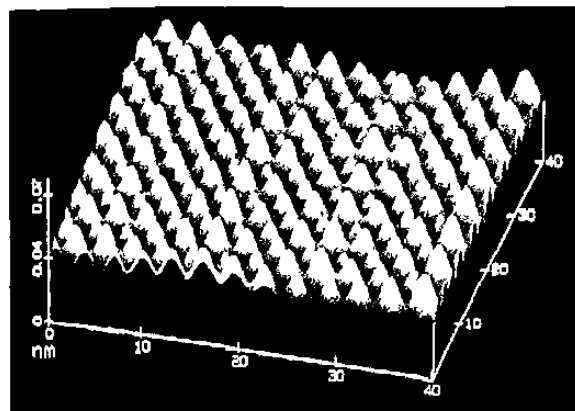
Fig.3.12 Imagen bi-dimensional obtenida por MFA que muestra precipitados formados en una aleación de aluminio [12].



a)



b)



c)

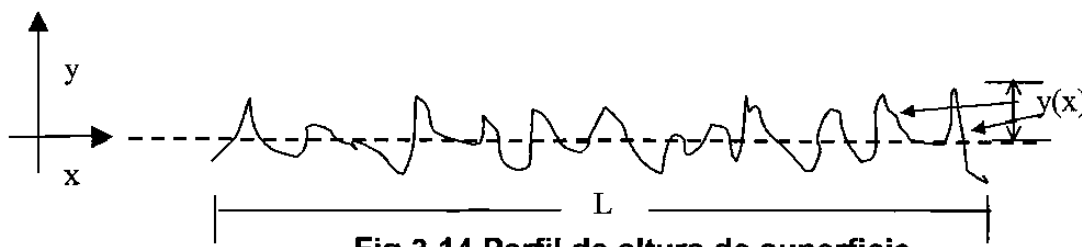
Fig.3.13 a) La superficie de una grano de sal de mesa
b) Irregularidad atómica en una superficie de grafito.
c) Topografía de una superficie de rodio la cual tiene átomos de oxígeno adsorbidos en ella [11].

3.5 Características de la rugosidad de superficie

Los parámetros que se emplean para la caracterización del perfil de rugosidad de una superficie, son variados entre ellos destacan el valor Ra y el valor Rms [3,6].

3.5.1 El valor Ra

Si se toma un perfil de longitud "L" como el de la Fig. 3.14, a través del cual pasa una línea media, que está trazada de tal manera que, tanto por encima como por debajo de ella, se tiene áreas iguales, esta línea es conocida como línea central promedio.



El valor Ra se define entonces como la desviación media aritmética de las alturas "y" de la superficie a lo largo de la línea media del perfil. Matemáticamente se expresa por la ecuación 3.5.1.1.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \quad (3.5.1.1)$$

3.5.2 El valor Rms

El valor de rugosidad Rms de un superficie se define como la raíz cuadrada de la desviación media y se representa por la ecuación 3.5.2.1 como :

$$Rms = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (3.5.2.1)$$

Este parámetro está ligado al valor de Ra, si se considera que la superficie sigue un comportamiento Gaussiano de distribución de alturas mediante la ecuación 3.5.2.2:

$$Rms = 1.25Ra \quad (3.5.2.2)$$

3.6 Análisis de parámetros de rugosidad en aceros laminados en frío

En el proceso de laminación en frío se tiene el paso de material proveniente de un molino caliente a través de rodillos de laminación con la finalidad de llevar el material hasta un espesor deseado además de imprimirle gran resistencia debido al proceso de endurecimiento por deformación. El acero antes de ser laminado en frío, pasa por una línea de decapado, en la cual se remueven los óxidos resultantes de la laminación en caliente, durante este proceso. Debido a la acción de remoción del óxido con ácido clorhídrico, es posible que la rugosidad de la superficie de la cinta de acero sea afectada. Se han realizado estudios con la finalidad de determinar el estado de la rugosidad de la cinta de acero antes de que sea laminada, así como al momento de que se efectúa trabajo sobre ella en laminación en frío.

La rugosidad de la superficie de un material, depende en gran parte del proceso de trabajo o transformación al que se somete.

3.6.1 Efecto de la rugosidad de la pieza de trabajo durante la laminación en frío

Como se había mencionado con anterioridad, la rugosidad de la pieza de trabajo cambia conforme se ejerce trabajo sobre ella. La función primordial de la rugosidad de la superficie de la lámina de acero, es la de permitir el atrapado mecánico del lubricante empleado para evitar el contacto directo rodillo-lámina [6]. Superficies de piezas de laminación en frío que permitan que el atrapado mecánico de lubricante se lleve formando capas paralelas a la dirección de deformación, son las que favorecen que el lubricante escape con relativa facilidad y que por lo tanto, se propicie el contacto rodillo-lámina, lo que trae como consecuencia un acabado no deseado en la superficie y un incremento en la rugosidad de la lámina de acero [6].

