



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ARAGÓN

**“ASPECTOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS DE LA
LAMINACIÓN DE METALES”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO
MECÁNICO ELECTRICISTA (ÁREA MECÁNICA) EN LA
MODALIDAD DE ALTO NIVEL ACADÉMICO

P R E S E N T A:

SMYRNA VANESSA RIVERA CORTÉS

ASESOR: M. en I. ALBERTO REYES SOLÍS



MÉXICO

ENERO 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Este trabajo de titulación esta dedicado principalmente a mi hijo, a quien le agradezco por todo su amor, comprensión y sobre todo paciencia en los momentos que no he podido dedicarle. Por regalarme su linda sonrisa que es la que me impulsa a seguir adelante pues siempre lo llevo en mi pensamiento y en mi corazón.

Agradezco a mi madre por estar siempre a mi lado apoyándome, aconsejándome, guiándome y dándome alientos para realizar todo lo que me propongo. Gracias por confiar en mí y por brindarme tu hombro, se que cuento contigo.

Agradezco a mis hermanos que con sus críticas y consejos he logrado darme cuenta de muchos errores, tanto personales como profesionales, y el corregirlos me han hecho ser una mejor persona.

Agradezco a mi asesor M. en I. Alberto Reyes Solís por todas sus enseñanzas, sus consejos y correcciones porque eso me ayuda a superarme y a perfeccionar mis proyectos, así mismo le agradezco por permitirme ser su ayudante, porque gracias a eso cada día aprendo más.

Agradezco al COMECYT y al CONACYT por la beca que me otorgaron, porque gracias a eso pude elaborar y concluir este trabajo de titulación.

Introducción	5
Capítulo 1 Conceptos generales	
1.1- Concepto de proceso	7
1.2.- Estados de los materiales	7
1.3.- Procesos básicos primarios	8
1.4.- Procesos secundarios	8
1.5.- Flujo de energía para los procesos básicos de tipo mecánico	9
1.5.1.- Fuentes de energía mecánica	10
1.5.2.- Fuentes de energía eléctrica	10
1.5.3.- Energía química	11
1.5.4.- Energía térmica	11
1.6.- Flujo de la estructura de la generación geométrica	12
Capítulo 2 Conformado de metales en estado líquido	
2.1.- Fundición	14
2.1.1.- Moldes temporales	15
2.1.2.- Modelos desechables y removibles	15
2.1.3.- Fundición en molde de arena	16
2.1.4.- Fundición en molde de capa seca	16
2.1.5.- Fundición en molde con arena seca	16
2.1.6.- Fundición en molde de arcilla	17
2.1.7.- Fundición en molde furánico	17
2.1.8.- Fundición con molde de CO ₂	17
2.2.- Procesos especiales de fundición	17
2.2.1.- Fundición en moldes metálicos	17
2.2.1.1.- Fundición en matrices	18
2.2.1.2.- Fundición en cámara caliente	18
2.2.1.3.- Fundición en cámara fría	19
2.2.1.4.- Fundición en moldes de baja presión	19
2.2.1.5.- Fundición hueca	20
2.2.1.6.- Fundición prensada o de Corthias	20
2.2.2.- Fundición centrífuga	20
2.2.2.1.- Fundición centrífuga real	20

2.2.2.2.- <i>Fundición semicentrífuga</i>	20
2.2.2.3.- <i>Centrifugado</i>	21
2.2.3.- <i>Proceso de fundición a la cera perdida</i>	21
2.2.4.- <i>Proceso de cáscara cerámica</i>	21
2.2.5.- <i>Fundición en molde de yeso</i>	21
Capítulo 3 Conformado de metales en estado granular	
3.1.- Metalurgia de polvos o pulvimetalurgia	22
3.1.1.- <i>Producción o selección del polvo</i>	23
3.1.2.- <i>Preparación, incluyendo la mezcla y combinación</i>	23
3.1.3.- <i>Compresión o compactación</i>	23
3.1.4.- <i>Sinterización o tratamiento térmico</i>	24
Capítulo 4 Conformado de metales en estado sólido	
4.1.- Procesos de reducción de masa	25
4.2.- Procesos de unión	25
4.3.- Procesos de conservación de masa	26
Capítulo 5 Comportamiento del material en el conformado de metales	
5.1.- Esfuerzo de cedencia	27
5.2.- Trabajo en caliente de los metales	28
5.2.1.- <i>Ventajas y desventajas</i>	28
5.3.- Trabajo en frío de los metales	30
5.3.1.- <i>Efectos del trabajo en frío</i>	30
5.3.2.- <i>Ventajas y desventajas</i>	31
Capítulo 6 Procesos de conformado de materiales en estado sólido	
6.1.- Laminado	34
6.2.- Forja	34
6.2.1.- <i>Forja con martillo o de herrero</i>	35
6.2.2.- <i>Forja con dado abierto</i>	35
6.2.3.- <i>Forja con dado impresor</i>	36
6.2.4.- <i>Forja con dado cerrado</i>	37
6.2.5.- <i>Otros procesos de Forja</i>	38
6.2.5.1.- <i>Acuñado</i>	38

6.2.5.2.- Cabeceado	38
6.2.5.3.- Penetrado	38
6.2.5.4.- Estampado con forja y forja radial	38
6.2.6.- Forja con rodillos	39
6.2.7.- Forja orbital	40
6.2.8.- Punzonado	41
6.2.9.- Forja isotérmica o forja con dado caliente	41
6.3.- Extrusión	41
6.3.1.- Extrusión directa e indirecta	42
6.3.2.- Extrusión por impacto	42
6.3.3.- Extrusión hidrostática	43
6.3.4.- Extrusión en caliente	44
6.3.5.- Extrusión en frío	44
6.4.- Estirado	45
6.5.- Embutido	46
6.5.1.- Reembutido	46
6.6.- Rechazado	47
6.6.1.- Rechazado convencional	47
6.6.2.- Rechazado cortante	48
6.6.3.- Rechazado de tubos	49
Capítulo 7 Laminado	
7.1.- Laminado plano	52
7.2.- Análisis	53
7.2.1. <i>Determinación de las presiones cuando ocurre el deslizamiento de fricción</i>	57
7.2.2. <i>Determinación de las presiones cuando ocurre la adherencia de fricción</i>	59
7.2.3. <i>Fuerza</i>	59
7.2.4 <i>Determinación de la fuerza cuando existe la influencia del deslizamiento de fricción</i>	61
7.2.5. <i>Ecuación de Ekelund</i>	61
7.2.6. <i>Momento de torsión</i>	62
7.2.7. <i>Potencia</i>	62
7.2.8. <i>Ejemplo: 1 laminado plano en frío</i>	63
7.2.9. <i>Ejemplo: 2 laminado en caliente</i>	64
7.2.10. <i>Tensiones longitudinales</i>	66
7.3.- Efecto de las cargas en los rodillos de laminación	68
7.3.1.- <i>Flexionado o combadura de rodillos</i>	68
7.3.2.- <i>Aplastamiento</i>	70
7.3.3.- <i>Resorteo del molino o distorsión plástica</i>	70

7.4.- Control automático del calibre	71
7.5.- Ensanchado del material de trabajo	72
7.6.- Problemas y defectos en los productos laminados	73
7.6.1. <i>Por flexión de los rodillos</i>	73
7.6.2. <i>Por combadura de los rodillos</i>	74
7.6.3. <i>Hojeamiento</i>	74
7.7.- Otras características	75
7.7.1.- <i>Esfuerzos residuales</i>	75
7.7.2.- <i>Tolerancias dimensionales</i>	76
7.7.3.- <i>Rugosidad superficial</i>	77
7.7.4.- <i>Número de calibre</i>	77
7.8.- Molinos para laminación	78
7.8.1.- <i>Laminación en Tándem</i>	81
7.8.2.- <i>Rodillos</i>	82
7.8.3.- <i>Lubricantes</i>	82
7.9.- Operaciones de laminado de forma	82
7.9.1.- <i>Laminado de perfiles</i>	83
7.9.2.- <i>Laminado de anillos</i>	84
7.9.3.- <i>Laminado de roscas</i>	85
7.9.4.- <i>Laminado de engranes</i>	86
7.9.5.- <i>Producción de tubos y tuberías sin costura</i>	87
Conclusiones	89
Bibliografía	91

Introducción

El conformado de metales es una disciplina importante en cualquier sociedad industrializada. Durante muchos años, en los planes de estudio de ingeniería, no se ha reconocido la importancia del conformado de metales para satisfacer las demandas de la industria y, por tanto, de la sociedad.

Esta situación se debe, parcialmente, al hecho de que los métodos técnicos y los enfoques científicos no han sido plenamente introducidos al campo del conformado de metales. Este sector ha sido considerado, ante todo, competencia de obreros y artesanos. En los institutos tecnológicos y universidades, el conformado de metales generalmente ha sido enseñado a nivel descriptivo, lo cual no es muy alentador ni para los estudiantes ni para los ingenieros.

Este trabajo de investigación representa un avance en el desarrollo de un mejor enfoque del laminado de metales. Dicho objetivo se alcanza mediante las siguientes características básicas:

- Ofrece una visión interrelacionada y sistemática de los procesos de conformado de metales.
- Permite hacer una rápida inspección de las posibilidades y limitaciones de los métodos de laminación disponibles para la producción de componentes específicos.
- Crea las bases para que en forma sistemática se puedan desarrollar procesos y diseñar sistemas de producción basándose en cálculos matemáticos.

Finalmente, la presentación se basa en un enfoque científico y sistemático que utiliza los fundamentos generales de la Ingeniería. Para alcanzar estas metas ha sido necesario considerar la laminación desde un nuevo punto de vista.

En el capítulo 1 se introduce al lector en conceptos generales y se describen brevemente los procesos básicos y secundarios del conformado de metales, así como el flujo de energía para los procesos básicos de tipo mecánico y el flujo de la estructura de la generación geométrica.

Con el objeto de ofrecer al lector las bases necesarias para comprender los procesos, del capítulo 2 al 4 se describe el conformado de metales en sus tres distintos estados y sus diferentes procesos. En el capítulo 5 se refuerza la información describiendo el comportamiento de los metales así como sus ventajas y desventajas trabajándolos en caliente o en frío.

En el capítulo 6 se amplía la información del conformado de materiales en su estado sólido y finalmente en el capítulo 7 se analiza a detalle el proceso de laminado, sus efectos de carga, sus problemas y defectos, así como los molinos que se utilizan en dicho proceso y sus operaciones de forma.

A lo largo del trabajo de investigación se presentan problemas y cálculos matemáticos que pueden mejorar notablemente los procesos del conformado de metales y laminado a nivel industrial. Espero que muchos institutos tecnológicos, universidades e industrias puedan utilizar este trabajo de investigación como texto introductorio al sector de laminación de metales.

Capítulo 1

Conceptos generales

Los procesos elementales de conformado de materiales de un producto pueden considerarse como la transformación de la materia prima básica en una forma apropiada para su posterior uso. La materia prima básica puede ser de fórmula o de mezcla de composición adecuada, que necesita convertirse en lingote, barra, lámina, alambre o cualquier forma adecuada para la tarea por realizar. Los materiales de conformado pueden ser de naturaleza metálica o no metálica.

1.1. Concepto de proceso

El término proceso se puede definir en general como un cambio en las propiedades de un objeto, incluyendo geometría, propiedades mecánicas, estado y contenido de información (datos sobre forma). Para producir cualquier cambio en las propiedades deben existir tres agentes esenciales: (1) material, (2) energía e (3) información.

1.2. Estados de los materiales

Los diferentes estados en que el material puede ser procesado son: sólido, líquido y granular. Cuando se procesan materiales compuestos pueden aparecer al mismo tiempo diferentes estados. El estado granular puede ser considerado como una subdivisión del estado sólido, puesto que los sólidos se dividen en materiales sólidos coherentes y no coherentes (granulares). Los diferentes estados de los materiales dan por resultado estructuras de proceso muy diferentes. Además del estado del material, su composición también es importante. En este punto puede ser útil una división en materiales homogéneos y heterogéneos, tanto para obtener nuevas ideas sobre materiales como para evaluar las propiedades de conformación respecto a los procesos fundamentales.

Los materiales homogéneos incluyen mezclas homogéneas y materiales puros, en forma de elementos y compuestos químicos.

Los materiales heterogéneos incluyen mezclas mecánicas.

Dependiendo de la finalidad del análisis que se esté efectuando, los materiales pueden caracterizarse también por sus propiedades físicas, térmicas, químicas, mecánicas y de manufactura. Evidentemente, en el estudio de los procesos de conformado de materiales es importante un profundo conocimiento y comprensión de los materiales y sus propiedades.

1.3. Procesos Básicos Primarios

Los procesos básicos se definen como procesos que crean cambios en la geometría y/o en las propiedades de los materiales, la función de los procesos primarios es proveer la forma semiterminada con la configuración necesaria, dimensiones y propiedades que son requeridas para un proceso subsecuente o un proceso secundario. Los procesos básicos se caracterizan por la naturaleza de su interacción con el material. Un proceso de conformado consiste generalmente de procesos básicos que constituyen la estructura del flujo de material.

1.4. Procesos Secundarios

Los procesos secundarios son subsecuentes a los procesos primarios, los cuales proveen la configuración final del elemento conformado (soldadura, un proceso adicional de forja, maquinado, tratamiento térmico, etc.).

Cualquier serie de procesos básicos puede dividirse en tres fases típicas:

- Fase 1, la cual consiste en los procesos (calentamiento, fusión, aserrado, recorte, etc.) que confieren al material un estado adecuado para efectuar el cambio primario de geometría y/o de propiedades.
- Fase 2, la cual consiste en los procesos que permiten crear la geometría y/o los cambios de propiedades deseados.
- Fase 3, la cual consiste en los procesos (enfriamiento, solidificación, eliminación de rebabas, etc.) que confieren al componente el estado final especificado. Los procesos básicos pueden dividirse en tres categorías principales, esta clasificación se basa en la naturaleza de la interacción con el material de trabajo.

Cuando se ha establecido el principal objetivo de un proceso, pueden encontrarse series relevantes de procesos básicos primarios y secundarios. En este momento el tipo de material tiene una fuerte influencia, debido a que los materiales reaccionan en forma diferente cuando son sometidos a acciones mecánicas, térmicas o químicas. Si sólo se toman en cuenta los procesos que producen cambios geométricos, el número posible de procesos básicos primarios se reduce.

El proceso básico primario y la manera de establecerlo es lo que determina los tipos y el número de procesos secundarios que se requerirán.

Procesos básicos primarios que cambian la geometría de los materiales.

Categoría del proceso básico	Procesos básicos
Mecánico	Deformación plástica
	Fractura (frágil y dúctil)

	Deformación elástica
	Flujo (colocación, llenado, etc.)
Térmico	Fusión
	Evaporación
Químico	Solución-disolución (electrolítica y química)
	Deposición ((electrolítica y química)
	Combustión

1.5. Flujo de energía para los procesos básicos de tipo mecánico

Los procesos básicos primarios de tipo mecánico son: deformación plástica y elástica, fractura dúctil o frágil y flujo. La energía para efectuar un proceso básico mecánico puede ser proporcionada mediante:

- Movimientos relativos entre un medio transmisor y el material de trabajo.
- Diferencias de presión a través del material de trabajo.
- Fuerzas de masa o máscas generadas en el material de trabajo.

Si la energía se suministra mediante movimientos activos, el estado del medio transmisor puede ser rígido, granular o fluido según sea el proceso real. Cuando se usan diferencias de presión para suministrar energía, el estado del medio transmisor puede ser plástico, elástico, granular (incluyendo el vacío). En el material de trabajo mismo se generan fuerzas de masa primordialmente mediante aceleraciones, gravedad o campos magnéticos, lo cual significa que el medio situado entre el generador de campo y el material de trabajo no tiene importancia en cuanto que no interfiere con la transmisión de energía.

A continuación se estudiara cómo se generan y aplican los movimientos relativos, las diferencias de presión y las fuerzas de masa y cuáles son las fuentes de energía disponibles.

La energía mecánica se puede generar:

- Como fuerzas de masa directamente en el material de trabajo.
- Como movimientos relativos y diferencias de presión fuera del material de trabajo (indirectamente), que se trasmiten a través de un medio adecuado.

Además, la energía puede trasmitirse ya sea a todo el material de trabajo (suministro total de energía) o a porciones de él en diferentes momentos (suministro de energía parcial o local); en el último caso la fuente de energía deberá tener movimiento relativo respecto al material.

Las fuentes de energía que pueden usarse para crear los movimientos relativos, las diferencias de presión o las fuerzas de masa que se necesitan en los procesos básicos mecánicos son mecánicas, eléctricas (incluyendo las magnéticas) y térmicas o químicas.

1.5.1. Fuentes de energía mecánica

Las fuentes disponibles de energía mecánica son:

- Energía cinética
- Traslación
- Rotación
- Combinaciones
- Energía potencial
- Gravitacional
- Elástica
- Presión en un medio (energía cinética en las moléculas)
- Vacío

Estas fuentes de energía se usan para crear diferencias de presión, movimientos relativos o fuerzas de masa a través del sistema herramienta-troquel. Los medios de transferencia se deben seleccionar de tal manera que cumplan con las especificaciones.

1.5.2. Fuentes de energía eléctrica

La energía eléctrica puede ser utilizada directa o indirectamente para crear energía mecánica aprovechable como movimientos relativos, diferencias de presión o fuerzas de masa.

Descarga entre dos electrodos. Una descarga de energía eléctrica (proveniente de una batería de condensadores) entre dos electrodos sumergidos en un fluido (generalmente agua), creará una onda de choque (debido a la evaporación repentina del fluido en la zona de descarga), que se puede aplicar al material de trabajo directamente mediante diferencias de presión o indirectamente (en forma de energía cinética) a través de un medio adecuado.

Campos electromagnéticos. La descarga de energía eléctrica a través de una bobina puede crear suficientes campos magnéticos transitorios que se pueden aprovechar directa o indirectamente. En la utilización directa de los campos electromagnéticos, el

material de trabajo se coloca dentro o fuera de una bobina para inducir en él un campo magnético que atrae o repele al campo de la bobina.

Estas fuerzas pueden ser suficientes para crear un flujo plástico en los materiales metálicos (expansión o contracción). En la utilización indirecta de los campos electromagnéticos, estos campos se usan para crear rotaciones o traslaciones en un material sólido que tenga la forma de núcleo de hierro. Esto produce energía mecánica que puede ser aprovechada en el proceso mediante una transmisión. La fuente de energía más común es el motor eléctrico, al especificar el sistema de energía primero se determinan los requerimientos del proceso básico y posteriormente se especifican e investigan los principios que satisfagan estos requerimientos.

Efecto magnetostrictivo. Algunos materiales, particularmente los ferromagnéticos, cambian sus dimensiones cuando son sometidos a un campo magnético. El níquel se contrae, mientras que las aleaciones de hierro y aluminio se expanden. Si estos materiales son sometidos a un campo que fluctúe a una frecuencia alta, se obtiene un oscilador (de 20 kHz) que puede ser usado en maquinado ultrasónico. La amplitud se puede variar dándole una forma apropiada al material sólido conectado al oscilador.

Efecto piezoeléctrico. El efecto piezoeléctrico lo presentan algunos materiales cristalinos en los que hay una interacción reversible entre deformación elástica y campo eléctrico. Esto significa que cuando uno de estos materiales se deforma por la aplicación de un esfuerzo, queda polarizado dieléctricamente (es decir, surge cierta diferencia de potencial). Por el contrario, cuando el cristal está sometido a una diferencia de potencial, cambia sus dimensiones de acuerdo con la deformación elástica. Este principio se aplica en varios transductores de presión o fuerza.

1.5.3. Energía química

La energía química puede ser convertida en energía mecánica de diferentes maneras, dependiendo de la fuente de energía (explosivos, gases combustibles, etc.), dando como resultado un incremento de presión en el medio. La alta presión resultante puede ser utilizada directamente en forma de diferencias de presión a través del material de trabajo, o indirectamente introduciendo movimientos relativos entre el medio de transferencia y el material de trabajo.

Estos principios se pueden emplear de muchas maneras diferentes. La combustión puede usarse en máquinas de forja y conformación; la detonación puede usarse en conformación con explosivos, soldadura por explosión y compactación, por ejemplo.

1.5.4. Energía térmica

La energía térmica o calor se puede convertir en energía mecánica utilizando la expansión térmica de los materiales para proporcionar movimientos relativos o para generar presiones en un medio.

1.6. Flujo de la estructura de la generación geométrica

La determinación del proceso básico y del flujo de la estructura de la generación geométrica permite evaluar tanto los requerimientos totales de energía como la energía que se distribuirá en los elementos geométricos individuales. El suministro de energía externa normalmente se efectúa a través de uno o dos elementos. Para cada elemento ahora será posible determinar los requerimientos de transmisión de energía y los de creación geométrica, que conjuntamente especifican los requerimientos de los medios de transferencia. Dependiendo del proceso real, la transmisión de energía externa y la generación geométrica se pueden integrar (como en la forja) o separar (como en la conformación hidráulica y la fundición).

Al relacionar las posibilidades geométricas derivadas de la estructura de la geometría para un material específico con el sistema de energía, se pueden definir los diferentes procesos físicos posibles.

Las cuatro posibilidades que surgen son:

- Conformación libre. Aquí el medio de transferencia no contiene la geometría deseada (esto es, la superficie o geometría se crea mediante campos de esfuerzos).
- Conformación unidimensional. Aquí el medio de transferencia contiene un generador (una línea o un área superficial a lo largo de la línea) de la superficie deseada, lo cual significa que se necesita un movimiento relativo para producir la superficie.
- Conformación bidimensional. Aquí el medio de transferencia no contiene un punto o un elemento superficial de la geometría deseada, lo cual significa que se necesitan dos movimientos relativos para producir la superficie.
- Conformación tridimensional o total. Aquí el medio de transferencia contiene (en uno o más elementos) la superficie completa de la geometría deseada, lo cual significa que no es necesario ningún movimiento relativo.

Estos cuatro principios fundamentales de creación de superficie pueden ser establecidos con un mecanismo de creación de geometría parcial o total. Por ejemplo, la forja es conformación total, el laminado es conformación unidimensional, el torneado es conformación bidimensional y la torsión es conformación libre.

Capítulo 2

Conformado de metales en estado líquido

La conformación de un material a partir del estado líquido incluye las siguientes fases:

- Fase 1: Fusión
- Fase 2: Conformación (creación de forma)
- Fase 3: Solidificación (estabilización de la forma)

La conformación a partir del estado líquido requiere primordialmente que el material se pueda fundir, y que se disponga del equipo para hacerlo. El primer punto depende del nivel que alcance el intervalo de puntos o temperaturas de fusión y de los requerimientos del equipo para producir una fusión completa. Estos requerimientos dependen a su vez de la composición química del material, de su afinidad hacia el medio circundante, de su absorción de gases y de otros factores. Si se puede producir la fusión, la siguiente cuestión es la disponibilidad de un molde o dado adecuado para una solidificación apropiada.

Las temperaturas de fusión para metales puros se pueden enlistar ya que se conocen perfectamente, pero para los metales aleados, los cuales revisten la máxima importancia industrial, no tienen punto de fusión determinado, sino más bien un intervalo de temperaturas de fusión definido por la temperatura del solidus (temperatura de inicio de fusión), debajo de la cual el material es sólido y por la temperatura del liquidus (temperatura de inicio de solidificación), arriba de la cual el material es líquido. Entre ambas temperaturas existe una mezcla de material líquido y sólido. El intervalo de temperaturas de fusión desempeña un papel importante en el proceso de solidificación.

El cambio de volumen asociado a la transición del estado líquido al sólido desempeña un papel muy importante durante la solidificación, puesto que determina la cantidad de metal fundido que se necesita. Todos los metales excepto el bismuto, el antimonio y el metaloide silicio se contraen durante la solidificación, lo cual significa que faltará material en la región central del componente, ya que la solidificación comienza en la periferia. Esto se compensa colocando mazarotas (reservas de material fundido) sobre el componente. Estas mazarotas se deben acomodar de tal manera que sean las últimas en solidificarse.

Después de la solidificación el componente se enfría a temperatura ambiental, produciéndose una contracción uniforme determinada por la diferencia entre la temperatura de fusión y la ambiental, multiplicada por la dilatación térmica media. Esta contracción hacia el estado sólido se debe compensar empleando un molde ligeramente mayor para que el componente enfriado tenga las dimensiones correctas. Como se

mencionó, la magnitud del intervalo de temperaturas de fusión desempeña un papel importante en la solidificación del material. El incremento en el intervalo de temperaturas de solidificación aumenta los riesgos de porosidad interna, desgarramiento por calor y segregaciones. La porosidad interna se crea cuando una porción de material semisolidificado interrumpe el adecuado vaciado de material fundido por el bebedero. Los desgarres por calor se deben a las altas temperaturas del molde, lo que impide físicamente la contracción y da por resultado grandes deformaciones por tensión. La segregación, distribución irregular de los constituyentes del material, generalmente se produce por un intervalo grande de temperaturas de solidificación y en ella la composición del material fundido restante cambia gradualmente conforme se reduce la temperatura.

Otras propiedades importantes en la conformación a partir del estado líquido incluyen el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad del material.

Se han desarrollado muchas aleaciones de fundición diferentes para minimizar algunos de los problemas descritos. También conviene mencionar que continuamente se están investigando y desarrollando nuevos procesos de fundición para ampliar la gama de materiales utilizables.

2.1. Fundición

El proceso para producir piezas u objetos útiles con metal fundido se le conoce como proceso de fundición. Este proceso se ha practicado desde el año 2000 AC. Consiste en vaciar metal fundido en una cavidad con la forma de la pieza u objeto que se desea fabricar y esperar a que solidifique el material al enfriarse.

Para lograr la producción de una pieza fundida es necesario hacer las siguientes actividades:

- Diseño de los modelos de la pieza y sus partes internas
- Diseño del molde
- Preparación de los materiales para los modelos y los moldes
- Fabricación de los modelos y los moldes
- Colado de metal fundido
- Enfriamiento de los moldes
- Extracción de las piezas fundidas
- Limpieza de las piezas fundidas
- Terminado de las piezas fundidas
- Recuperación de los materiales de los moldes (en algunos casos)

2.1.1. Moldes temporales

Los recipientes con la forma deseada se conocen como moldes, éstos se fabrican de diferentes materiales como: arena, yeso, barro, metal, etc. Los moldes pueden servir una vez o varias. En el primer caso se les conoce como moldes temporales y los que se pueden utilizar varias veces, se les conoce como moldes permanentes.

2.1.2. Modelos desechables y removibles

Los moldes se fabrican por medio de modelos los que pueden ser de madera, plástico, cera, yeso, arena, poliuretano, metal, etc. Si los modelos se destruyen al elaborar la pieza, se dice que éstos son desechables o desechables y si los modelos sirven para varias fundiciones se les llama removibles.

Ventajas de los modelos desechables

- Para la fabricación de moldes sin máquinas de moldeo se requiere menos tiempo.
- No requieren de tolerancia especiales.
- El acabado es uniforme y liso.
- No requiere de piezas sueltas y complejas.
- No requiere de corazones
- El moldeo se simplifica notablemente.

Desventajas de los modelos desechables

- El modelo es destruido en el proceso de fundición.
- Los modelos son más delicados en su manejo.
- No se puede utilizar equipo de moldeo mecánico.
- No se puede revisar el acabado del molde.

Tolerancias en los modelos

En el diseño de los modelos que se utilizan para construir un molde es necesario tener en consideración varias tolerancias.

1.- Tolerancia para la contracción. Se debe tener en consideración que un material al enfriarse se contrae dependiendo del tipo de metal que se esté utilizando, por lo que los modelos deberán ser más grandes que las medidas finales que se esperan obtener.

2.- Tolerancia para la extracción. Cuando se tiene un modelo que se va a remover es necesario agrandar las superficies por las que se deslizará, al fabricar estas superficies se deben considerar en sus dimensiones la holgura por extracción.

3.- Tolerancia por acabado. Cuando una pieza es fabricada es necesario realizar algún trabajo de acabado o terminado de las superficies generadas, esto se logra puliendo o quitando algún material de las piezas producidas, por lo que, se debe considerar en el modelo esta rebaja de material.

4.- Tolerancia de distorsión. Cuando una pieza es de superficie irregular su enfriamiento también es irregular y por ello su contracción es irregular, generando la distorsión de la pieza, estos efectos deberán ser tomados en consideración en el diseño de los modelos.

5.- Golpeteo. En algunas ocasiones se golpean los modelos para ser extraídos de los moldes, acción que genera la modificación de las dimensiones finales de las piezas obtenidas, estas pequeñas modificaciones deben ser tomadas en consideración en la fabricación de los modelos.

2.1.3. Fundición en molde de arena

Uno de los materiales más utilizados para la fabricación de moldes temporales es la arena sílica o arena verde (por el color cuando está húmeda). El procedimiento consiste en el recubrimiento de un modelo con arena húmeda y dejar que seque hasta que adquiera dureza.

2.1.4. Fundición en molde de capa seca

Es un procedimiento muy parecido al de los moldes de arena verde, con excepción de que alrededor del modelo (aproximadamente 10 mm) se coloca arena con un compuesto que al secar hace más dura a la arena, este compuesto puede ser almidón, linaza, agua de melaza, etc. El material que sirve para endurecer puede ser aplicado por medio de un rociador y posteriormente secado con una antorcha.

2.1.5. Fundición en molde con arena seca

Estos moldes son hechos en su totalidad con arena verde común, pero se mezcla un aditivo como el que se utiliza en el moldeo anterior, el que endurece a la arena cuando se seca. Los moldes deben ser cocidos en un horno para eliminar toda la humedad y por lo regular se utilizan cajas de fundición, como las que se muestran más adelante. Estos moldes tienen mayor resistencia a los golpes y soportan bien las turbulencias del metal al colarse en el molde.

2.1.6. Fundición en molde de arcilla

Los moldes de arcilla se construyen al nivel de piso con ladrillos o con materiales cerámicos, son utilizados para la fundición de piezas grandes y algunas veces son reforzados con cajas de hierro. Estos moldes requieren mucho tiempo para su fabricación y no son muy utilizados.

2.1.7. Fundición en molde furánico

Este proceso es bueno para la fabricación de moldes o corazones de arena. Están fabricados con arena seca de grano agudo mezclado con ácido fosfórico, el cual actúa como acelerador en el endurecimiento, al agregarse a la mezcla una resina llamada furánica. Con esta mezcla de ácido, arcilla y resina en dos horas el molde se endurece lo suficiente para recibir el metal fundido.

2.1.8. Fundición con molde de CO₂

En este tipo de moldes la arena verde se mezcla con silicato de sodio para posteriormente ser apisonada alrededor del modelo. Una vez armado el molde se inyecta bióxido de carbono a presión con lo que reacciona el silicato de sodio aumentando la dureza del molde. Con la dureza adecuada de la arena del molde se extrae el modelo, si éste fuera removible, para posteriormente ser cerrado y utilizado.

También los procesos de moldeo pueden ser clasificados por el lugar en el que se fabrican.

- Moldeo en banco. Este tipo de moldeo es para trabajos pequeños y se fabrican en un banco que se encuentre a la mano del trabajador.
- Moldeo de piso. Para piezas grandes en las que su manejo es difícil y no pueden ser transportadas de un sitio a otro.
- Moldeo en fosa. Cuando las piezas son extremadamente grandes y para su alimentación es necesario hacer una fosa bajo el nivel medio del piso.

2.2. Procesos especiales de fundición

2.2.1. Fundición en moldes metálicos

La fundición en moldes permanentes hechos de metal es utilizada para la producción masiva de piezas de pequeño o regular tamaño, de alta calidad y con metales de baja temperatura de fusión. Sus ventajas son que tienen gran precisión y son muy económicos, cuando se producen grandes cantidades. Existen varios tipos de moldes

metálicos utilizados para la fabricación de piezas por lo regular de metales no ferrosos, a continuación se mencionan algunos de los más utilizados.

2.2.1.1. Fundición en matrices

En este proceso el metal líquido se inyecta a presión en un molde metálico (matriz), la inyección se hace a una presión entre 10 y 14 MPa, las piezas logradas con este procedimiento son de gran calidad en lo que se refiere a su terminado y a sus dimensiones. Este procedimiento es uno de los más utilizados para la producción de grandes cantidades de piezas fundidas. Se pueden utilizar dos tipos de sistema de inyección en la fundición en matrices.

- Fundición en cámara caliente
- Fundición en cámara fría

2.2.1.2. Fundición en cámara caliente

El procedimiento de fundición en cámara caliente (figura 1) se realiza cuando un cilindro es sumergido en el metal derretido y con un pistón se empuja el metal hacia una salida de descarga a la matriz. Las aleaciones más utilizadas en este método son las de bajo punto de fusión como las de zinc, estaño y plomo. Las piezas que se producen pueden ser de 20 hasta 40 kg y se llegan a manejar presiones superiores a los 35 MPa. Es un proceso rápido que se puede fácilmente mecanizar.

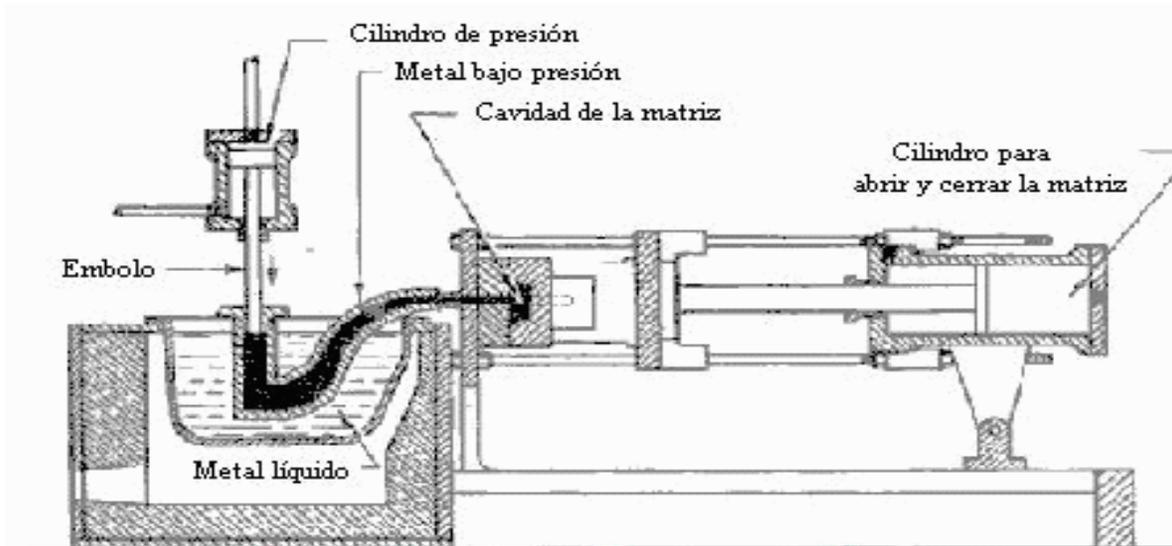


Figura 1 Fundición en cámara caliente

2.2.1.3. Fundición en cámara fría

En el proceso con cámara fría se lleva metal fundido por medio de un cucharón hasta un cilindro por el cual corre un pistón que empuja al metal a la matriz de fundición, las piezas obtenidas son de unos cuantos gramos a 10 kg y sólo es recomendable en trabajos de poca producción.

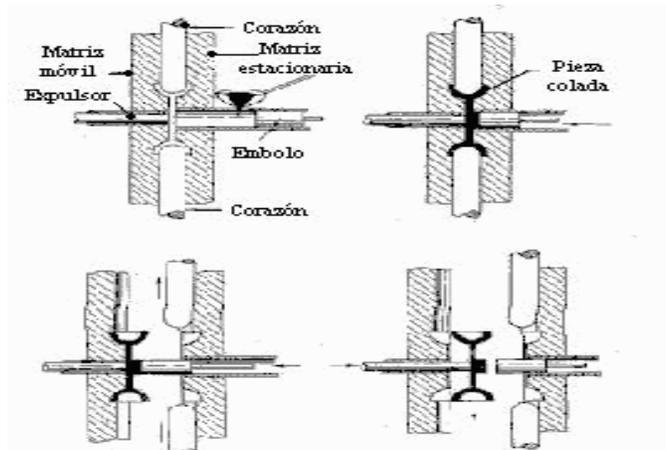


Figura 2 Fundición en cámara fría

2.2.1.4. Fundición en moldes de baja presión

Es un sistema de fundición que consiste en la colocación de un tallo sobre un crisol sellado, al inyectar presión al crisol en la superficie del metal fundido la única salida del metal será el tallo, por lo que se genera el flujo del metal por el tallo hasta que se llena la matriz y se forma la pieza, como se muestra en la figura 3.

Con este procedimiento se pueden fabricar piezas hasta de 30 kg y es rentable para grandes cantidades de piezas sin grandes requerimientos de calidad.

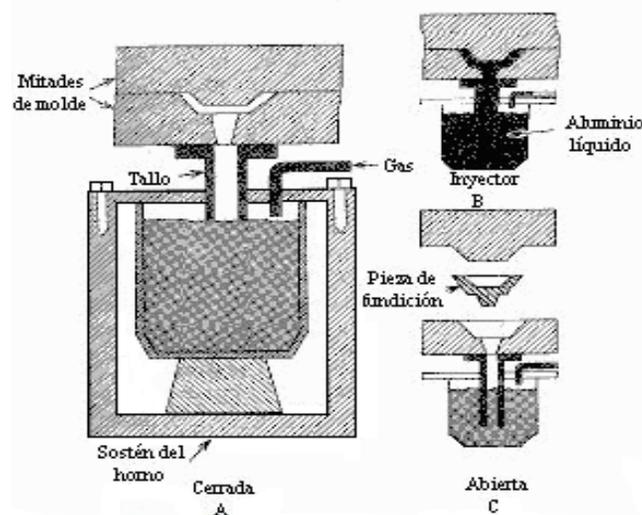


Figura 3 Fundición en moldes de baja presión

2.2.1.5. Fundición hueca

Es un sistema de producción de piezas metálicas huecas sin corazones fijos. Consiste en vaciar metal fundido en un molde que es volteado cuando se empieza a solidificar el metal. El metal que no se ha solidificado sale del molde para ser utilizado en otra pieza y el metal solidificado forma las paredes de la pieza. El resultado son paredes delgadas de metal.