3.6.2 Efecto de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza de trabajo

Estudios [7,8] han sido realizados para observar la influencia de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza al ser laminada. Es de hacer notar, que en este trabajo se ha mencionado que mecanismos de lubricación son empleados o desarrollados para evitar el contacto metal-metal y que durante la laminación se presenta condiciones de lubricación idóneas que evitan este fenómeno.

Si estas condiciones no son favorables para asegurar la existencia de los mecanismos de lubricación, la cinta de acero al ser laminada entraría en contacto con la pieza de trabajo lo que traería como consecuencia el aumento en la fricción desarrollada en el proceso y aumento en la rugosidad de la cinta . Este efecto ha sido estudiado por Schey [6], encontrando que la rugosidad de los rodillos de laminación tiene efecto sobre la pieza de trabajo siempre y cuando se empleen lubricantes de baja viscosidad. Se encuentra, en estas condiciones que el

acabado superficial de los rodillos de laminación influye sobre la rugosidad de la cinta de acero.

3.6.3 Efecto de la microestructura de aceros sobre la rugosidad de la superficie

Aceros que tiene una estructura fcc tienen una tendencia a ser más rugosos que aquellos materiales que tiene una estructura bcc, esto es por que estos últimos tiene un número limitado de sistemas de deslizamiento y la rugosidad es función de la deformación. En general el proceso por el que una superficie bajo deformación tienda a ser rugosa se explica como sigue[6]:

a) A bajas deformaciones, el fin de los planos de deslizamiento en la superficie de contacto, se manifiesta como una estructura de líneas paralelas.

b) El proceso mediante el cual una superficie se hace rugosa, existe aún en condiciones de deformación homogénea, por que la deformación de los granos individuales varía como función de su orientación cristalográfica, por lo tanto algunos granos se deformarán, mientras el lubricante forma paquetes de separación entre superficies y la rugosidad de la superficie incrementa.

c) Cuando las piezas de trabajo están completamente separadas por lubricante, la rugosidad de la superficie sería la misma como si estuviera en libre deformación.

3.7 Efecto de las condiciones de operación y lubricación sobre la superficie en la laminación en frío

Se realizó un estudio [8] años atrás, con la finalidad de encontrar relaciones entre la lubricación adecuada durante la laminación en frío, la fricción durante el proceso y la influencia de la superficies sobre estos parámetros, en base a variables en el

proceso como velocidades, fuerzas de separación, además de aspectos metalúrgicos, como tamaños de grano y porcentajes de deformación, mucha importancia se le ha dado también a los mecanismos de lubricación que se desarrollan durante la laminación en frío.

Un ejemplo de estos trabajos es el que realizó Azushima en 1980, el estudió las condiciones durante el proceso de laminación que promueven el contacto entre los rodillos de laminación y la pieza de trabajo, mediante el estudio de los acabados superficiales de las láminas al final del proceso de laminación, habiendo previamente registrado los parámetros superficiales ($Ra_{m\acute{a}x}$) tanto del rodillo como de la pieza [7].

El valor máximo de rugosidad de rodillos fue de $0.8\mu m$ y el de la cinta de $0.25\mu m$, la cinta se sometió a tres distintas velocidades de laminación de 0.5 m/min, 60 m/min y 800 m/min. La Fig. 3.15 muestra la gráfica de variación de rugosidad con respecto a la reducción del material [7].

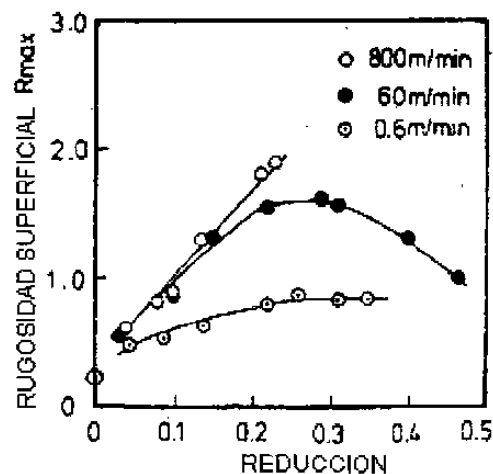


Fig. 3.15 Rugosidad superficial en función de la reducción a varias velocidades de laminación [7,8].