2.2.1.6. Fundición prensada o de Corthias

Es un proceso para producir piezas huecas pero de mayor calidad que la fundición hueca. Se vacía una cantidad específica de metal fundido en el interior de un molde con un extremo abierto por el que se introduce un corazón que obliga al metal fundido a distribuirse uniformemente en todo el molde, una vez que empieza a solidificarse el metal del molde, se extrae el corazón, lo que origina una pieza de buena calidad. Este sistema de fundición es considerado como artesanal y sólo es rentable cuando se van a fabricar pocas piezas.

2.2.2. Fundición centrífuga

La fundición centrífuga es un método en el que se aprovecha la fuerza centrífuga que se puede genera al hacer girar el molde en torno de un eje. Existen tres tipos de fundición centrífuga:

Fundición centrífuga real

Fundición semicentrífuga

Centrifugado

2.2.2.1. Fundición centrífuga real

Es el procedimiento utilizado para la fabricación de tubos sin costura, camisas y objetos simétricos, los moldes se llenan del material fundido de manera uniforme y se hace girar al molde sobre su eje de rotación.

2.2.2.2. Fundición semicentrífuga

Es un método en el que el material fundido se hace llegar a los extremos de los moldes por la fuerza centrífuga que se genera al hacer girar los moldes, los extremos se llenan del material fundido, con buena densidad y uniformidad. El centro tiene poca material o de poca densidad. Por lo regular el centro en este tipo de sistemas de fundición es maquinado posteriormente.

2.2.2.3. Centrifugado

Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de piezas colocadas simétricamente en la periferia. Al poner a girar el sistema se genera una fuerza centrífuga la que se utiliza para aumentar la uniformidad del metal que llena las cavidades de los moldes.

2.2.3. Proceso de fundición a la cera perdida

El proceso de fundición a la cera perdida consiste en la creación de un modelo en cera de la pieza que se requiere, este modelo debe tener exactamente las características deseadas en la pieza a fabricar. El modelo de cera es cubierto con yeso o un material cerámico que soporte el metal fundido. Para que seque ese material cerámico se introduce a un horno, con ello el material cerámico se endurece y el modelo de cera se derrite. En el molde fabricado se vacía el metal fundido y se obtiene la pieza deseada. Es un proceso que es utilizado para la fabricación de piezas únicas y con muy buen acabado superficial.

2.2.4. Proceso de cáscara cerámica

Es un proceso parecido al de la cera perdida, sólo que en este proceso el modelo de cera o un material de bajo punto de fusión se introduce varias veces en una lechada refractaria (yeso con polvo de mármol) la que cada vez que el modelo se introduce, éste se recubre de una capa de la mezcla, generando una cubierta en el modelo. Posteriormente el modelo y su cáscara se meten en un horno con lo que el material refractario se endurecerá y el modelo se derrite. Así se tiene un molde listo para ser llenado con un metal y producir una fundición sólida o hueca.

2.2.5. Fundición en molde de yeso

Cuando se desea la fabricación de varios tipos de piezas de tamaño reducido y de alta calidad en su terminado superficial, se utiliza el proceso de fundición en molde de yeso. Éste consiste en la incrustación de las piezas modelo que se desean fundir, en una caja llena con pasta de yeso, cuando se ha endurecido el yeso, se extraen las piezas que sirvieron de modelo y por gravedad se llenan las cavidades con metal fundido. El sistema anterior puede producir grandes cantidades de piezas fundidas con las formas deseadas.

Capítulo 3

Conformado de metales en estado granular

Para esta área de procesos es bastante difícil definir las propiedades del material que determinan la adaptabilidad del material granular a la compactación y sinterización.

Todos los materiales que pueden producirse en estado granular pueden ser compactados y sinterizados, pero dependiendo del material particular podría ser difícil desarrollar procesos adecuados de compactación y sinterización. En general los requisitos funcionales y no el proceso en sí, determinan el material a usar.

La producción de componentes a partir de materiales granulares generalmente sigue el mismo patrón:

- Producción del material granular
- Acondicionamiento o preparación para la conformación y estabilización
- Conformación
- Estabilización de la forma
- Operaciones de acabado

Dependiendo del material y de los requerimientos del componente, estas fases implican diferentes procesos básicos. Solo se hará mención de la producción de componentes de polvo metálico, esta área se llama metalurgia de polvos o pulvimetalurgia.

3.1. Metalurgia de polvos o pulvimetalurgia

Este proceso, lo usaron por primera vez los egipcios en el año 3000 AC, para fabricar herramientas de hierro. Una de las primeras aplicaciones modernas fue a principios del siglo XX, para fabricar los filamentos de tungsteno para lámparas incandescentes. Los productos que se suelen fabricar con técnicas de metalurgia de polvos van desde esferas diminutas para bolígrafos, engranajes, levas y bujes, productos porosos, como por ejemplo filtros y cojinetes impregnados en aceite, hasta una diversidad de partes de automotores, como anillos de pistón, guías de válvulas, bielas y pistones hidráulicos.

Los metales que más se usan en metalurgia de polvos son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios. Para piezas de latón, bronce, aceros y aceros inoxidable se usan polvos prealeados, donde cada partícula del polvo es en sí una aleación.

La metalurgia de polvos se ha vuelto competitiva con procesos como fundición, forja y maquinado, en especial para piezas relativamente complejas hechas de aleaciones de

alta resistencia y dureza. Actualmente, el avance de la tecnología permite fabricar partes estructurales de aviones, como por ejemplo trenes de aterrizaje, soportes, rodets y compartimientos de motores, por medio de la metalurgia de polvos.

La producción de un componente mediante técnicas pulvimetalúrgicas normalmente abarca las siguientes etapas o fases:

3.1.1. Producción o selección del polvo

Se han desarrollado diferentes métodos para la producción de polvos metálicos. Los más importantes son la reducción de minerales, la volatilización y la galvanoplastia. En la pulvimetalurgia convencional, los polvos producidos por la reducción de minerales se usan extensamente, pero en años recientes el empleo de polvos producidos por volatilización ha crecido rápidamente.

Los polvos que se producen por galvanoplastia sólo se usan para propósitos especiales y su mercado esta disminuyendo. Los tipos de polvos y sus propiedades tienen una influencia notable en las propiedades finales del componente, por lo cual es importante tener conocimiento fundamental de los polvos.

3.1.2. Preparación, incluyendo la mezcla y combinación

La preparación de un polvo consiste principalmente en mezclarlo y combinarlo para obtener una distribución uniforme de las partículas por tamaño, así como el polvo que constituye la base de los elementos aleantes y para revestir las partículas con un lubricante. El proceso de mezcla debe llevarse a cabo cuidadosamente. Una mezcla excesiva puede ocasionar endurecimiento por deformación, desgaste de las partículas al chocar entre sí, formación de capas y otros inconvenientes.

3.1.3. Compresión o compactación

El componente se especifica por su densidad, resistencia, tolerancias y otras propiedades esperadas y el polvo por su curva de compresibilidad, esto es, su densidad en función de la presión de compactación.

El componente deseado debe tener, en general una distribución uniforme de densidad por todas partes. Cuando se compacta polvo en una cavidad con un troquel móvil (compresión simple), las propiedades del polvo causan una distribución irregular de densidad debido a la fricción entre los granos individuales y entre las partículas y las paredes de la matriz. Esto significa que la densidad disminuye al aumentar la distancia del troquel. Debido a esto sólo pueden producirse satisfactoriamente componentes delgados y casi planos con la compactación simple. Comprimiendo por ambos lados (compresión por doble acción) puede obtenerse una distribución más uniforme de densidad.

3.1.4. Sinterización o tratamiento térmico

El sinterizado, o la sinterización, es el proceso de calentar los comprimidos crudos en un horno con atmósfera controlada hasta una temperatura menor al punto de fusión, pero lo suficientemente alta como para permitir la adhesión por difusión de las partículas individuales. Antes de la sinterización el comprimido es frágil y su resistencia, llamada resistencia verde, es baja. La naturaleza y la resistencia de la unión entre las partículas y, en consecuencia, del compactado sinterizado, dependen de los mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles del comprimido, recristalización, crecimiento de granos y contracción de poros.

Las variables principales en el sinterizado son la temperatura, el tiempo y la atmósfera controlada.

Capítulo 4

Conformado de metales en estado sólido

El conformado de materiales en estado sólido se puede efectuar mediante procesos, de reducción de masa, de unión o de conservación de masa.

4.1. Procesos de reducción de masa

Los procesos básicos del tipo de reducción de masa son mecánicos (fractura dúctil o frágil), químicos (disolución y combustión) o térmicos (fusión).

Los procesos de reducción de masa basados en la fractura son los más importantes industrialmente, ya que incluyen todos los procesos de corte. La adaptabilidad de un material a los procesos de corte se conoce frecuentemente como maquinabilidad. La maquinabilidad, la cual depende de muchas propiedades diferentes del material, es una medida de qué tan buena es la interacción entre la herramienta de corte y el material.

Los parámetros que cubre un índice de maquinabilidad puede ser desgaste de la herramienta, calidad de la superficie, fuerzas de corte o forma de la viruta. Se suele considerar que el desgaste de la herramienta es el criterio principal y se han desarrollado procedimientos estandarizados de prueba.

La maquinabilidad depende primordialmente de:

1. Las propiedades mecánicas de un material (ductilidad y dureza)
2. Su composición química
3. Su tratamiento térmico (estructura)

4.2. Procesos de unión

Sólo se considera aquí el tipo principal de proceso de unión, que es la soldadura por fusión. La soldabilidad de un material es difícil de definir, al igual que las otras propiedades tecnológicas. Muchos factores como los mencionados bajo el conformado de materiales en estado líquido, influyen en las propiedades de soldadura de un material. La composición química y la afinidad de los constituyentes por su entorno tienen una gran influencia, ya que las contaminaciones, absorciones de gas, estructura y otros aspectos dependen de estos factores. Además, las condiciones de enfriamiento influyen en los esfuerzos internos resultantes en la microestructura y en la dureza final del material.

4.3. Procesos de conservación de masa

En el conformado de metales, el proceso básico primario es la deformación plástica de tipo mecánico. La capacidad de un material para experimentar deformación plástica está determinada primordialmente por su ductilidad (medida por la reducción de área en la prueba de tensión). La cantidad de deformación plástica necesaria para producir el componente deseado depende del principio que se elija para la creación de superficie y del incremento esperado en la forma. En otras palabras, la ductilidad de un material determina el principio de creación de superficie y el incremento de forma obtenibles sin fractura.

Las curvas de esfuerzo-deformación son la fuente de información más importante al evaluar la idoneidad de un material para ser sometido a deformación plástica. La deformación por inestabilidad, la elongación porcentual y la reducción de área son las características sobresalientes. En casi todos los procesos de conformación hay una buena correlación entre la reducción de área y la conformabilidad del material. Las curvas de esfuerzo-deformación también revelan los esfuerzos necesarios para producir la deformación deseada. Los esfuerzos y deformaciones, así como las fuerzas, el trabajo y la energía resultantes tienen importancia en el diseño de herramientas o moldes y en la elección de maquinaria para el proceso.

Como se mencionó antes, las condiciones en que se realiza un proceso pueden influir en gran medida sobre la conformabilidad. Los parámetros importantes son el estado de tensión, la velocidad de deformación y la temperatura. En cuanto al estado de tensión, se puede afirmar que la conformación bajo esfuerzos de compresión generalmente es más fácil que bajo esfuerzos de tensión, ya que se suprimen las tendencias hacia la inestabilidad y la fractura por tensión. Más aún, una presión hidrostática como carga adicional incrementa la conformabilidad (ductilidad), por lo cual se utiliza en ciertos casos. En la mayoría de procesos, el estado de tensión varía a lo largo de la zona de deformación; por tanto, a veces puede ser difícil identificar el estado máximo de tensión. La velocidad de deformación también influye en la ductilidad de un metal. Una mayor velocidad de deformación provoca una menor ductilidad y un incremento en los esfuerzos necesarios para producir cierta deformación. Los procesos industriales más utilizados tienen lugar a temperatura ambiental; en consecuencia, la velocidad de deformación no ocasiona problemas. Sin embargo, en aquellos procesos que se efectúan a temperaturas elevadas se deben tomar en cuenta los efectos de la velocidad de deformación. Las altas temperaturas pueden dar por resultado un material con un esfuerzo constante de cedencia, el cual es independiente de la deformación. En este estado el material puede soportar deformaciones muy grandes, ya que la temperatura es superior a la de recristalización, donde se producen continua y casi instantáneamente nuevos granos libres de deformación. Estos "procesos de trabajo en caliente" no causan problemas graves en la fase de deformación, cuando la velocidad de dicha deformación está controlada.

Lo anterior es válido para todos los metales, con algunas excepciones: por ejemplo, el latón para cartuchos, que presenta tendencia a la fragilidad a temperaturas por arriba de la temperatura de recristalización.

Capítulo 5

Comportamiento del material en el conformado de metales

La curva esfuerzo-deformación ofrece una visión que permite comprender el comportamiento de los metales durante su deformación. La curva típica de esfuerzo-deformación para la mayoría de los metales se divide en una región elástica y una región plástica. En el formado de un metal, la región plástica es de interés primordial debido a que en estos procesos el material se deforma plástica y permanentemente.

La relación típica esfuerzo-deformación presenta elasticidad por debajo del punto de cedencia, y endurecimiento por deformación arriba de dicho punto. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la curva de cedencia:

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

K = coeficiente de resistencia, (MPa)

ε = deformación

n = es el exponente de endurecimiento por deformación.

El esfuerzo y la deformación en la curva de cedencia son esfuerzo real y deformación real. La curva de cedencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío.

5.1. Esfuerzo de cedencia

La curva de cedencia describe la relación esfuerzo-deformación en la región donde tiene lugar el deformado del metal. También indica el esfuerzo de cedencia del metal, la propiedad de resistencia que determina las fuerzas y la potencia requerida para realizar una operación particular de conformado.

Cuando la mayoría de los metales se deforman a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo requerido para continuar la deformación debe incrementarse para contrarrestar este incremento de la resistencia. El esfuerzo de cedencia se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener "fluyendo" al metal.

Ésta es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que puede expresarse como:

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots(2)$$

Donde

σ = esfuerzo de cedencia, (MPa)

5.2. Trabajo en caliente de los metales

El trabajo en caliente de los metales, se efectúa arriba de la zona de recristalización o de endurecimiento. Para el acero, la recristalización comienza entre los 500 a 700°C; sin embargo, la mayoría del trabajo en caliente en el acero, se realiza a temperaturas considerablemente superiores a esa zona. No existe tendencia al endurecimiento ocasionado por el trabajo mecánico, hasta que se alcance el límite inferior de la zona de recristalización. Algunos metales, como el plomo y el estaño, tienen una zona baja de recristalización y se les puede trabajar en caliente a la temperatura ambiente; pero la mayoría de los metales comerciales, requieren algo de calentamiento. Las composiciones de aleación tienen una gran influencia sobre la escala correcta de trabajo; el resultado usual es el de aumentar la zona de temperatura de recristalización. Esta zona también puede aumentar por el trabajo previo en frío.

Durante todas las operaciones de trabajo en caliente, el metal está en un estado plástico y se forma rápidamente por presión.

5.2.1. Ventajas y desventajas

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos teóricamente), y la ductilidad del metal se incrementa significativamente.

Todo esto da por resultado las siguientes ventajas con respecto al trabajo en frío:

- 1) La forma de la pieza de trabajo se puede alterar significativamente
- 2) Elimina considerablemente la porosidad del metal. La mayoría de los lingotes al ser colados, contienen muchos poros. Estos son comprimidos y eliminados por la alta presión.

- 3). Las impurezas en forma de inclusiones, son descompuestas y distribuidas a través del metal.
- 4) Los granos bastos o columnares, se hacen más finos. Ya que este trabajo se hace en la escala de recristalización, deberá prolongarse hasta que se alcance el límite inferior, para conseguir una estructura fina del grano.
- 5). Generalmente mejoran las propiedades físicas de acuerdo principalmente con el refinamiento del grano. La ductilidad y la resistencia al impacto son mejoradas, la resistencia es incrementada y se desarrolla una mayor homogeneidad en el metal. La mayor resistencia del acero laminado se tiene en la dirección del flujo del metal.
- 6) La cantidad de energía necesaria para cambiar la forma del acero en estado plástico, es mucho menor que la requerida cuando está frío. Se requiere menor potencia para deformar el metal
- 7) Los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío, pueden formarse en caliente
- 8) El trabajo en caliente no produce endurecimiento de la pieza. Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente una ventaja del trabajo en frío. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es indeseable que el metal se endurezca por trabajo debido a que reduce su ductilidad, por ejemplo, cuando la pieza tiene que procesarse posteriormente en frío.

Todos los procesos de trabajo en caliente, presentan unas cuantas desventajas que no deben ser ignoradas.

Como consecuencia de la alta temperatura del metal, se tiene una rápida oxidación o formación de escamas en la superficie de trabajo (incrustaciones), con el consiguiente mal acabado superficial y menor duración en la vida de las herramientas. Como resultado de las escamas, no se pueden mantener tolerancias precisas.

El equipo para el trabajo en caliente y los costos de mantenimiento son elevados, pero el proceso es económico comparado con el trabajo de los metales a temperaturas menores.

Los métodos principales, de trabajo en caliente de los metales son:

- Laminado
- Forjado
- Estirado o embutido
- Rechazado
- Extruido

5.3. Trabajo en frío de los metales

No obstante que muchas de las operaciones utilizadas en los trabajos en caliente pueden aplicarse al trabajo en frío, los efectos resultantes sobre la estructura cristalina y las propiedades físicas del metal, son diferentes. El trabajo en caliente, efectuado en el metal en estado plástico, efectivamente refina la estructura del grano; en tanto que el trabajo en frío, simplemente los distorsiona e influye poco en la reducción de su tamaño. Aunque se pueden emplear temperaturas hasta la zona de recrystalización, el trabajo en frío se hace normalmente a la temperatura ambiente.

5.3.1. Efectos del trabajo en frío

Para entender la acción del trabajo en frío, deberá tenerse cierto conocimiento sobre la estructura de los metales. Todos los metales son de naturaleza cristalina y están constituidos por granos de diferentes tamaños y de formas irregulares. Esto se puede ver claramente bajo el microscopio, si el metal ha sido pulido y atacado con reactivos en forma conveniente. Cada grano está formado por átomos distribuidos ordenadamente en una forma conocida como estructura cristalina. La orientación de los átomos en un grano determinado, es uniforme, pero diferente de la de los granos adyacentes. Cuando el material se trabaja en frío, los cambios resultantes en su configuración le proporcionan cambios notables en la estructura del grano.

Los cambios estructurales que tienen lugar, son la fragmentación del grano, movimiento de los átomos y distorsión de la estructura cristalina. Los planos de deslizamiento se desarrollan a través de la estructura cristalina en los puntos en los cuales los lazos de atracción atómica son más débiles y grupos completos de átomos son desplazados. Cuando tiene lugar el deslizamiento, no cambia la orientación de los átomos en la estructura cristalina. En los casos en que éstos son reorientados, aparece un fenómeno conocido como maclaje.