De la gráfica anterior se concluye que bajas velocidades de laminación la cinta por encima del 0.2 de reducción tiene una rugosidad constante de $0.85\mu m$ y que por lo tanto los rodillos estuvieron en contacto con el material. A la velocidad de

800 m/min la rugosidad de la cinta incrementa linealmente con la reducción y por lo tanto esta se deforma plásticamente sin ser tocada por los rodillos. A la velocidad de 60 m/min se tiene una combinación de los dos efectos que se presentan a las velocidades máxima y mínima [7,8].

Este comportamiento se explica en la Fig. 3.16. En el caso de altas velocidades de laminación, el movimiento relativo entre cinta y rodillos obliga al lubricante a entrar y evitar el contacto directo metal-metal entre la cinta y los rodillos, la cinta se deforma plásticamente sin ser tocada por los rodillos, entonces el régimen de lubricación sería el de lubricación hidrodinámica Fig.3.16 a). En cambio, a bajas velocidades de laminación, el lubricante no adquiere una velocidad adecuada y por lo tanto sólo una pequeña porción sería atrapado por las asperezas de la lámina y, por lo tanto, el rodillo tocaría a la pieza de trabajo incrementando su rugosidad Fig.3.16 b). El comportamiento a velocidades intermedias puede explicarse de forma similar a los dos casos anteriores siendo propiciado por la formación de una capa un poco más delgada que el caso de laminación a alta velocidad Fig.3.16 c). Se encontró también que el espesor de la capa de lubricante esta dado por la ecuación 3.7.1.1 que expresa:

$$hc = \frac{1}{2}Rr + \frac{1}{2}Rc \quad (3.7.1.1)$$

hc = Espesor de la capa de lubricante.

Rr = Rugosidad de los rodillos.

Rc =Rugosidad de la cinta.

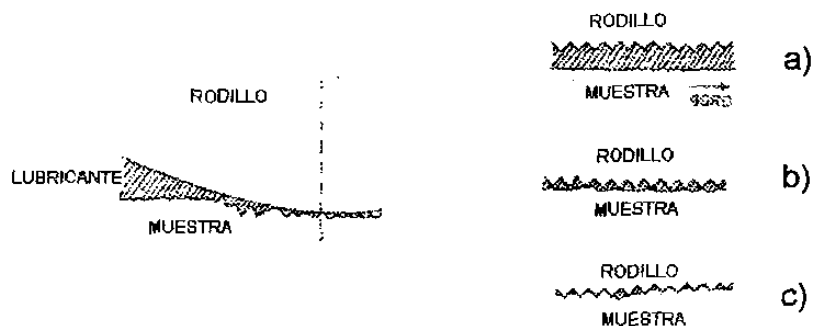


Fig.3.16 Velocidades altas (a), intermedias (b), bajas (c) [7].

Se ha observado que las condiciones superficiales tanto de la cinta de acero, al ser laminada en frío así como de los rodillos, son factores muy importantes que afectan el proceso de laminación en frío. Mucho del esfuerzo en este campo, ha sido enfocado al estudio de las características de los lubricantes empleados en la laminación, tal es el caso de los estudios realizados por Bland, y que fueron mencionados en el Capítulo 2, o los estudios realizados por Sakai, Saito y Kato, en donde estudian el estado de lubricación a través del análisis de la superficie de la cinta de acero laminada en frío, ellos establecen que cuando la velocidad de laminación aumenta, el incremento de la capa del lubricante se ve favorecido y con esto, se tienen condiciones hidrodinámicas que impiden el contacto metal-metal y, por lo tanto, que favorecen la realización de un proceso correcto de laminación. Lo anterior se fundamenta en las propiedades del lubricante empleado [8].