El maclaje es una segunda manera por la cual se deforman plásticamente los metales. El maclaje consiste en la deformación de una sección completa de un cristal, la cual se produce por el movimiento simultáneo o desviación de todos los átomos respecto a un plano (llamado plano de maclaje) para formar una imagen simétrica, la red cristalina a un lado del plano queda orientada en forma diferente a la red cristalina del otro lado, como si fuera una imagen vista en un espejo, pero las estructuras cristalinas, tienen idénticas formas a las de las adyacentes. El deslizamiento es el método más común para producir deformación en el metal.

Se requiere mucha más presión para el trabajo en frío que para el trabajo en caliente. El metal disponible en un estado más rígido, no se deforma permanentemente hasta que los esfuerzos exceden al límite elástico. Como no puede haber recrystalización de los granos en la región del trabajo en frío, no habrá recuperación por la distorsión de éstos o por su fragmentación, A medida que procede la deformación del grano, se desarrolla mayor oposición a esta acción, dando como resultado un aumento en la resistencia y dureza del metal. Este método de endurecimiento se conoce como endurecimiento por

deformación y para algunos metales, representa el único método para impartirles tal propiedad. Se han expuesto varias teorías por los metalúrgicos, como posibles para explicar por qué ocurre así. En general todas se refieren a la resistencia desarrollada en los granos por las dislocaciones, la fragmentación o la distorsión de la red cristalina.

Es muy posible que el endurecimiento por deformación sea debido a los tres fenómenos.

Lo que un metal pueda soportar de trabajo en frío depende de su composición, lo cual controla su posible ductilidad; mientras más ductilidad tenga un metal más será el trabajo en frío que se le puede impartir. Los metales puros, pueden soportar mayores deformaciones que los metales a los que se les ha añadido algún elemento de aleación, lo cual aumenta la tendencia y rapidez del endurecimiento por deformación.

Cuando el metal se deforma por el trabajo en frío, se desarrollan en su interior severos esfuerzos conocidos como esfuerzos residuales. Estos esfuerzos son indeseables y para eliminarlos, deberá recalentarse el metal abajo de la zona de su temperatura de recristalización. En dicha zona, los esfuerzos se hacen inoperantes, sin cambios apreciables en las propiedades físicas o en la estructura del grano. Un calentamiento más prolongado en la zona de recristalización, elimina los efectos del trabajo en frío y restablece al metal a sus condiciones originales. Algunas veces es deseable mantener los esfuerzos residuales en el metal. La duración por fatiga, de piezas pequeñas, se puede mejorar por martilleo con perdigones lo cual ocasiona que la superficie del metal manifieste compresión y la capa contigua, tensión.

5.3.2. Ventajas y desventajas

A muchos productos se les da acabado en frío después del laminado en caliente, para hacerlos comercialmente aceptables. Los flejes y láminas hechos en caliente son suaves, tienen imperfecciones en las superficies, falta de precisión en las dimensiones y pérdida de algunas propiedades físicas deseables.

El laminado en frío, reduce las dimensiones ligeramente, permitiendo un control dimensional más preciso. En este proceso no se tiene como resultado la oxidación superficial, por lo que se obtiene una superficie tersa y aumento de la resistencia y la dureza. En general, se obtienen los mismos resultados a partir de otras formas de trabajo en frío. Para metales que no responden a los tratamientos térmicos, el trabajo en frío es un método posible para aumentarles dureza.

El proceso también es útil en la formación de muchos artículos de materiales dúctiles, mediante la extrusión. Se requieren presiones mayores y equipo más pesado para las operaciones de trabajo en frío que para las de trabajo en caliente. Como proceso para dar forma, queda limitado a los materiales dúctiles. Si el metal es trabajado repetidamente se tiene como resultado su fragilidad, haciéndose necesaria una operación de recocido.

En general el trabajo en frío produce los siguientes efectos:

- Se desarrollan esfuerzos en el metal que permanecen, a menos que se les elimine por tratamiento térmico subsecuente.
- Se crea una distorsión o fragmentación de la estructura del grano.
- Se aumenta la resistencia y la dureza del metal con la pérdida de ductilidad correspondiente.
- Se aumenta la temperatura de recristalización para el acero.
- Se mejora el acabado en la superficie.
- Se pueden mantener tolerancias dimensionales precisas.

Los efectos que se acaban de mencionar, no se cumplen en todos los procesos de trabajo en frío. Las operaciones que implican doblado, embutido y prensado del metal, dan como resultado distorsión del grano y cambios en las propiedades físicas, mientras que el corte con cuchillas u operaciones de corte, cambian solamente la forma y el tamaño.

Clasificación de las diversas operaciones de trabajo en frío de los metales.

- Laminado
- Forja
- Estirado
 - ❖ Tubos
 - ❖ Alambre
 - ❖ Rechazado
 - ❖ Formado por estirado
- Prensado
 - ❖ Acuñaado Laminado en frío
 - ❖ Estampado o forjado en frío
- Doblado
 - ❖ Doblado en ángulo
 - ❖ Formado en rodillos
 - ❖ Doblado de placas
 - ❖ Ondulado

- Corte
 - ❖ Punzonado
 - ❖ Sacabocado
 - ❖ Perforado
 - ❖ Entallado
 - ❖ Ranurado
 - ❖ Laceteado
 - ❖ Rebabeado
- Extrusión
 - ❖ Frío
 - ❖ Impacto
- Embutido

Capítulo 6

Procesos de conformado de materiales en estado sólido

6.1. Laminado

El laminado es el proceso de reducir el espesor de una pieza larga mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos; el proceso es similar al aplastado de la masa de un rodillo de amasar a fin de reducir su espesor. La laminación, que representa el 90% de todos los metales producidos usando procesos de metalurgia, fue desarrollada por primera vez a fines del año 1500.

Este proceso se describirá mas adelante con detenimiento, ya que es el motivo principal de este trabajo de investigación.

6.2. Forja

La forja es un proceso en el que la pieza se conforma mediante fuerzas sucesivas de compresión aplicadas a través de diversos dados o matrices y herramientas. Es una de las operaciones más antiguas de trabajo de metales; se practicaba cuando menos desde el año 4000 AC, y quizá desde el año 8000 AC.

En la actualidad la forja es un proceso industrial importante, mediante el cual se hacen una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones, la industria del acero y de otros metales básicos usa la forja para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

Se puede controlar el flujo de metal y la estructura del grano para que las piezas forjadas tengan buena resistencia y tenacidad y se puedan usar con confianza en aplicaciones críticas, donde se requieren grandes resistencias. La forja se puede hacer a temperatura ambiente (forja en frío) o a temperatura elevada (forja en caliente).

La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente, dada la demanda de deformación que el proceso requiere y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, la forja en frío también es muy común para ciertos productos. La ventaja del forjado en frío es la mayor resistencia que adquiere el material, que resulta del endurecimiento por deformación pero requiere mayores fuerzas y los materiales de la pieza deben tener la ductilidad suficiente a temperatura ambiente. Las piezas forjadas en frío tienen buen acabado superficial y buena precisión dimensional. En la forja en caliente se requieren menores fuerzas, pero producen precisión dimensional y acabado superficial que no son tan buenos.

En la forja se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo que de las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forja que aplica cargas de impacto se llama martinete de forja, mientras la que aplica presión gradual se llama prensa de forja.

En general las piezas forjadas requieren operaciones adicionales de acabado, como por ejemplo un tratamiento térmico, para modificar sus propiedades, así como maquinado para llegar a tener dimensiones finales exactas.

6.2.1. Forja con martillo o de herrero

Este tipo de forja consiste en martillar el metal caliente, ya sea con herramientas manuales o entre estampas en una máquina de forja. La forja a mano como lo hace el herrero es la forma más antigua de forjar. Se usa ampliamente para trabajos de reparación o mantenimiento y en la producción de partes pequeñas, tales como ganchos, palancas, cinceles, herramientas de corte, tornillos en forma de U y artículos similares, de los cuales sólo se requieren pequeñas cantidades.

La naturaleza del proceso es tal que no se obtienen exactitudes precisas y tampoco se pueden hacer formas complicadas.

6.2.2. Forja con dado abierto

Es el proceso más sencillo de esta clase. Se puede describir al proceso con matriz abierta, como el proceso realizado sobre una pieza sólida colocada entre dos dados o matrices planas, cuya altura se reduce por compresión como se muestra en la figura 4. Este proceso también se llama recalado o forjado plano. Las superficies del dado en el forjado con matriz plana pueden tener cavidades sencillas, para producir realces relativamente sencillos.

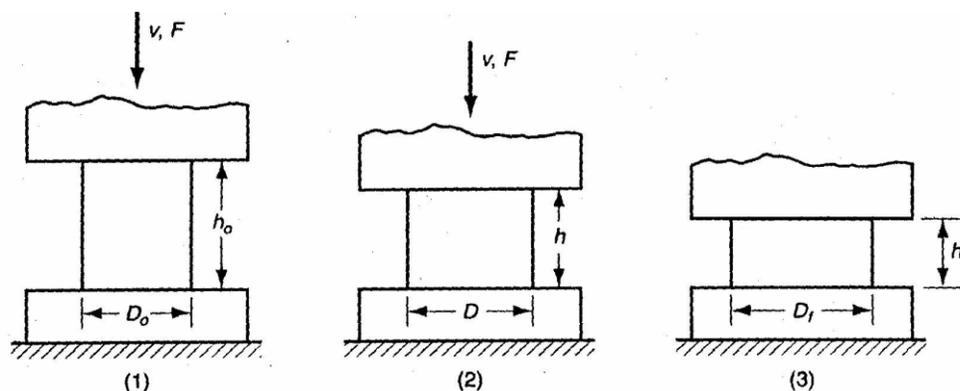


Figura 4 Deformación homogénea de una parte de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forja en dado abierto: (1) inicio del proceso con la parte de trabajo a su altura y diámetros originales, (2) compresión parcial y (3) tamaño final

La forja con dado abierto puede realizarse con dados convexos, con dados cóncavos y por secciones, como se ilustran en la figura 5. La forja con dados convexos es una operación que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una parte de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado. La forja con dados cóncavos es similar al anterior, excepto que los dados tienen superficies cóncavas.

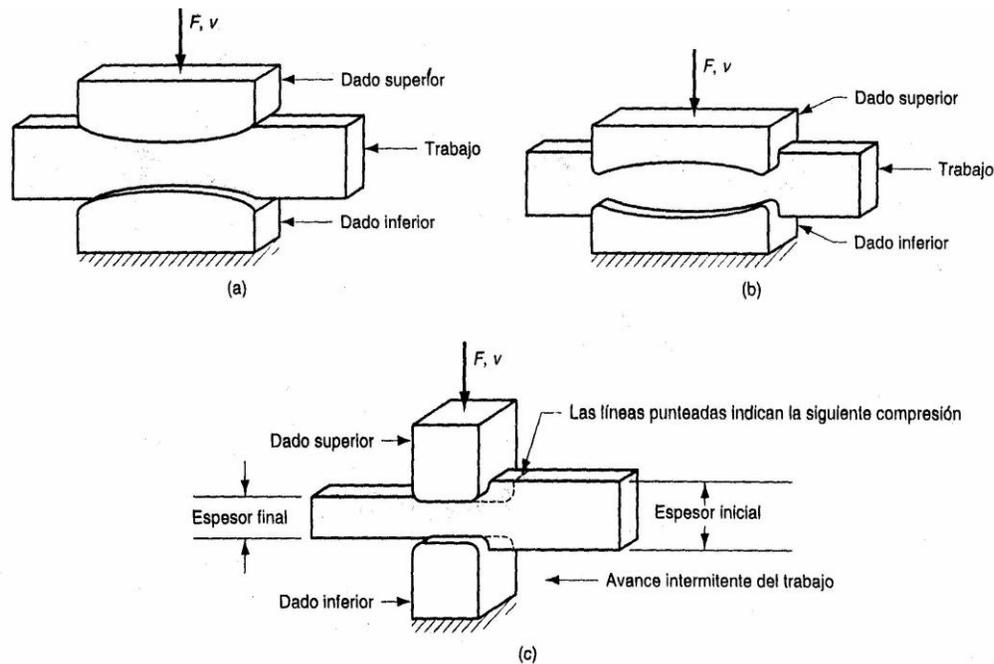


Figura 5 Varias operaciones de forja en dado abierto: (a) con dados convexos, (b) con dados cóncavos y (c) por secciones.

6.2.3. Forja con dado impresor

En este tipo de forja la pieza adquiere la forma de las cavidades del dado, al forjarse entre dos matrices perfiladas. En esta operación se tiene un flujo drástico del metal en las matrices, ocasionado por los impactos repetidos sobre el metal. Para asegurar el correcto flujo del metal durante los golpes intermitentes, la operación se divide en cierto número de etapas. Cada etapa cambia la forma gradualmente, controlando el flujo del metal hasta que se obtiene la forma final. El número de etapas requerido, varía de acuerdo con el tamaño y forma de la parte, las propiedades de forja del metal y las tolerancias pedidas.

Al realizar los golpes intermitentes el material fluye hacia fuera y forma una rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 5. Esta rebaba tiene un papel importante en el flujo del material en el estampado: es delgada, se enfría con rapidez y, por su resistencia a la fricción somete a grandes presiones al material en la cavidad de la matriz, promoviendo así el llenado de la cavidad. Este exceso de material se retira en una prensa de desbarbar inmediatamente después de la operación de forjado.

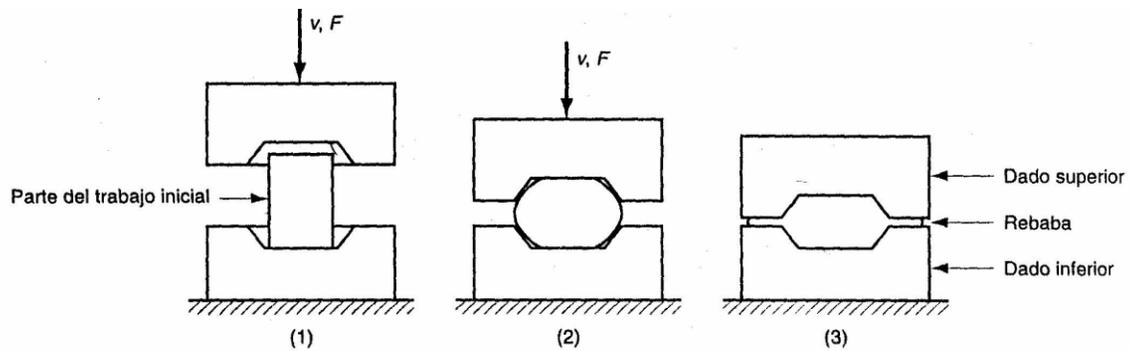


Figura 6 Secuencia en el forjado con dado impresor: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, (2) compresión parcial, (3) cerradura final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del dado

6.2.4. Forja con dado cerrado

En la terminología industrial, la forja con dado impresor se llama algunas veces forja en dado cerrado. Sin embargo, hay una distinción técnica entre forja con dado impresor y forja con dado cerrado real. La distinción es que en la forja con dado cerrado, la pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del dado durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 6. Para identificar este proceso es apropiado el término forja sin rebaba.

La forja sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que la forja con dado impresor. El parámetro más importante es que el volumen del material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad del dado dentro de muy estrechas tolerancias. Si la pieza de trabajo inicial es demasiado grande, la presión excesiva puede causar daño al dado o a la prensa. Si la pieza de trabajo es demasiado pequeña, no se llenará la cavidad. Debido a este requerimiento especial, el proceso es más adecuado en la manufactura de partes geométricas simples y simétricas, y para trabajar metales como el aluminio, el magnesio o sus aleaciones. El forjado sin rebaba se clasifica frecuentemente como un proceso de forjado de precisión.

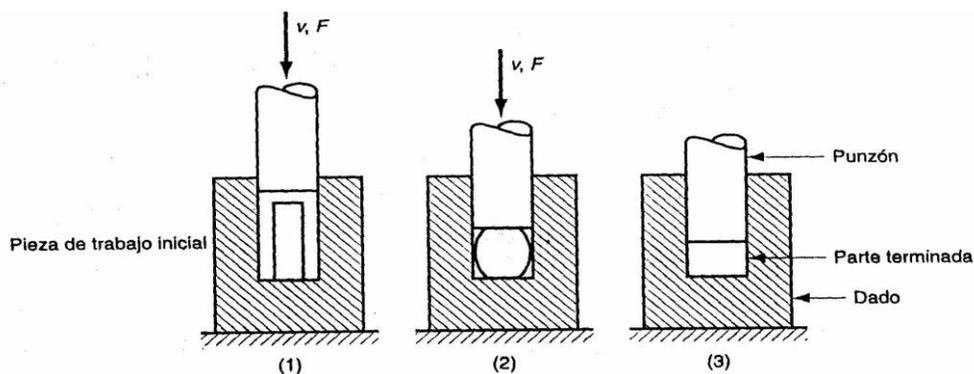


Figura 6 Forja sin rebaba: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo, (2) compresión parcial y (3) final de la carrera del punzón y cierre del dado. Los símbolos v y F indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

6.2.5.- Otros procesos de Forja

6.2.5.1. Acuñado

El acuñado es esencialmente un proceso de forja con dado cerrado, que se usa en forma específica para producir monedas, medallones y joyería. El tejo se acuña en una cavidad completamente cerrada del dado. Para producir los detalles finos de la pieza, la compresión necesaria debe ser de 5 o 6 veces la resistencia del material.

En algunos casos se pueden necesitar varias operaciones de acuñado. En este caso no se pueden aplicar lubricantes, porque pueden quedar atrapados en las cavidades del dado y, por ser incompresibles, evitan la reproducción completa de los detalles superficiales del dado.

6.2.5.2. Cabeceado

El cabeceado, encabezado o cabeceo es esencialmente una operación de recalado, que normalmente se hace en el extremo de una varilla o alambre redondos, para producir una sección transversal mayor. Entre los ejemplos característicos están las cabezas de los tornillos, pernos, remaches, clavos y demás sujetadores.

Los procesos de cabeceo se pueden hacer en frío o en caliente, en máquinas que se llaman cabeceadoras.

6.2.5.3. Penetrado

El penetrado es un proceso de indentación (sin atravesar) de la superficie de una pieza con un punzón, para producir una cavidad o impresión. La pieza puede estar confinada en una cavidad del dado o puede no estar restringida. Al penetrado puede seguir la perforación, punzonado o taladrado, para producir un orificio en la pieza. También, el penetrado se hace para producir regiones huecas en las forjas con equipo auxiliar de acción lateral.

6.2.5.4. Estampado (suajeado) con forja y forja radial

Son procesos de forja que se usan para reducir el diámetro de un tubo o barra sólida. El estampado se ejecuta frecuentemente sobre el extremo de una pieza de trabajo para crear una sección ahusada. El proceso de estampado, que se muestra en la figura 8, se realiza por medio de dados rotatorios que golpean en una pieza de trabajo radialmente hacia dentro para ahusarla conforme la pieza avanza dentro de los dados.

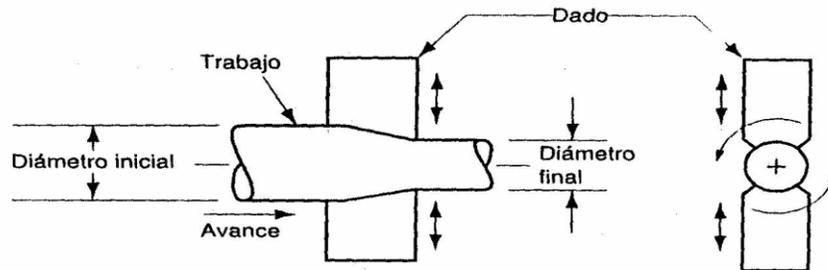


Figura 8 Proceso de estampado (suajeado) para reducir material en barra sólida; los dados giran al martillar el material de trabajo. En el forjado radial el material gira mientras los dados permanecen en posición fija martillando el material de trabajo.

Se requiere algunas veces un mandril para controlar la forma y tamaño del diámetro interno de las partes tubulares que se estampan.

La forja radial es similar al estampado en su acción contra la parte y se usa para crear formas similares (figura 9). La diferencia es que en la forja radial los dados no giran alrededor de la pieza de trabajo; en su lugar, el material de trabajo es el que gira al avanzar dentro de los dados martillo.

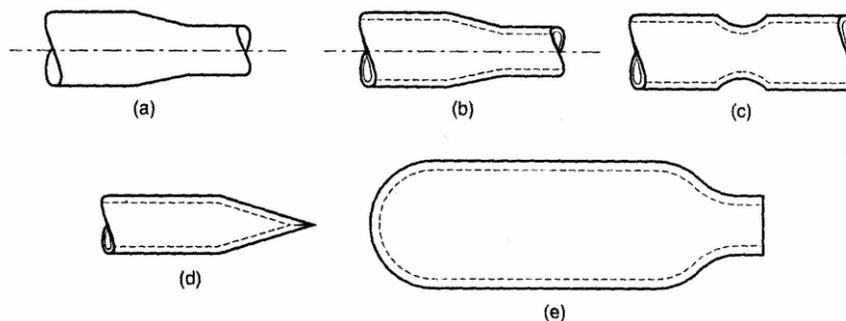


Figura 9 Ejemplos de partes hechas por estampado (a) reducción de material sólido, (b) ahusado de un tubo, (c) estampado para formar un canal en un tubo, (d) afilado de un tubo y (e) estampado del cuello en un cilindro de gas.

6.2.6. Forja con rodillos

Es un proceso de deformación que se usa para reducir la sección transversal de una pieza de trabajo cilíndrica (o rectangular), ésta pasa a través de una serie de rodillos opuestos con canales que igualan la forma requerida por la parte final. La operación típica se ilustra en la figura 10. La forja con rodillos se clasifica generalmente como un proceso de forja, aun cuando utiliza rodillos. Los rodillos no giran continuamente, sino solamente a través de una porción de revolución que corresponde a la deformación que requiere la parte. Las partes forjadas con rodillos son generalmente más fuertes y

poseen una estructura granular favorable con respecto a otros procesos competidores como el maquinado que puede usarse para producir estas mismas partes.

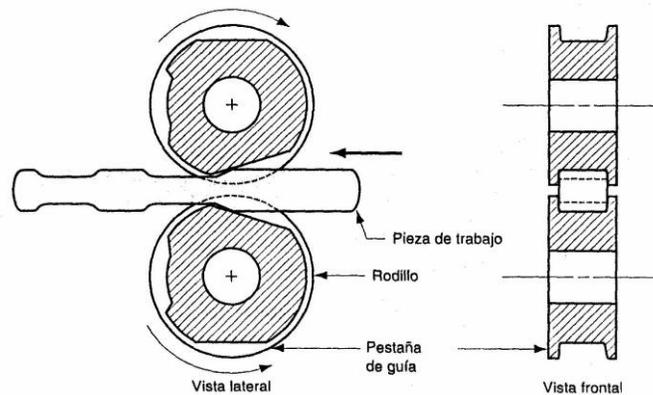


Figura 10 Forja con rodillos

6.2.7. Forjado orbital

En este proceso, la deformación ocurre por medio de un dado superior en forma de cono que presiona y gira simultáneamente sobre el material de trabajo, como se ilustra en la figura 11. El material de trabajo se comprime sobre un dado inferior que tiene una cavidad. Debido a que el eje del cono está inclinado, solamente una pequeña área de la superficie del material de trabajo se comprime en cualquier momento. Al revolver el dado superior, el área bajo compresión también gira. Estas operaciones características del forjado orbital producen una reducción sustancial en la carga requerida de la prensa para alcanzar la deformación del material del trabajo.

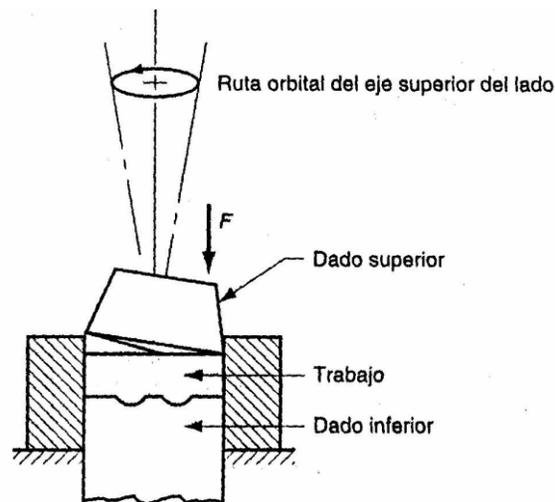


Figura 11 Forjado orbital. Al final del ciclo de deformación, el dado inferior se eleva para expulsar la parte

6.2.8. Punzonado

El punzonado en forja es un proceso de deformación en el cual se prensa una forma endurecida de acero sobre un bloque de acero suave (u otro metal suave). El proceso se usa frecuentemente para hacer cavidades de moldes para moldeo de plásticos y fundición en dados. La forma de acero endurecido se llama punzón o fresa y está maquinada con la geometría de la parte que se va a moldear. Para forzar la fresa dentro del bloque de metal suave se requiere una presión sustancial, esto se logra generalmente con una prensa hidráulica. La formación completa de la cavidad del dado en el bloque requiere frecuentemente varios pasos, cuando el bloque del material se va deformar en cantidades significativas.

6.2.9. Forja isotérmica o forja con dado caliente

La forja isotérmica es un término que se aplica a operaciones de forja en caliente, en donde los dados se calientan a la misma temperatura que la de la pieza caliente. Si se evita que la pieza de trabajo se enfríe al contacto con la superficie fría de los dados, como se hace en la forja convencional, el metal fluye más fácilmente al interior de la cavidad del dado, se mantienen su baja resistencia y gran ductilidad y la fuerza requerida para desempeñar el proceso se reduce. La forja isotérmica es más costosa que la forja convencional y se reserva para metales difíciles de forjar, como el titanio y las superaleaciones, y para partes complejas. El proceso se lleva a cabo algunas veces al vacío para evitar la oxidación rápida del material del dado, los cuales suelen ser de aleaciones de níquel o de molibdeno.

6.3. Extrusión

En el proceso de extrusión, una palanquilla, por lo general redonda, es forzada a pasar por una matriz o dado en forma parecida a como se exprime un tubo de pasta dental para ponerla en el cepillo. Se puede producir casi cualquier perfil transversal sólido o hueco con la extrusión, y con ella se obtienen piezas esencialmente semiacabadas. Como la geometría del dado o matriz no cambia durante la operación, los productos extruidos tienen sección transversal constante. Según sea la ductilidad del material, se pueden hacer la extrusión a temperatura ambiente, o a alta temperatura. Como se usa una cámara, cada lingote se extruye en forma individual, por lo que la extrusión es un proceso intermitente o semicontinuo.

Con frecuencia se combinan la extrusión con operaciones de forja, en cuyo caso se suele llamar extrusión en frío. Tiene muchas aplicaciones importantes, que incluyen tornillos y componentes para automóviles, bicicletas, motocicletas, maquinaria pesada y equipo de transporte.

Entre los productos característicos de la extrusión están los rieles para puertas corredizas, tubos de distintos perfiles transversales, perfiles estructurales y arquitectónicos y marcos para puertas y ventanas. Los productos extruidos se pueden

cortar en tramos, con lo que se transforman en piezas discretas como soportes, engranajes y perchas. Algunos ejemplos se muestran en la figura 12. Los materiales que se extruyen con frecuencia son el aluminio, cobre, acero, magnesio y plomo (los tubos de plomo se fabricaban por extrusión en el siglo XVIII). También se pueden extruir otros metales y aleaciones, con distintos grados de dificultad.



Figura 12 Ejemplos de piezas obtenidas por extrusión

6.3.1. Extrusión directa e indirecta

En el proceso básico de extrusión, llamado extrusión directa o en avance (figura 13 a), una palanquilla redonda se coloca en una cámara (recipiente) y es impulsado a través de la abertura de una matriz mediante un pistón hidráulico o ariete de prensa. La abertura del dado puede ser redonda o tener otras formas. En la extrusión indirecta (figura 13 b) el dado se mueve hacia la palanquilla.

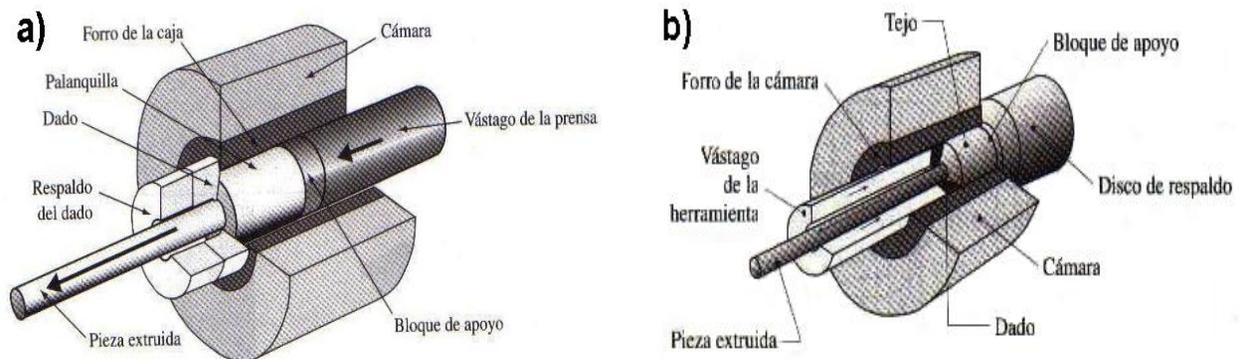


Figura 13 a) extrusión directa, b) extrusión indirecta

6.3.2. Extrusión por impacto

La extrusión por impacto se parece a la extrusión indirecta; con frecuencia se incluye en la categoría de la extrusión en frío. El punzón desciende rápidamente sobre la pieza bruta (tejo) que se extruye hacia atrás. La extrusión por impacto se realiza a altas velocidades y carreras más cortas que la extrusión convencional. Se usa para hacer componentes individuales. Como su nombre lo indica, el punzón golpea a la parte de

trabajo más que aplicar presión. La extrusión por impacto se puede llevar a cabo como extrusión hacia adelante, extrusión hacia atrás o una combinación de ambas, como se muestra en la figura 14. La extrusión por impacto se hace usualmente en frío, con varios metales, la extrusión por impacto hacia atrás es la más común. Las características de alta velocidad del proceso por impacto permiten grandes reducciones y altas velocidades de producción, de aquí su alta importancia comercial.

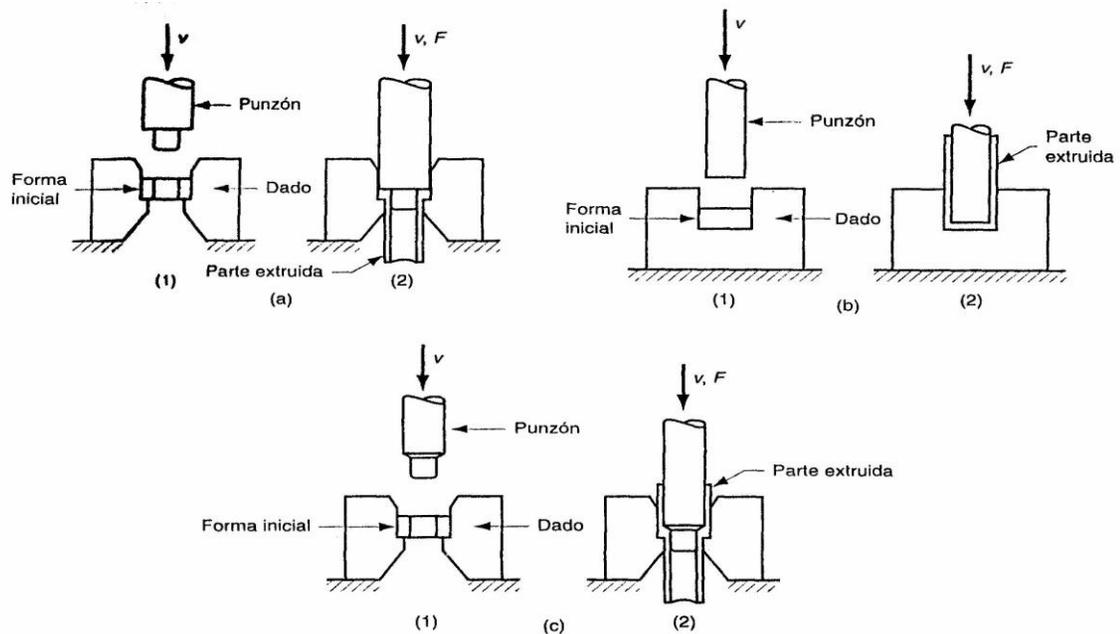


Figura 14 Varios ejemplos de extrusión por impacto: (a) hacia delante (b) hacia atrás y (c) combinación de las dos.

6.3.3. Extrusión hidrostática

Un problema de la extrusión directa es la fricción a lo largo de la interfase tocho-contenedor. Este problema se puede solucionar utilizando un fluido en el interior del contenedor y ponerlo en contacto con el tocho (figura 15), luego presionar el fluido con el movimiento hacia adelante del pistón. De tal manera que no exista fricción dentro del recipiente y se reduzca también la fricción en la abertura del dado. La fuerza del pistón es entonces bastante menor que en la extrusión directa. La presión del fluido que actúa sobre todas las superficies del tocho da su nombre al proceso. Se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Para temperaturas elevadas se necesitan fluidos y procedimientos especiales. La extrusión hidrostática es una adaptación de la extrusión directa. La presión hidrostática sobre el material de trabajo incrementa la ductilidad del material. Por consiguiente, este proceso se puede usar con metales que son demasiado frágiles para operaciones de extrusión convencional. Los metales dúctiles también pueden extruirse hidrostáticamente y es posible una alta relación de reducción en esos materiales. Una desventaja del proceso es que se requiere preparar los tochos iniciales de trabajo. El tocho debe formarse con un huso en

uno de sus extremos para ajustarlo al ángulo de entrada del dado. Éste actúa como un sello que previene fugas del fluido a través de la abertura del dado, al iniciar la presurización del recipiente.

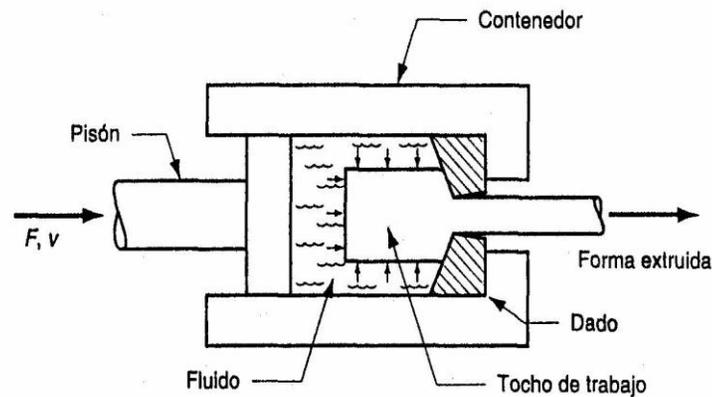


Figura 15 Extrusión hidrostática

6.3.4. Extrusión en caliente

Para los metales que no tienen ductilidad suficiente a temperatura ambiente, la extrusión se hace a temperaturas elevadas, para reducir las fuerzas requeridas. Como en todas las demás operaciones de trabajo en caliente, la extrusión en caliente tiene requisitos especiales, debidos a las altas temperaturas de operación.

Por ejemplo puede ser excesivo el desgaste del dado, y ser problemático el enfriamiento de la palanquilla caliente en la cámara, lo que causa alta deformación no uniforme. Para reducir el enfriamiento y prolongar la vida del dado, pueden precalentarse los dados de extrusión, como se hace en las operaciones de forjado en caliente.

Como la palanquilla esta caliente se forma sobre él una capa de óxido, a menos que se caliente en un horno con atmósfera inerte. Esta película puede ser abrasiva y puede afectar el patrón de líneas de flujo del material. También causa un producto extruido que puede no ser aceptable, en los casos en que el buen acabado superficial sea importante.

6.3.5. Extrusión en frío

La extrusión es un término que con frecuencia indica una combinación de operaciones, como extrusión directa y forjado. La extrusión en frío ha logrado gran aceptación en la industria, en especial para herramientas y piezas o partes de automóviles, motocicletas, electrodomésticos, etc. En este proceso se usan tramos de material cortados de barra, alambre o placa acabados en frío o laminados en caliente.

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

Mejores propiedades mecánicas, debido al endurecimiento por el trabajado, siempre que el calor generado por la deformación plástica y la fricción no haga recristalizar al metal extruido.

Buen control de tolerancias dimensionales, reduciendo la necesidad de operaciones posteriores de maquinado o acabado.

Mejor acabado superficial, en parte debido a carencia de una capa de óxido, siempre y cuando la lubricación sea efectiva.

Eliminación de la necesidad de calentar la palanquilla.

Capacidades y costos de producción que son competitivos con los de otros métodos para producir la misma pieza.

6.4. Estirado

En el contexto de los procesos de deformación volumétrica, el estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce o cambia al tirar del material a través de la abertura de un dado. Las características generales del proceso son similares a la extrusión, la diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del dado (figura 16), mientras que en la extrusión se empuja a través del dado. Aunque la presencia de esfuerzos de tensión es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante ya que el metal se comprime al pasar a través de la abertura del dado. Por esta razón, la deformación que ocurre en el estirado se llama algunas veces compresión indirecta.

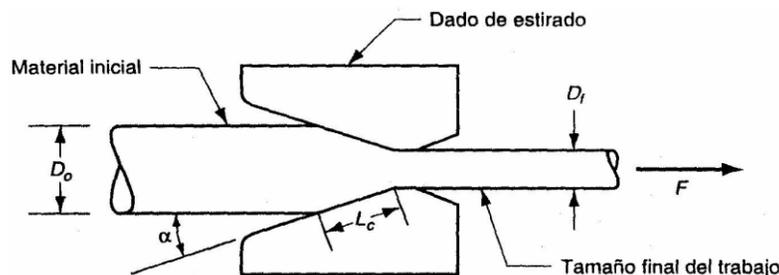


Figura 16 Estirado de barras, varillas o alambre.