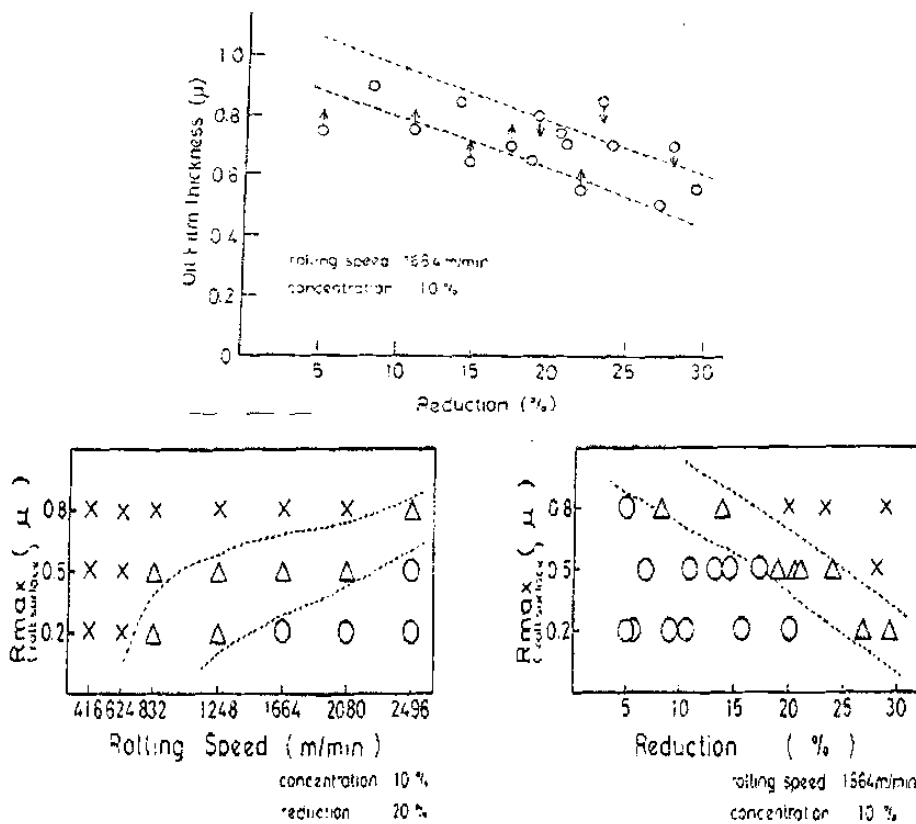


Fig.3.17. Comportamientos estudiados por Sakai, Saito y Kato [8].

Referencias Bibliográficas

- [1] Tribology in manufacturing process ASME/STLE ,Hawai 1994.
- [2] Bhushan, B. ,Gupta, B., "Handbook of Tribology", Mc Graw Hill, EUA 1976.
- [3] Hutchings, I.M. , "Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials", Edward Arnold, Londres Reino Unido U.K.1992.
- [4]Shu., Saka., "Fundamentals of Tribology" ,MIT Press, Massachusetts, EUA, Junio 1976.
- [5] Bowden, F.P. ,Tabor, D. "The Friction and Lubrication of Solids" Oxford University Press, Gran Bretaña, 1954.
- [6] Ginzburg, V.,Ballas,R,"Fundamentals of Flat Rolling", Manufacturing Engineering and Materials Processing, Marcel Dekeer 2000, Nva York.
- [7] Azushima, A., Kihara,J., Miyagawa,M., "Determination of Lubrication Mechanism by means of Surface Qualification of Cold Rolled Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

[8] Sakai, T., Saito, Y., Kato, K., "Estimation of Lubrication State by Observation of Rolled Strip Surface in High Speed Cold Rolling Of Mild Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

[9] Askeland ,D."Ciencia e Ingeniería de Materiales",Internacional Thompson Editores, México 1986.

[10] Von Baeyer, H.C., "Taming the Atom", Clays LTD ,EUA 1992.

[11] De la Garza, M, .Ros-Yáñez,T. Colás, R., Houbaert, Y. "Study of precipitates Formed in a Wrought Aluminum Alloy by Means of Atomic Force Microscopy", Materials Characterization 47 (2001) 397-400, Belgica,Octubre 2001.

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Trabajo de campo

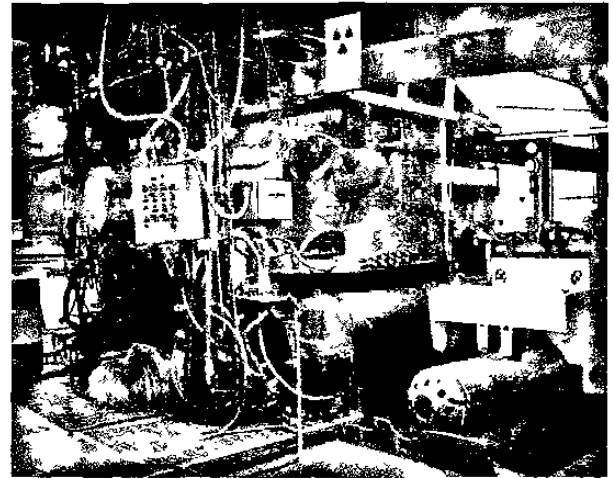
La fase inicial de la experimentación consistió en el muestreo en planta de 5 tipos de aceros que fueron previamente laminados en caliente y que serían laminados en frío. Estos aceros son los que se producen en mayor cantidad y con más frecuencia, la clasificación de los aceros se presenta en la Tabla 4.1, las muestras se obtuvieron de dos rollos que, al final del proceso de laminación, cuentan con la historia de los pasos de trabajo realizado para llegar al espesor requerido, estos rollos no serían procesados posteriormente. Uno de los rollos se obtiene directamente al final del proceso de laminación en frío y el otro fue necesario obtenerlo al final del proceso de lavado electrolítico. Se tenía conocimiento de que los aceros serían procesados por los molinos denominados MF1, MF3 y MF4 (Fig.4.1).