La diferencia básica entre el estirado de barras y el estirado de alambre es el diámetro del material que se procesa. El estirado de barras se refiere al material de diámetro grande, mientras que el estirado de alambre se aplica al material de diámetro pequeño. En el proceso de estirado de alambres se pueden alcanzar diámetros hasta de 0.03 mm. Aunque la mecánica del proceso es la misma para los dos casos, el equipo y la terminología son de alguna manera diferentes.

El estirado de barras se realiza generalmente como una operación de estirado simple, en la cual el material se jala a través de la abertura del dado. Debido a que el material inicial tiene un diámetro grande, su forma es más bien una pieza recta que enrollada. Esto limita la longitud del trabajo que puede procesarse y es necesaria una operación

tipo lote, Por el contrario, el alambre se estira a partir de rollos de alambre que miden varios cientos (o miles) de metros de longitud y pasa a través de una serie de dados de estirado. El número de dados varía entre cuatro y doce.

El término estirado continuo (en inglés, continuous drawing) se usa para describir este tipo de operación, debido a las grandes corridas de producción que pueden realizarse con los rollos de alambre, ya que pueden soldarse a tope con el siguiente rollo para hacer la operación verdaderamente continua.

6.5. Embutido

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas en forma de copa y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón. La forma debe aplanarse contra el dado por un sujetador de formas. El proceso de embutido se muestra en la figura 17. Las piezas comunes que se hacen por embutido son latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y partes para carrocería de automóviles.

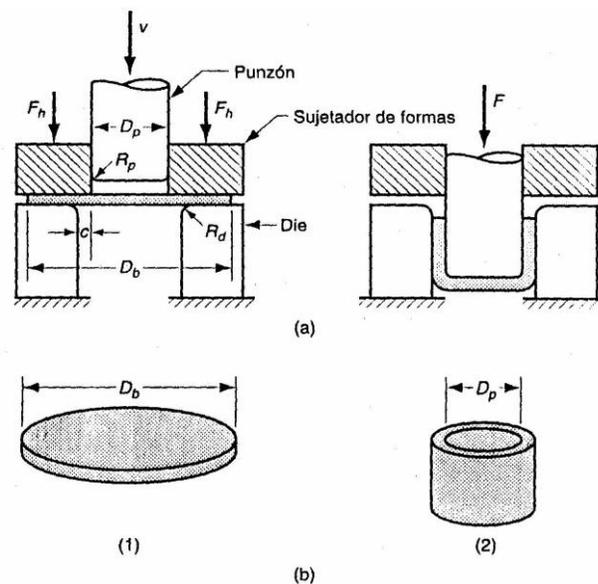


Figura 17 (a) Embutido de una parte en forma de copa: (1) inicio de la operación antes de que el punzón toque el trabajo y (2) cerca del fin de la carrera; y (b) piezas de trabajo correspondientes: (1) forma inicial y (2) parte embutida.

6.5.1. Reembutido

Si el cambio de forma que requiere el diseño de la parte es demasiado severo, el formado completo de la parte puede requerir más de un paso de embutido. Al segundo paso de embutido y a cualquier otro posterior, si se necesita, se le llama reembutido, como se muestra en la figura 18. Cuando el diseño de la parte requiere una relación de

embutido demasiado grande que impide formar la parte en un solo paso, se puede ejecutar la siguiente sugerencia general para la reducción, que se puede hacer en cada operación de embutido, para el primer embutido, la reducción máxima de la forma inicial debe ser de 40 a 45%; para el segundo embutido (primer reembutado), la reducción máxima debe ser 30%; para el tercer embutido (segundo reembutado), la reducción máxima debe ser 16%.

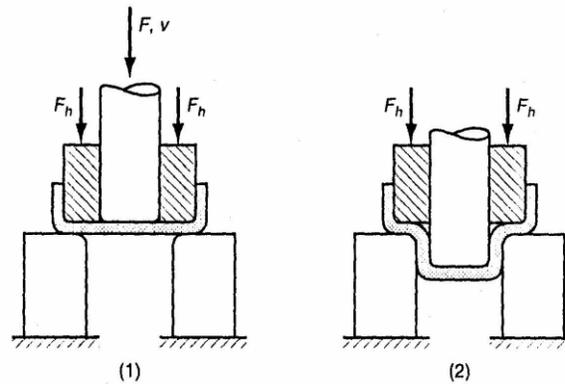


Figura 18 Reembutado

6.6. Rechazado

El rechazado es un proceso de formado de metal en el cual se da forma a una parte de simetría axial sobre un mandril u horma mediante una herramienta redondeada o rodillo. La herramienta o el rodillo aplican una presión muy localizada (en casi un punto de contacto) para deformar el material de trabajo por medio de movimientos axiales o radiales sobre la superficie de la parte. Las formas geométricas típicas que se producen por rechazado incluyen conos, hemisferios, tubos, copas y cilindros. Hay tres tipos de operaciones de rechazado: 1) rechazado convencional, 2) rechazado cortante y 3) rechazado de tubos.

6.6.1. Rechazado convencional

El rechazado convencional es la operación de rechazado básico. Un disco de lámina se sostiene en el extremo de un mandril rotatorio que tiene la forma interior deseada para la parte final, mientras la herramienta o rodillo deforma el metal contra el mandril. El proceso de rechazado convencional se muestra en la figura 19.

En algunos casos la forma inicial puede ser diferente a la de un disco plano. El proceso requiere una serie de pasos para completar el formado de la parte. La posición de la herramienta la puede controlar un operador usando un punto de apoyo fijo para el apalancamiento necesario, o un método automático como control numérico. Estas alternativas son rechazado manual y rechazado mecanizado.

El rechazado mecanizado tiene la capacidad de aplicar fuerzas más altas a la operación, lo cual representa ciclos más rápidos y mayor capacidad en cuanto al tamaño del trabajo. También se logra un mejor control del proceso que en el rechazado manual. El rechazado convencional dobla el metal alrededor de un eje circular en movimiento para conformar el metal de acuerdo a la superficie externa de un mandril de simetría axial. El espesor del metal permanece sin cambio (más o menos) respecto al espesor de la forma inicial.

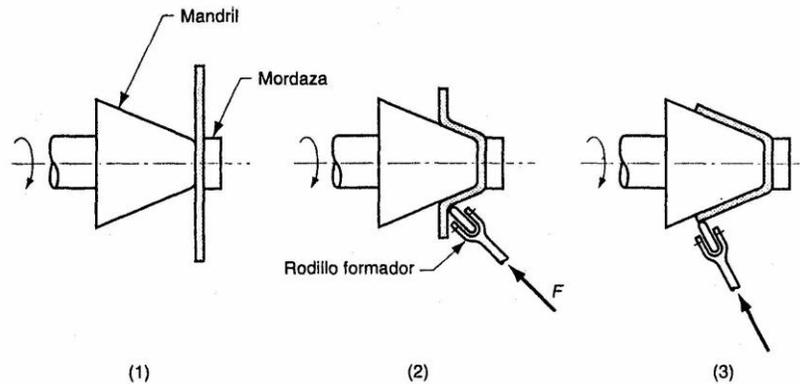


Figura 19 Rechazado convencional: (1) disposición al iniciar el proceso, (2) durante el rechazado y (3) proceso completo.

6.6.2. Rechazado cortante

En el rechazado cortante se forma la parte sobre el mandril por medio de un proceso de deformación cortante en el cual el diámetro exterior permanece constante y el espesor de la pared se reduce, como se muestra en la figura 20. Esta deformación cortante y el consiguiente adelgazamiento del metal distinguen este proceso de la acción de doblado en el rechazado convencional. Se han usado otros nombres para el rechazado cortante, como torneado de flujo, formado por corte y forja rotatoria. El proceso se ha aplicado en la industria aeroespacial para formar partes grandes como los conos para la nariz de los cohetes.

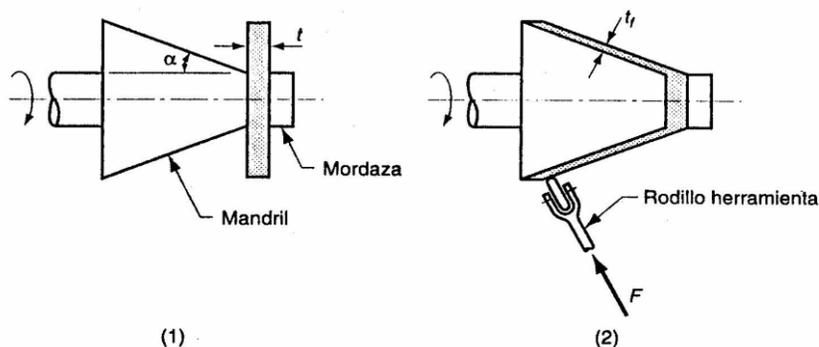


Figura 20 Rechazado cortante: (1) disposición y (2) proceso terminado

6.6.3. Rechazado de tubos

El rechazado de tubos se usa para reducir el espesor de las paredes y aumentar la longitud de un tubo mediante la aplicación de un rodillo al material de trabajo sobre un mandril cilíndrico. El rechazado de tubos es similar al rechazado con deformación cortante salvo que la pieza inicial es un tubo en lugar de una forma plana. La operación se puede realizar aplicando el rodillo externamente contra el trabajo (usando un mandril cilíndrico en el interior del tubo, figura 21 a) o internamente (usando un dado alrededor del tubo, figura 21 b). También es posible formar perfiles en las paredes del cilindro (figura 21 c), controlando el recorrido del rodillo al moverse tangencialmente a lo largo de la pared.

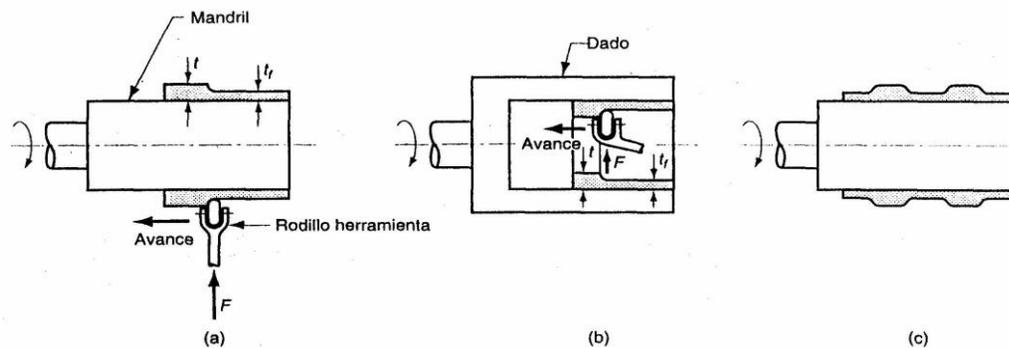


Figura 21 Rechazado de tubos (a) externo, (b) interno y (c) perfilado.

Capítulo 7

Laminado

El laminado es un proceso de deformación en el cual el metal pasa entre dos rodillos y se comprime mediante fuerzas de compresión ejercidas por los rodillos. Los rodillos giran, como se ilustra en la figura 22, para jalar el material y simultáneamente apretarlo entre ellos. Un proceso estrechamente relacionado es el laminado de perfiles, en el cual una sección transversal cuadrada se transforma en un perfil, como por ejemplo un perfil I.

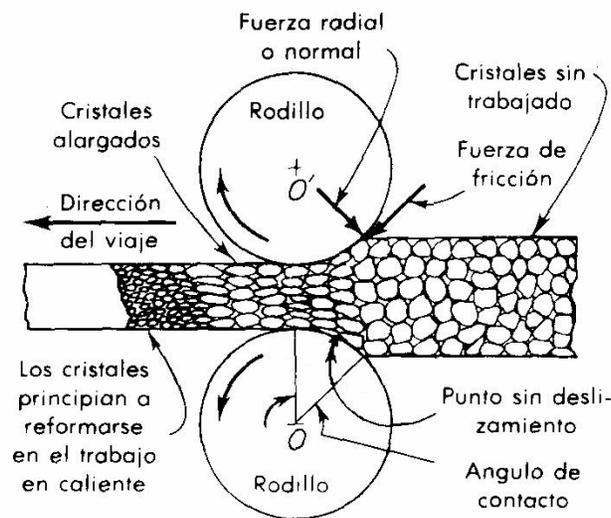


Figura 22 Proceso de laminación, específicamente laminado plano.

La mayoría de los procesos de laminado involucra una alta inversión de capital, ya que se requiere equipos pesados llamados molinos laminadores o de laminación. El alto costo de inversión requiere que la producción sea en grandes cantidades y por lo general artículos estándares como láminas y placas.

La mayoría de los productos laminados se realizan en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama laminado en caliente. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse dentro de tolerancias adecuadas, y la superficie presenta una capa de óxido característica.

Examinemos la secuencia de pasos en un molino de laminación para ilustrar la variedad de productos que pueden hacerse. El trabajo empieza con un lingote de acero fundido que permanece en la lingotera hasta que su solidificación es casi completa. Mientras permanece caliente, el lingote se coloca en un horno de gas, en donde permanece por

muchas horas hasta alcanzar una temperatura de trabajo uniforme en toda su extensión, para que pueda fluir consistentemente durante el laminado.

Para el acero, la temperatura de laminación es alrededor de 1200 °C. La operación de calentamiento se llama recalentada, y los hornos de gas en los cuales se lleva a cabo se llaman fosas de recalentamiento

El lingote recalentado pasa al molino de laminación, donde se lamina para convertirlo en una de las tres formas intermedias llamadas lupias, tochos o planchas. Una lupia tiene una sección transversal cuadrada de 150 mm de lado o mayor. Un tocho se lamina a partir de una lupia, es de sección transversal cuadrada de 38 mm por lado o mayor. Una plancha se lamina a partir de un lingote o de una lupia y, tiene una sección rectangular de 250 mm de ancho o más, y un espesor de 38 mm o más. Estas formas intermedias se laminan posteriormente para convertirlas en productos finales, como se muestra en la figura 23.

Las lupias se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para ferrocarril. Los tochos se laminan para producir barras y varillas. Estas formas son la materia prima para el maquinado, estirado de alambre, forjado y otros procesos de trabajo de metales. Las planchas se laminan para convertirlas en placas, láminas, tiras y hojas.

Las placas laminadas en caliente se usan para la construcción de barcos, puentes, calderas, estructuras soldadas para maquinaria pesada, tubos y tuberías, y muchos otros productos. Las placas pueden llegar a tener hasta un espesor superior de 0.3 m (12 pulg) para los apoyos de las grandes calderas, 150 mm (6 pulg) de espesor para los recipientes de los reactores y 100 - 125 mm (4 - 5 pulg) para los buques y los tanques de guerra.

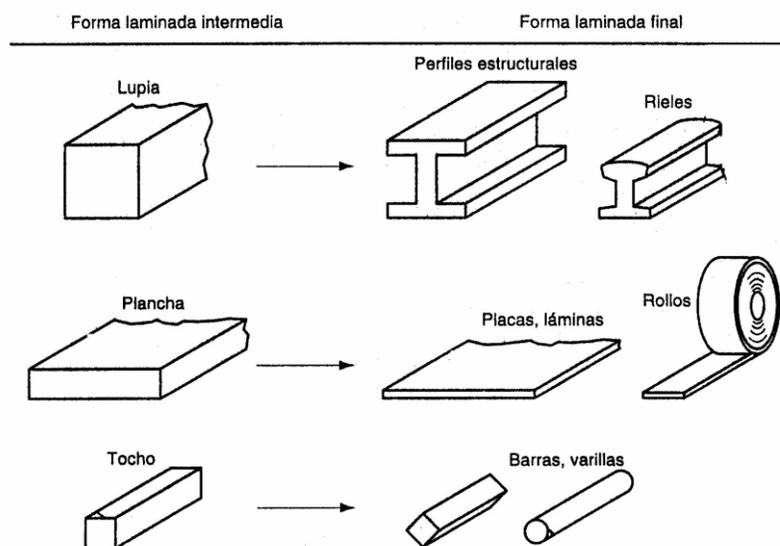


Figura 23 Algunos productos de acero hechos en molino de laminación.

Las hojas comúnmente tienen menos de 6 mm de espesor; se fabrican para manufacturar materias primas intermedias como piezas planas o cinta en rollo para procesamiento posterior en varios productos. Se utilizan en las carrocerías de automóvil y fuselajes de avión, en enseres domésticos, en recipientes para alimentos y bebidas, y en equipos para cocinas y oficinas.

7.1 Laminado plano

En la figura 24 se muestra una ilustración esquemática del proceso de laminado plano. Una tira de espesor h_0 entra al espacio de laminación donde un par de rodillos en rotación la reduce a un espesor h_f , cada uno de los rodillos es movido a través de su propia flecha por motores eléctricos. La velocidad superficial de los rodillos es V_r . La velocidad de la tira se incrementa de su valor de entrada V_0 a través del espacio de laminación, de la misma manera que el fluido se ve obligado a moverse más rápido al pasar por un canal convergente.

La velocidad de la tira es máxima a la salida del espacio de laminación; la identificamos como V_f . Dado que la velocidad superficial del rodillo es constante, existe un deslizamiento relativo entre el rodillo y la tira a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación L .

En un punto a lo largo del tramo de contacto, conocido como el punto neutro o punto de no deslizamiento N , la velocidad de la tira es la misma que la del rodillo. A la izquierda de ese punto, el rodillo se mueve más rápido que la tira; a la derecha del mismo, la tira se mueve con mayor velocidad que el rodillo. Por tanto, las fuerzas de fricción que se oponen al movimiento actúan sobre la tira según se muestra.

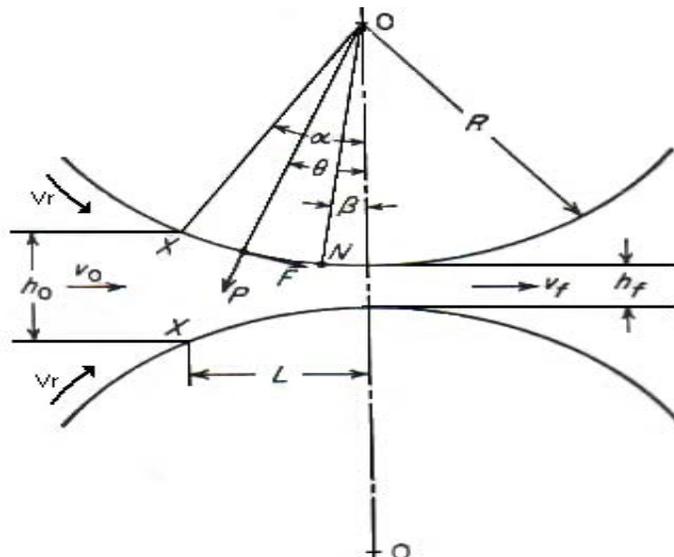


Figura 24 Vista lateral del laminado plano indicando el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

7.2 Análisis

El laminado plano involucra el laminado de planchas, tiras, láminas, hojas y placas, partes de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor.