Tabla 4.1. Aceros muestreados y su composición química nominal.

AISI SAE	C(%peso)			Mn(%peso)			Si(%peso)			P(%peso)	S(%peso)
	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Max	Max
1005	-	-	0.06	-	-	.10/0.20	-	0.044	0.03	0.015	0.012
1008	-	-	0.040/0.080	-	-	0.20/0.35	-	-	0.01	0.025	0.02
1110	-	-	0.06	-	-	0.50/0.70	0.5	0.6	0.55	0.03	0.012
1006	-	-	0.06	0.15	0.3	0.225	-	-	0.03	0.015	0.012
1011	0.05	0.09	0.07	0.75	0.9	0.825	-	-	0.03	0.015	0.012



a)



b)



c)

Fig.4.1 Molinos de Laminación a)MF1, b)MF3,c)MF4 (Cortesía HYLSA).

4.1.2 Características operacionales de fabricación de los molinos

Los parámetros operacionales de los molinos de laminación se describen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características de operación a) MF1, b) MF3, c) MF4.

MOLINO FRIO 1	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	457
Tensión máxima (Ton)	10
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	356-394

a)

MOLINO FRIO 3	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	914.4
Tensión máxima (Ton)	10
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	356-406

b)

MOLINO FRIO 4	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	762
Tensión máxima (Ton)	33
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	75-107

c)

4.1.3 Corte de las muestras

Cuando se tuvieron los rollos con la historia de los pases, se procedió al corte de los mismos con la finalidad de obtener hojas de acero, que después serían troqueladas para obtener probetas para desarrollar ensayos de tensión en las direcciones longitudinal, transversal y a 45° (Fig.4.2) con respecto a la dirección de laminación, la dirección longitudinal en este trabajo, cabe mencionar que este estudio es una parte de las investigaciones necesarias para desarrollar un simulador del proceso de laminación en frío utilizando elementos finitos en el cual las pruebas mecánicas son necesarias para obtener datos, es por eso que son mencionadas, más los resultados de esas pruebas se utilizan sólo como comparación.

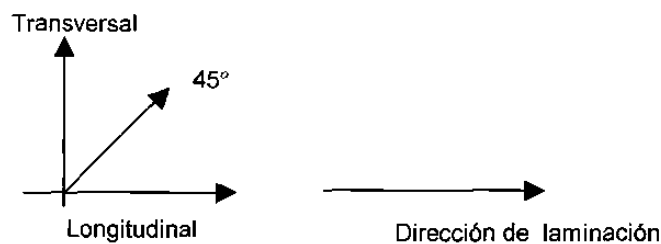


Fig.4.2 Distribución física de las muestras.

4.1.4 Obtención de los parámetros de operación durante el proceso de laminación

Los parámetros como, fuerzas de laminación, tensión en los enrolladores, velocidades de laminación, etc., se obtuvieron directamente de la base de datos de los molinos, tomando como referencia el número de secuencia del rollo muestreado.

4.2 Caracterización microestructural

Con la finalidad de conocer la características microestructurales de los aceros muestreados, se procedió a emplear técnicas de metalografía ordinaria y

metalografía cuantitativa, habiendo seleccionado los pasos de laminación a analizar incluyendo el paso denominado banda, que hace referencia al material antes de entrar al molino frío de cada uno de los aceros así como también se incluyen el primero y último de los pasos y que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Selección de muestras a analizar.

Acero	Pasos de laminación a analizar
1005	Banda, 1,2,3,4
1008	Banda, 1,4,6
1011	Banda, 1,2,4,8
1006	Banda, 1,3,6
1110	Banda, 1,2,4

4.2.1 Análisis químico

La composición real de los aceros muestreados se presenta en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Composición química real de los aceros muestreados.

AISI/SAE	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Nb
1005	0.063	0.162	0.006	0.004	0.022	0.00
1008	0.052	0.25	0.009	0.008	0.014	0.00
1006	0.063	0.171	0.011	0.001	0.015	0.00
1110	0.052	0.556	0.01	0.007	0.606	0.00
1011	0.066	0.821	0.007	0.0060	0.002	0.03

Para determinar la composición química real de los aceros muestreados se utilizó la técnica de espectroscopia de infrarrojo.