En el laminado plano, se presiona el material de trabajo entre dos rodillos de manera que su espesor se reduce

$$\Delta h = h_0 - h_f \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

Δh = diferencia de espesor, (mm);

h_0 = espesor inicial, (mm)

h_f = espesor final, (mm)

Algunas veces se expresa la diferencia Δh como una fracción del espesor inicial h_0 llamada reducción r

$$r = \frac{\Delta h}{h_0} \dots\dots\dots(4)$$

Cuando se usa una serie de operaciones de laminado la reducción se toma como la suma de los adelgazamientos dividida entre el espesor original.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama esparcido y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre espesor y ancho, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra a los rodillos

$$h_0 w_0 l_0 = h_f w_f l_f \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

w_0, l_0 son ancho y largo iniciales de trabajo (mm),

w_f, l_f son ancho y largo finales de trabajo (mm).

De igual forma, la velocidad volumétrica del material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$$h_0 w_0 V_0 = h_f w_f V_f \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

V_0, V_f son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo, a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo α , el cual es llamado ángulo de contacto, y esta definido por:

$$\mu = \tan \alpha \dots\dots\dots(7)$$

Ya que la componente horizontal de la fuerza normal es $p \text{ sen } \alpha$ y la componente horizontal de la fuerza de fricción es $F \text{ cos } \alpha$ y sabiendo que $F = \mu p$, igualando estos dos primeros términos y despejando obtenemos la ecuación anterior.

Cada rodillo tiene un radio R y debido a su velocidad de rotación tiene una velocidad en la superficie V_r . Esta velocidad es mayor que la velocidad de trabajo V_0 y menor que la velocidad de salida V_f . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos, Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad de trabajo se iguala a la velocidad del rodillo. Este punto se llama punto de no deslizamiento, también conocido como punto neutro. A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos con fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del deslizamiento hacia adelante, este término se usa en laminado y se define como:

$$s = \frac{V_f - V_r}{V_r} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

s = deslizamiento hacia adelante,

V_f = velocidad final del trabajo (salida), (m/seg);

V_r = velocidad del rodillo (m/seg).

La deformación real, experimentada por el material de trabajo, se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación,

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \dots\dots\dots(9)$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de cedencia promedio $\bar{\sigma}$ aplicado al material de trabajo en el laminado plano. Recordando la ecuación

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots(10)$$

Se tiene que:

$$\bar{\sigma} = \frac{K\varepsilon^n}{1+n} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

- K = es el valor del esfuerzo cuando la deformación es igual a uno
- ε = deformación
- n = coeficiente de endurecimiento por deformación

También podemos calcular el esfuerzo de cedencia promedio de la siguiente manera

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

- σ_1 = es el flujo de esfuerzos a la entrada de los rodillos
- σ_2 = es el flujo de esfuerzos a la salida de los rodillos

El esfuerzo de cedencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente de fricción, la fuerza de compresión de los rodillos, multiplicada por este coeficiente de fricción da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el material de trabajo.

Los rodillos tiran del material hacia adentro del espacio de laminación a través de una fuerza de fricción neta sobre el material. En el lado de la izquierda, la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. En consecuencia la fuerza de fricción a la izquierda del punto neutro debe ser más elevada que la fuerza de fricción a la derecha.

Aunque la fricción es necesaria para la laminación de los materiales, se disipa energía para vencerla; por lo que el incrementar la fricción significa aumentar los requerimientos de fuerzas y de potencia. Además, una elevada fricción podría dañar la superficie del producto laminado. Se tiene que llegar a un punto medio, uno que consiga bajos coeficientes de fricción mediante el uso de lubricantes efectivos.

El laminado no sería posible sin estas diferencias. La diferencia de espesor máxima posible Δh_{\max} , que se define como la diferencia entre los espesores inicial y final, es una función del coeficiente de fricción μ , y el radio del rodillo R :

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R \dots\dots\dots(13)$$

Donde

Δh_{\max} = diferencia máxima, (mm)

μ = coeficiente de fricción

R = radio del rodillo, (mm)

La ecuación indica que si la fricción fuera cero, el adelgazamiento podría ser cero y esto haría imposible la operación de laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores como lubricación, material de trabajo y temperatura de laminado, en la siguiente tabla se dan algunos valores típicos de coeficientes de fricción según el tipo de laminado.

Tipo de laminado	Coefficiente de Fricción μ
Laminado en frío	0.1
Laminado en tibio	0.2
Laminado en caliente	0.4

Valores típicos de coeficientes de fricción

El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada adherencia en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre frecuentemente en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo V_r y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos.

Si el efecto de la fricción externa e interna de cizallamiento son despreciadas, la distribución media de la presión es igual al flujo de esfuerzo perfectamente plástico.

$$p_m = \frac{F}{A} = \frac{F}{L w} \dots\dots\dots(14)$$

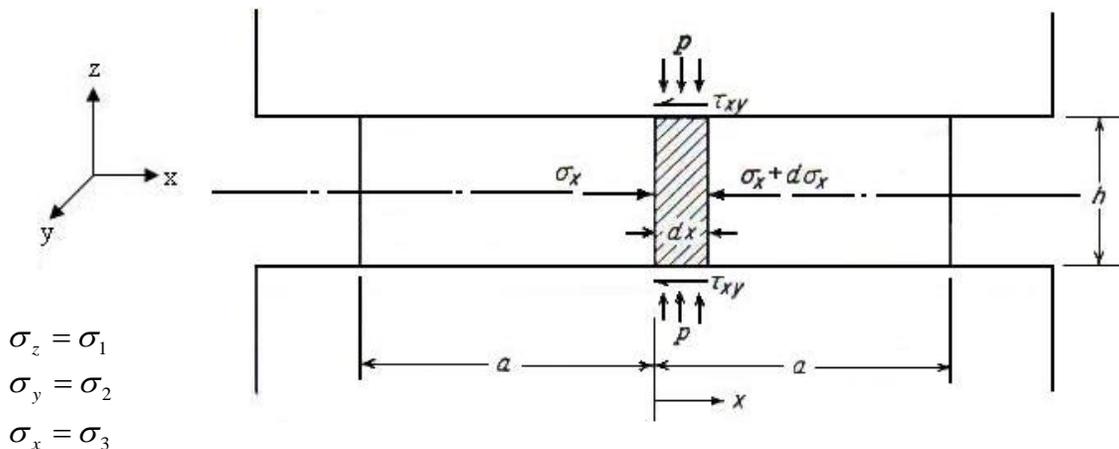


Figura 25 Diagrama de esfuerzos actuando sobre una plancha en deformación plana

7.2.1. Determinación de las presiones cuando ocurre el deslizamiento de fricción

El siguiente análisis se realiza en base a la figura 25, la cual es en un diagrama de forja, pero se utiliza la misma analogía para el proceso de laminado por lo tanto, haciendo el análisis de fuerzas en la dirección de x. tenemos:

$$\sigma_x h - (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2\tau_{xy} dx = 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\sigma_x h - \sigma_x h - d\sigma_x h - 2\tau_{xy} dx = 0 \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{2\tau_{xy}}{h} \dots\dots\dots(17)$$

El criterio de cedencia de von Mises para la condición de deformación plana está dado por

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0 = \bar{\sigma} \dots\dots\dots(18)$$

Si se define p y σ_x como esfuerzos principales de compresión positiva

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \bar{\sigma} = p - \sigma_x \dots\dots\dots(19)$$

Como $\bar{\sigma}$ no cambia con x , entonces se puede decir que $dp/dx = d\sigma_x/dx$ y sustituyendo este término en la ecuación 17, la ecuación diferencial de equilibrio se convierte en:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2\tau_{xy}}{h} \dots\dots\dots(20)$$

Según la ley de Coulomb del deslizamiento de fricción, el esfuerzo cortante esta relacionado a la presión normal, de la siguiente manera:

$$\tau_{xy} = \mu p \dots\dots\dots(21)$$

Sustituyendo la ecuación 21 del esfuerzo cortante en la ecuación 20 y despejando, se obtiene:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2 \mu}{h} dx \dots\dots\dots(22)$$

Integrando ambos lados se obtiene

$$\ln p = -\frac{2 \mu x}{h} + \ln C \dots\dots\dots(23)$$

La constante de integración C es evaluada por la condición de frontera como una superficie libre $x = a$, el esfuerzo lateral $\sigma_x = 0$ y $p = \bar{\sigma}$. Por lo tanto

$$\ln C = \ln \bar{\sigma} + \frac{2 \mu a}{h} \dots\dots\dots(24)$$

La ecuación para la variación de la presión por el deslizamiento de fricción esta dada por:

$$p = \bar{\sigma} e^{2 \mu (a-x) / h} \dots\dots\dots(25)$$

Como μ usualmente es un número muy pequeño, se puede usar la expansión $e^{(y)} = 1 + y + y^2 / 2! + y^3 / 3! + \dots$, por lo que se puede simplificar la ecuación anterior

$$p = \bar{\sigma} \left(1 + \frac{2 \mu (a-x)}{h} \right) \dots\dots\dots(26)$$

Sustituyendo $L = 2a$ en la ecuación 26, ya que L es la longitud de contacto entre el rodillo y el material de trabajo en el proceso de laminado, se obtiene

$$p = \bar{\sigma} \left(1 + \frac{\mu (L-x)}{h} \right) \dots\dots\dots(27)$$

La presión media esta dada por

$$p_m = \int_0^a \frac{p dx}{a} = \frac{h}{2 \mu a} \bar{\sigma} (e^{(2 \mu a / h)} - 1) \dots\dots\dots(28)$$

Sustituyendo $L = 2a$ en la ecuación 28 se convierte en

$$p_m = \frac{h}{\mu L} \bar{\sigma} (e^{(\mu L / h)} - 1) \dots\dots\dots(29)$$

7.2.2. Determinación de las presiones cuando ocurre la adherencia de fricción

La aproximación de la ecuación (27) para la variación en la presión a lo largo de la cara del rodillo, la máxima y la presión media obtenidas para el caso donde la adherencia de fricción ocurre, el coeficiente de fricción puede ser tomado aproximadamente como $\mu \cong 0.5$ para la compresión en el laminado en caliente del material de trabajo.

$$p = \bar{\sigma} \left(1 + \frac{L-x}{2h}\right) \dots\dots\dots(30)$$

$$p_{\max} \cong \bar{\sigma} \left(1 + \frac{L}{2h}\right) \dots\dots\dots(31)$$

$$p_m \cong \bar{\sigma} \left(1 + \frac{L}{4h}\right) \dots\dots\dots(32)$$

7.2.3. Fuerza

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza F de compresión requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado sobre el área de contacto rodillo-material de trabajo. Esto se puede expresar como sigue:

$$F = w \int_0^L p \, dL \dots\dots\dots(33)$$

Donde:

F = fuerza de laminado (N)

w = ancho del material de trabajo que se está laminando, (mm)

p = presión de laminado, (MPa);

L = longitud de contacto entre el rodillo y el material de trabajo, (mm).

La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones, en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La siguiente figura da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se desvanece a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se corre hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

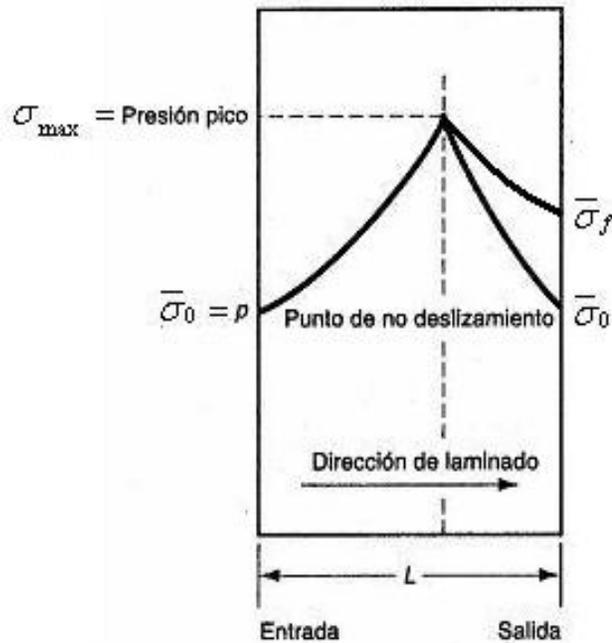


Figura 26 Variaciones típicas de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 33, es la fuerza de laminación F .

Dado que los rodillos aplican presión sobre el material a fin de reducir su espesor, se necesita de una fuerza perpendicular al arco de contacto. Nótese en la figura 27, que esta fuerza del rodillo, F se muestra perpendicular al plano de la tira, en vez de a un ángulo. Se utiliza esta alineación porque el arco de contacto comúnmente es muy pequeño en comparación con el radio del rodillo, por lo que podemos suponer sin error significativo que la fuerza del rodillo es perpendicular.

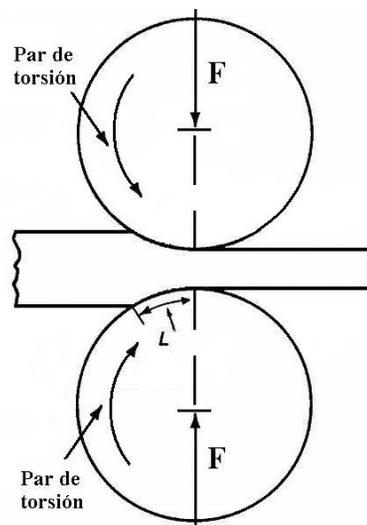


Figura 27 Fuerzas en los rodillos

Se puede calcular una aproximación de la fuerza del rodillo en el laminado plano de los resultados obtenidos por la ecuación 33, despreciando la fricción por el momento y tomando la presión como el esfuerzo de cedencia promedio que experimenta el material durante el proceso de laminado y el área de contacto. Esto es:

$$F = p_w L = \bar{\sigma} w L \dots \dots \dots (34)$$

Donde:

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo de cedencia promedio de la ecuación 5, (MPa)

w = ancho del material de trabajo que se está laminando, (mm)

L = longitud de contacto entre el rodillo y el material de trabajo, (mm).

El esfuerzo de cedencia promedio en la deformación plana es usado cuando no hay cambios en el ancho del material. Cuando la extensión ocurre entonces el esfuerzo de cedencia uniaxial debe ser usado.

7.2.4 Determinación de la fuerza cuando existe la influencia del deslizamiento de fricción

Para la situación usual de las condiciones de la deformación plana, la influencia del deslizamiento de fricción sobre el laminado puede ser introducido considerando el análisis de la presión media en la ecuación 29 para la compresión de deformación plana de una plancha. Por lo tanto la fuerza del rodillo esta dada por:

$$F = p_m w L = \left[\frac{\bar{h}}{\mu L} \bar{\sigma} (e^{\mu L / \bar{h}} - 1) \right] w L \dots \dots \dots (35)$$

\bar{h} es el espesor promedio entre la entrada y la salida del espacio de laminación de los rodillos

La longitud de contacto se puede aproximar mediante:

$$L = \sqrt{R(h_0 - h_f)} = \sqrt{R\Delta h} \dots \dots \dots (36)$$

7.2.5. Ecuación de Ekelund

Ekelund desarrolló la siguiente ecuación para el laminado en caliente en 1927, en la cual se tomó en cuenta la influencia de la velocidad de deformación sobre el esfuerzo de cedencia promedio.

$$F = \left[\bar{\sigma} + \frac{2 V_r \eta \sqrt{\Delta h / R}}{h_0 + h_f} \right] \sqrt{R\Delta h} \left[1 + \frac{1.6 \mu \sqrt{R\Delta h - 1.2 \Delta h}}{h_0 - h_f} \right] w \dots \dots \dots (37)$$

Donde:

V_r = velocidad superficial del rodillo, (m/s)

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo de cedencia promedio, (KN/mm²)

η = viscosidad del acero caliente

μ = coeficiente de fricción

η y μ están definidos en función de la temperatura como se muestra a continuación:

$$\eta = 1373 - 0.098 T_{em} \quad \text{y} \quad \mu = 0.84 - 0.0004 T_{em} \dots\dots\dots(38)$$

La temperatura está dada en °C.

Como se puede observar existen tres formas para calcular la fuerza de los rodillos F , el uso de cada una de las fórmulas dependerá de las condiciones y requerimientos de cada problema dado en el laminado.

7.2.6. Momento de torsión

El momento de torsión T en el laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el material de trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L . Entonces, el momento de torsión para cada rodillo está dado por:

$$T = 0.5 F L \dots\dots\dots(39)$$

7.2.7. Potencia

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $\pi N/30$, donde N = velocidad de rotación del rodillo en (rev/min).

Así, la potencia para cada rodillo es:

$$P' = \frac{\pi N T}{30} \dots\dots\dots(40)$$

Al sustituir la ecuación 39 en la ecuación 40 para la potencia de un rodillo, y al duplicar el valor, ya que un molino de laminado posee dos rodillos, se obtiene la siguiente expresión.

$$P = \frac{\pi N F L}{30} \dots\dots\dots(41)$$

Donde

P = potencia (W);

N = velocidad de rotación (rev/min);

F = fuerza de laminado, (N);

L = longitud de contacto, (m).

7.2.8. Ejemplo 1: laminado plano en frío

Una tira con un ancho de 500 mm y 25 mm de espesor se alimenta a través de un molino laminador de dos rodillos de 350 mm de radio cada uno. El espesor de material de trabajo se reduce a 22 mm en un paso, a una velocidad de 5 rad/seg. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por $K = 276$ MPa y $n = 0.15$, se asume que el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es 0.12.

Determine si la fricción es suficiente para realizar la operación de laminado. Si es así, calcule la fuerza de laminado, el momento de torsión y la potencia en caballos de fuerza.

Solución:

La reducción del espesor Δh que se intenta en esta operación de laminado es:

$$\Delta h = 25 - 22 = 3 \text{ mm}$$

De la ecuación 13 el Δh_{\max} posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R = (0.12^2)(350) = 5.04 \text{ mm}$$

Como el adelgazamiento permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible la operación de laminado. Para calcular la fuerza de laminado necesitamos la longitud de contacto L y el esfuerzo de cedencia promedio $\bar{\sigma}$. La longitud de contacto está dada por la ecuación 36.

$$L = \sqrt{R(h_0 - h_f)} = \sqrt{350(25 - 22)} = 32.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\bar{\sigma}$ se determina previo cálculo de la deformación real:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} = \ln \frac{25}{22} = 0.128$$

$$\bar{\sigma} = \frac{K\varepsilon^n}{1+n} = \frac{(276 \times 10^6)(0.128^{0.15})}{(1+0.15)} = 176.3 \times 10^6 \text{ Pa}$$

La fuerza de laminado se determina por la ecuación 34.

$$F = \bar{\sigma}_w L = (176.3 \times 10^6) (0.5) (32.4 \times 10^{-3}) = 2856.06 \times 10^3 N = 642.099 \times 10^3 lb$$

El momento de torsión requerido para mover cada rodillo está dado por la ecuación 39:

$$T = 0.5 F L = 0.5 (2856.06 \times 10^3) (32.4 \times 10^{-3}) = 46.268 \times 10^3 Nm$$

Y la potencia se obtiene de la ecuación 40:

$$P = \frac{\pi N F L}{30} = \frac{\pi (47.75) (2856.06 \times 10^3) (32.4 \times 10^{-3})}{30} = 462.717 \times 10^3 W$$

Convirtiendo esto a caballos de fuerza (un caballo de fuerza = 745.7 W)

$$P = 462.717 \times 10^3 W \left(\frac{1 HP}{745.7 W} \right) = 620.51 HP$$

7.2.9. Ejemplo 2: laminado en caliente

Calcule la fuerza de laminado de una placa de acero si el laminado es en caliente y se requiere reducir un 30 por ciento el grosor inicial de la placa el cual es de 1.5 in, usando un rodillo de 20 in de diámetro. La plancha tiene 20 in de ancho. Asuma que $\mu = 0.30$. El flujo de esfuerzos en la deformación plana es 16 ksi en la entrada y 20 ksi en la salida del espacio de laminación incrementando su velocidad.