4.2.2 Análisis metalográfico

Una vez que se tuvieron las probetas de los pasos de laminación a analizar, se cortaron y montaron en resina epóxica, acomodados en orden descendente tomando como base el espesor, Fig.4.3. Las muestras fueron pulidas con papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) y agua como lubricante, siguiendo la secuencia: 120,220,320,400,600.

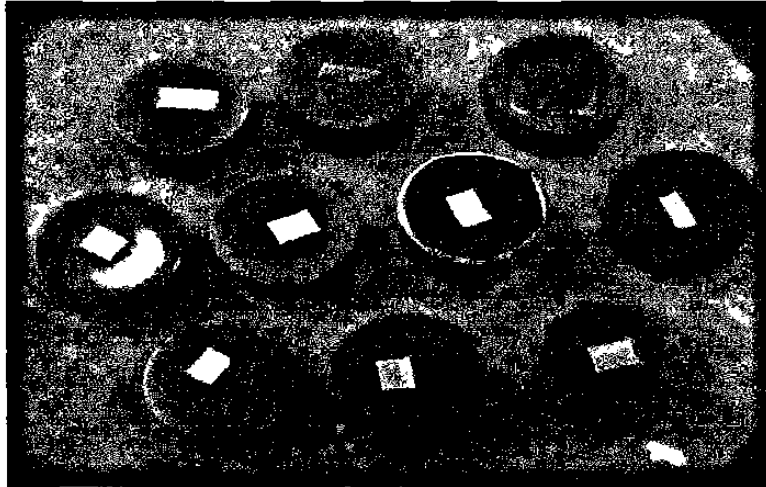


Fig.4.3 Muestras preparadas para análisis metalográfico.

Después del desbaste grueso se procedió a realizar un pulido con un disco y pasta de diamante, empleando como lubricante aceite de pulido ligero. Para el pulido final para obtener un acabado espejo se empleó un paño suave y polvo de alúmina (Al_2O_3) de tamaño de partícula de $1\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$. Una vez concluido el proceso de pulido, con el fin de revelar la microestructura del material se preparó el reactivo Nital al 3% con el fin de atacar químicamente las muestras, el cual consiste en una solución compuesta por un 97% de alcohol etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-OH}$) y 3% ácido nítrico (HNO_3). Las muestras fueron atacadas durante un tiempo de 20 segundos. Después del ataque químico las muestras fueron analizadas en un microscopio óptico marca Olympus® a diferentes aumentos. Las fotografías fueron tomadas mediante el programa de análisis de imágenes llamado Image ProPlus®.

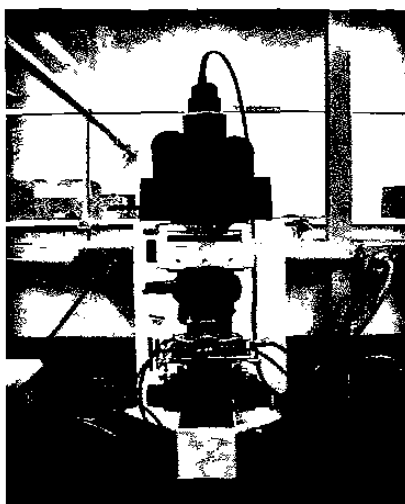


Fig.4.4 Microscopio óptico empleado para el análisis.

4.2.3 Determinación del tamaño de grano

En la determinación del tamaño de grano de los aceros muestreados, se emplearon dos métodos uno de ellos es el método Heyn [4] de medición de tamaño grano y el segundo es el método de las dos direcciones ortogonales[3].

El primero de los métodos mencionados consistió en tomar una fotografía de la microestructura de la banda de los aceros a cierto aumento y trazar sobre ella tres círculos concéntricos de tal manera que se cuente con una circunferencia equivalente (la suma de las circunferencias de los tres círculos). Para este trabajo se utilizó una circunferencia total de 250 mm. El método consiste en contar las fronteras de grano que cada uno de los círculos corta y mediante el empleo de las ecuaciones 4.2.3.1 y 4.2.3.2 el tamaño de grano en milímetros es calculado.

$$Nl = \frac{N}{\frac{Lt}{M}} = mm^{-1} \quad (4.2.3.1)$$

$$L = \frac{1}{Nl} = mm \quad (4.2.3.2)$$

Nl = número de intersecciones por unidad de longitud.

N = número de fronteras de grano contadas.

Lt = aumentos de la medición.

M = longitud de la circunferencia.

L = tamaño de grano (mm)

Se analizaron 3 campos por fotografía para este método

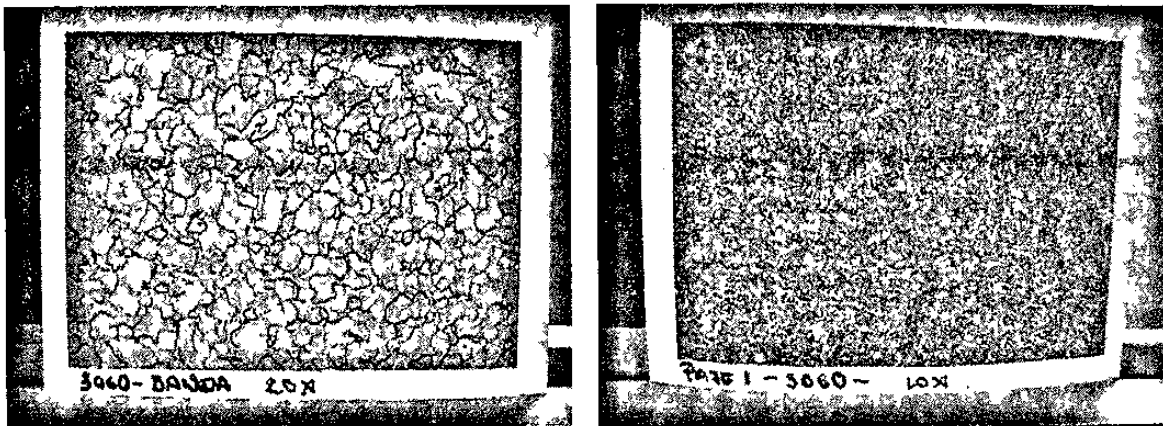


Fig.4.5 Imágenes utilizadas para el conteo de granos por el método Hey [4].

El segundo de los métodos que se utilizó se emplea para determinar el tamaño de grano promedio[3] y consiste en que con la ayuda de un programa de análisis de imágenes los granos de la microestructura son medidos en longitud en base a dos líneas ortogonales (l y t) que pasan por el , Fig. 4.6.

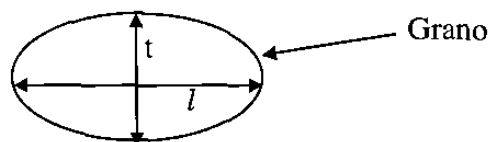


Fig.4.6 Medición efectuada en un grano

El tamaño de grano promedio se calcula a partir de la ecuación 4.2.3.3 como:

$$d = (l \cdot t)^{1/2} \quad (4.2.3.3)$$

Como un dato adicional mediante el empleo de los parámetros l y t , es posible encontrar en valor de deformación local ϵ que se describe mediante la ecuación 4.2.3.4 como :

$$\epsilon = \left(\frac{t}{l} \right)^{2/3} - 1 \quad (4.2.3.4)$$

Con el empleo de este método se analizaron 60 granos por muestra.

4.3 Ensayo de microdureza Vickers

Las muestras preparadas para los análisis metalográficos y de tamaño de grano fueron nuevamente pulidas con alúmina de $1.0\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$ en un paño suave y se atacaron nuevamente con nital al 3% con la finalidad de revelar la microestructura y realizar el ensayo de microdureza Vickers en cada uno de los pasos de laminación seleccionados con el fin de evaluar el cambio de este parámetro (VHN) conforme el proceso de laminación se lleva a cabo. El ensayo de microdureza Vickers se realizó en un microdurómetro marca Shimadzu® (Fig. 4.7), y consistió en realizar 5 indentaciones aplicando una carga de 50 gr durante un tiempo de 15 segundos teniendo la precaución de que el espaciamiento entre las huellas fuera de aproximadamente 5 veces el tamaño de la huella (Fig.4.8). El número de microdureza Vickers se obtuvo directamente con el promedio de las diagonales de la huella mediante el empleo de la ecuación para el valor de carga correspondiente. Ecuación 4.3.1.1.

$$VHN = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (4.3.1.1)$$

VHN = Número de dureza vickers.

P = Carga en gr.

d = Promedio de las diagonales en μm .

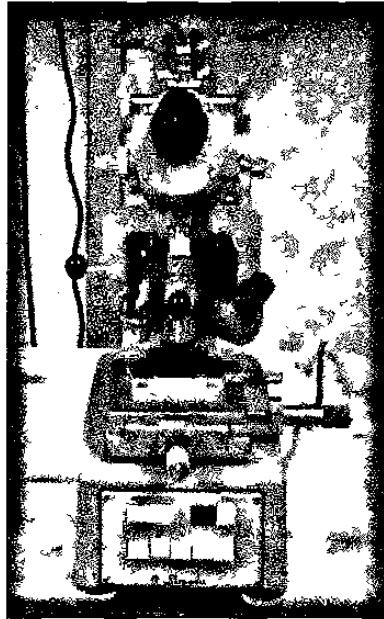


Fig.4.7 Microdurómetro marca Shimadzu.



Fig.4.8 Identación realizada en los ensayos de microdureza.

4.4 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de microscopía de fuerza atómica

Con la finalidad de obtener los parámetros de rugosidad discutidos en el Capítulo 3 de las muestras analizadas, se procedió a utilizar un microscopio de fuerza atómica Parker Scientific Instruments (Fig.4.9), debido a que este instrumento ofrece una alta definición, se realizaron barridos para cada uno de los pases de los aceros.

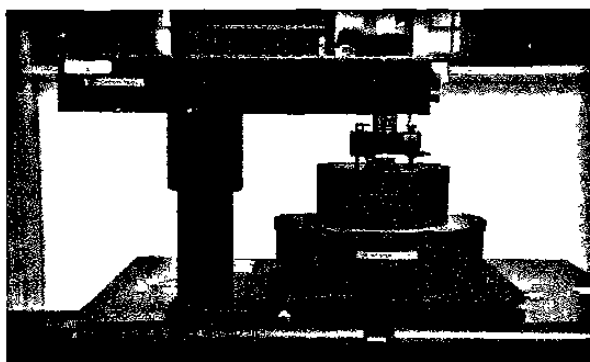


Fig.4.9 Microscopio de fuerza atómica (MFA).

Las muestras fueron seleccionadas de tal manera que no se apreciaran rayas producto del manejo al momento de su recolección en planta y fueron cortadas en cupones de un tamaño de 0.5 cm por 0.5 cm. Antes de ser analizadas en el microscopio de fuerza atómica, se retiró el aceite que se empleó para protegerlas del contacto atmosférico mediante el uso de un desengrasante ordinario y jabón, para posteriormente sumergirlas en acetona y colocarlas en el baño de ultrasonido por un tiempo de 4 minutos, este procedimiento se realizó para cada una de las muestras, en total se analizaron 24 muestras.

Los parámetros operacionales con los que se analizaron las muestras en el MFA fueron:

- a) Fuerza de barrido: 12 nN.
- b) Modalidad de contacto.
- c) Frecuencia de oscilación: 1Hz.
- d) Área de barrido: 100 μm^2 .

El análisis de las imágenes resultantes del barrido en el MFA se realizó mediante el uso del paquete computacional Image Processing ®, los parámetros Ra y Rms que fueron el objetivo de los barridos se obtuvieron mediante al análisis a través de un perfil de alturas que tiene la muestra en el área analizada (Fig.4.10) se obtuvo el valor Ra promedio por pase analizando 16 perfiles por muestra. Fue posible además obtener una imagen topográfica tridimensional, de la superficie de estudio que muestra el estado físico del análisis realizado, pero que no puede ser empleada para fines de análisis cuantitativo.

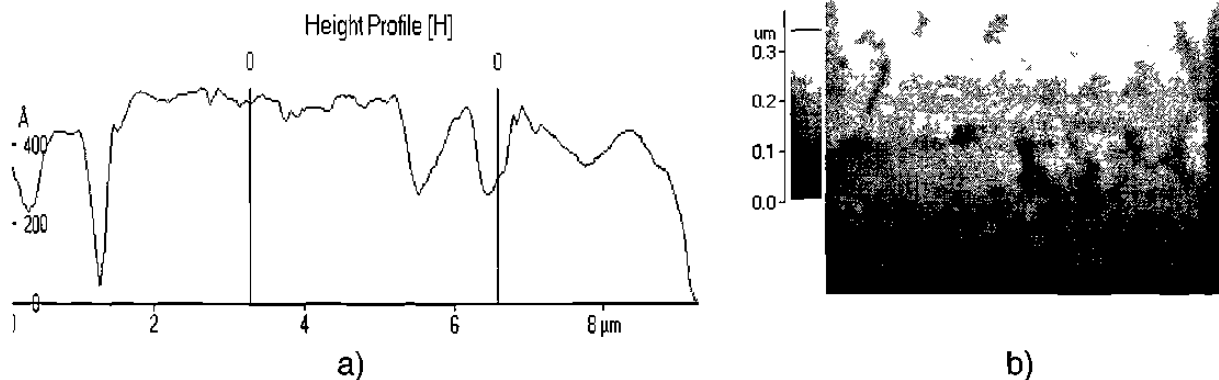


Fig.4.10 Perfil de alturas de una imagen obtenida mediante MFA. a)Perfil de alturas de una zona de la imagen en b).