Solución

Primeramente obtenemos la reducción de grosor, el cual es el 30%:

$$\Delta h = 1.5 in (0.3) = 0.45 in$$

Por lo tanto, obtenemos h_f :

$$h_f = h_0 - \Delta h = 1.5 - 0.45 = 1.05 in$$

Para obtener la fuerza del rodillo de acuerdo a la ecuación 35, se calculan los siguientes parámetros:

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2} = \frac{1.5 + 1.05}{2} = 1.275 in \quad \text{Espesor promedio}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{16 + 20}{2} = 18 ksi \quad \text{Flujo de esfuerzo promedio}$$

$$\frac{\mu L}{\bar{h}} = \frac{(0.30)\sqrt{10 \times 0.45}}{1.275} = 0.499$$

De acuerdo a la ecuación 35 se obtiene la fuerza:

$$F = \left[\frac{1.275}{(0.30)\sqrt{10 \times 0.45}} (18 \times 10^3) (e^{0.499} - 1) \right] (20)\sqrt{10 \times 0.45} = 990.02 \times 10^3 \text{ lb} = 4403.61 \times 10^3 \text{ N}$$

¿Qué pasaría con la fuerza si la adherencia de fricción ocurriera?

De acuerdo a la ecuación 32, la presión media cuando ocurre la adherencia de fricción está dada por:

$$p_m = \bar{\sigma} \left(1 + \frac{L}{4\bar{h}} \right)$$

Por lo tanto sustituyendo la ecuación 32 en la ecuación 35, se obtiene:

$$F = p_m w L = (18 \times 10^3) \left(1 + \frac{\sqrt{10 * 0.45}}{4 (1.275)} \right) (20)\sqrt{10 * 0.45} = 1081.31 \times 10^3 \text{ lb} = 4809.66 \text{ N}$$

En el ejemplo 1 se puede observar que se requieren grandes fuerzas y potencias para el laminado.

Las fuerzas de laminación pueden causar deflexión y aplastamiento de los rodillos; estos cambios afectarán a su vez, de manera adversa la operación de laminado. También, el tren de laminación, incluyendo la carcaza, cuñas (tacones) y rodamientos, puede estirarse bajo las fuerzas de laminación de forma tal que el espacio de laminación se abra de manera significativa. En consecuencia los rodillos deben ajustarse más de cerca de lo calculado, para compensar esta deflexión y para obtener el espesor final deseado.

La fuerza y la potencia del laminado de una tira de ancho y material dados se pueden reducir por cualquiera de los siguientes medios:

- 1) Uso de laminado en caliente en lugar de laminado en frío para reducir la resistencia y el endurecimiento por deformación (K y n) del material de trabajo
- 2) Reducir la fricción
- 3) Reducir Δh en cada pasada
- 4) Utilización de un menor radio en el rodillo R, a fin de reducir el área de contacto
- 5) Utilizando menor velocidad de laminación N para reducir la potencia.

En el ejemplo 2, se puede observar que aunque el proceso es en caliente las fuerzas son mayores que en el ejemplo 1, siendo los valores iniciales de los dos ejemplos

similares, esto es debido a que la ecuación 34, idealmente corresponde a una situación sin fricción, mientras más elevado sea el coeficiente de fricción entre los rodillos y el material, mayor será la divergencia, y la fórmula dará como resultado una fuerza de rodillo menor a la fuerza real, explicando así la diferencia en los resultados de las fuerzas.

Así mismo se observa que en el laminado en caliente (ejemplo 2) se puede hacer una reducción de espesor mas grande que en laminado en frío (ejemplo 1), esto nos permite realizar menos pasadas y reducir el tiempo total de la elaboración del proceso.

Cuando la adherencia de fricción ocurre la fuerza es mayor debido a que el material de trabajo tiende a adherirse a los rodillos y esto incrementa el coeficiente de fricción, haciendo que el material no se pueda mover a la misma velocidad de los rodillos.

7.2.10. Tensiones longitudinales

Otro método efectivo de reducir las fuerzas de laminado es aplicando tensiones longitudinales al material de trabajo durante la laminación. Como resultado, los esfuerzos a la compresión requeridos para deformar plásticamente el material disminuyen. Dado que requieren elevadas fuerzas de laminación, estas tensiones son de importancia particular en la laminación de metales de alta resistencia. Las tensiones se pueden aplicar al material de trabajo, ya sea en la zona de entrada (tensión posterior) o en la zona de salida (tensión anterior o frontal) o en ambas. La tensión posterior se aplica a la hoja sometiendo al rollo que alimenta la hoja al espacio de laminación (el rollo de suministro) a una acción de frenado mediante algún procedimiento adecuado. La tensión anterior se aplica incrementando la velocidad de rotación del rollo tensor. La laminación se puede efectuar también con tensión anterior únicamente, sin aplicar potencia a los rodillos; este proceso se conoce como laminación Steckel.

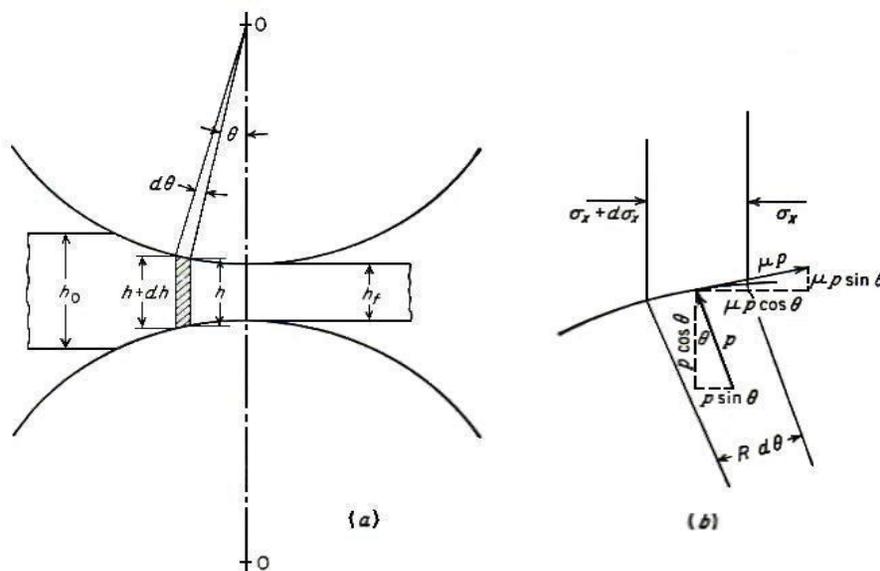


Figura 28 Análisis de fuerzas en el laminado

De acuerdo al diagrama mostrado en la figura 28 del laminado plano, se puede realizar un análisis para obtener las presiones a la entrada del punto neutro y a la salida del mismo considerando las tensiones longitudinales aplicadas al material de trabajo.

Realizando sumatoria de fuerzas, se obtiene la siguiente ecuación

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) + 2\mu p R \cos \theta - \sigma_x h - 2p R \sin \theta d\theta = 0 \dots\dots\dots(42)$$

La cual se simplifica a:

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\theta} = 2 p R (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \dots\dots\dots(43)$$

La simplificación para este problema ha sido dada por Bland y Ford.

De acuerdo a las restricciones para el laminado en frío, de condiciones de baja fricción y ángulos de contacto menores que 6°, se pueden considerar las siguientes simplificaciones $\sin \theta \approx \theta$ y $\cos \theta \approx 1$.

Así, la ecuación 43 puede escribirse de esta manera:

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\theta} = 2 p R' (\theta \pm \mu) \dots\dots\dots(44)$$

Recordando la ecuación 19 y despejando el término σ_x se obtiene:

$$\sigma_x = p - \bar{\sigma} \dots\dots\dots(45)$$

Sustituyendo la ecuación 45 en la ecuación 44, e integrando ambos lados, obtenemos ecuaciones relativamente simples para el resultado de las presiones a la entrada y a la salida del eje neutro.

Presión en el lado de entrada del eje neutro:

$$p_0 = \frac{\bar{\sigma} h}{h_0} \left(1 - \frac{\sigma_{bt}}{\bar{\sigma}_0}\right) e^{\mu(H_0 - H)} \dots\dots\dots(46)$$

Presión en el lado de salida del eje neutro:

$$p_f = \frac{\bar{\sigma} h}{h_f} \left(1 - \frac{\sigma_{ft}}{\bar{\sigma}_f}\right) e^{\mu H} \dots\dots\dots(47)$$

Donde:

σ_{bt} = tensión posterior

σ_{ft} = tensión frontal

$$H_0 = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_0}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R'}{h_0}} \alpha \right) \dots\dots\dots(48)$$

$$H = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_f}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R'}{h_f}} \theta \right) \dots\dots\dots(49)$$

R' = radio de Hitchcock, el cual se describe más adelante

7.3 Efecto de las cargas en los rodillos de laminación

Es esencial en los procesos de deformación de metales que la herramienta esté cargada sólo en forma elástica mientras la pieza de trabajo fluye plásticamente. Esta deformación elástica es, por lo general, tan pequeña que puede ignorarse, pero éste no es el caso en el laminado. Existen dos razones. Una es que las cargas y esfuerzos de laminado pueden ser muy grandes, especialmente cuando la pieza de trabajo es delgada y endurecida por trabajo. La otra es que la herramienta en el laminado comprime todo el molino, rodillo y carcasa que tiene dimensiones medibles. Esta combinación puede resultar en grandes deformaciones debidas a la deformación elástica dividida entre la extensión del bastidor del molino (resorte del molino), el aplastamiento y flexionamiento de los rodillos.

7.3.1. Flexionado o combadura de rodillos

En vista de las fuerzas que actúan sobre los rodillos, éstos sufren ciertos cambios geométricos. De la misma manera que una viga recta se flexiona bajo una carga transversal, las fuerzas de laminación tienen tendencia a flexionar los rodillos elásticamente durante el laminado como se muestra en la figura 29; mientras más elevado sea el módulo de elasticidad del material del rodillo, menor será la deflexión del mismo.

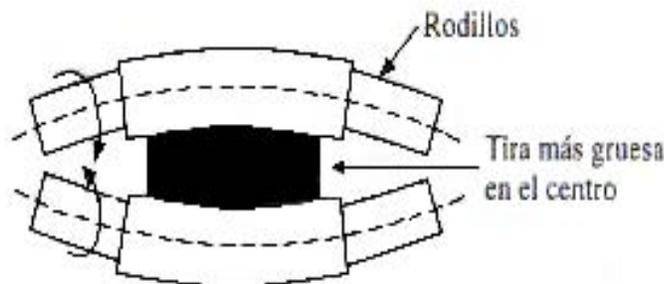


Figura 29 Flexionado de rodillos

Como resultado de la flexión del rodillo, el material de trabajo laminado tiene tendencia a quedar más grueso (generar una corona) en su centro que en sus bordes, tal forma resultará en un producto fuera de tolerancia de calibre, el problema mayor es la pérdida de forma. El metal se alarga más en sus orillas que en su línea de centro, resultando en diferentes longitudes a través del ancho.

El método usual para evitar este problema, es rectificar los rodillos de manera que su diámetro en la parte central sea ligeramente mayor que en sus bordes (dándoles una combadura). Por lo que cuando los rodillos se flexionan, su contacto a todo lo ancho del material de trabajo se endereza y el material que se está laminando tiene un espesor constante en todo su ancho.

Para el laminado de metales en hoja, el radio del punto máximo de combadura es por lo general 0.25 mm (0.01 pulg) mayor que en los bordes del rodillo. Cuando están correctamente diseñados, los rodillos con combadura producen tiras planas como se muestra en figura 30. Sin embargo, una combadura específica es únicamente correcta para una cierta carga y para un cierto ancho de tira. A fin de reducir los efectos de la deflexión, los rodillos se pueden someter a flexión, mediante la aplicación de momentos de fuerza en sus cojinetes (una técnica semejante a la flexión de un tramo de madera en sus extremos); esta manipulación simula la combadura.

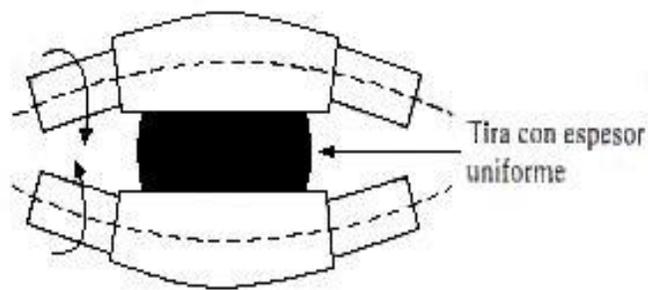


Figura 30 Rectificación de rodillos

Debido al calor generado por la deformación plástica durante la laminación, los rodillos pueden abarrilarse ligeramente (combadura térmica). A menos que sea compensado mediante algún otro procedimiento, esta situación puede producir tiras más delgadas en el centro que en los bordes. En consecuencia, la combadura total puede controlarse modificando la localización del refrigerante sobre los rodillos durante la laminación en caliente.

Un desarrollo reciente ha sido la introducción de gatos hidráulicos en los cuellos de los rodillos, de este modo se altera la combadura de los rodillos mediante una flexión a los mismos. A la fecha los resultados indican que este método tendrá mucho éxito en el control de la forma de las tiras.

7.3.2. Aplastamiento

Las fuerzas de laminación también tienden a aplastar los rodillos elásticamente, produciendo un efecto muy parecido al aplastamiento de las llantas de un automóvil. Este aplastamiento de los rodillos no es deseable ya que genera, un radio de rodillo más grande, y por tanto, un área de contacto mayor para la misma diferencia de espesor. A su vez la fuerza de laminación, se incrementa al aumentar el aplastamiento.

La pieza de trabajo al pasar entre un par de rodillos se comprime por el esfuerzo radial que se le aplica, pero la reacción se transfiere a la carcaza y a los rodamientos del molino (como se muestra en la figura 31), los cuales tienen una cedencia limitada debido a sus grandes dimensiones. Si se intenta comprimir materiales delgados y duros, la reacción se vuelve tan grande que los rodillos se deforman elásticamente y el radio de curvatura del arco de contacto se aumenta de R a R' . La magnitud de este aplastamiento depende de la magnitud del esfuerzo de reacción y de las constantes elásticas de los rodillos.

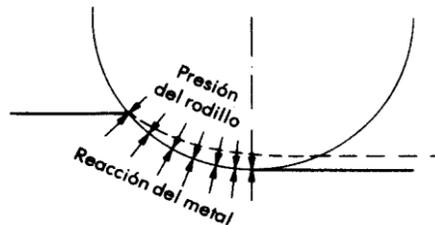


Figura 31 Reacción del metal ocasionando por el aplastamiento en los rodillos.

El análisis más usado para el aplastamiento de los rodillos se debe a Hitchcock, quien representó la distribución real de presión de acuerdo al aplastamiento elástico de los rodillos mediante una distribución elíptica. De acuerdo con este análisis el radio de curvatura aumenta de R a R' . Por lo tanto el radio de Hitchcock está dado por:

$$R' = R \left[1 + \frac{16(1-\nu^2) F}{w \pi E \Delta h} \right] \dots\dots\dots(50)$$

Donde

- R = Radio no deformado de los rodillos
- F = Fuerza aplicada por los rodillos
- ν = módulo de Poisson del material de los rodillos
- E = módulo elástico del material de los rodillos
- w = ancho del material de trabajo que se está laminando
- Δh = diferencia de espesor

7.3.3. Resorteo del molino o distorsión plástica

A la reacción de la fuerza de laminado se le llama fuerza de separación de rodillos y si éstos no estuvieran sujetos en el cabezal del molino, tenderían a separarse y la

reducción del metal no sería posible. El rodillo superior empuja hacia arriba la parte superior del cabezal, mientras que el rodillo inferior empuja hacia abajo la base del mismo cabezal. En tal virtud, el cabezal está sujeto a esfuerzos de tensión, los cuales obviamente son menores que el esfuerzo de cedencia del acero fundido con que normalmente se construyen, pero existe una deformación elástica que puede ser medida. Su magnitud depende de a) la fuerza de laminado, b) la sección transversal del cabezal, y c) de la altura del cabezal. Si la extensión de esta deformación es pequeña, se dice que el molino es rígido o duro, mientras que si es grande, se dice que el molino es suave o elástico. Esta deformación del cabezal obviamente afectará el calibre del metal producido. Por ejemplo, si la holgura del molino se fija a 3 mm antes de alimentar el material a ser laminado, la entrada del metal provee la fuerza que origina que el cabezal se estire y que la holgura se incremente a digamos, 3.05 mm. El metal producido será de 3.05 mm de espesor en lugar de 3.00 mm. Al ajuste de los rodillos antes de que entre el metal se le llama holgura pasiva de los rodillos, mientras que a la holgura real producida cuando pasa el metal a través de ella, se le llama holgura activa de los rodillos. Es importante conocer la relación entre las holguras pasiva y activa. Esta relación se denomina módulo del molino.

7.4. Control automático del calibre

El calibre de una pieza laminada de metal puede variar a todo su ancho o a toda su longitud. Normalmente la variación a través del ancho está asociada con el control de la forma. La variación a través de la longitud se asocia con el control de calibre, el cual se ha transformado en un factor de primera importancia en el laminado moderno de tiras. Las demandas de los compradores de tolerancia cada vez más cerrada en calibre, coincide con las siempre en aumento velocidades del molino, y para evitar la producción de grandes cantidades de material "fuera de calibre", los molinos de tiras modernos invariablemente incluyen un control automático de calibre. Este equipo corrige el molino siempre que se está produciendo material "fuera de calibre". Puesto que las correcciones no pueden aplicarse hasta que el material fuera de calibre ha pasado a través de dispositivos sensores, una proporción de tal material está siempre presente en el producto. Este es un sistema correctivo; un sistema mucho mejor sería uno basado en la anticipación, colocando sensores antes del molino y usando las señales para variar la holgura de tal manera que se produjera material "en calibre" todo el tiempo. En la práctica no ha sido posible implementar tal sistema, ya que todos los parámetros del metal que pueden afectar la holgura activa de los rodillos, deben ser continuamente monitoreados e interpretados. Estos incluyen: esfuerzo de cedencia, calibre a la entrada, ancho, condición de la superficie, y lograr esto en tiras que se mueven a velocidades de hasta 50 m/s es impracticable por el momento. Debido a lo anterior el sistema correctivo aún se usa, con su desventaja inherente de producir siempre algo de material fuera de calibre, pero tiene la ventaja práctica de que solamente un parámetro necesita ser monitoreado, el calibre de salida.

Los primeros sistemas de calibre automático usaban radiación para medir el espesor. Estos eran colocados a una distancia de la salida del molino y los valores instantáneos del calibre eran alimentados a un dispositivo el cual ajustaba los tornillos del molino,

corrigiéndose de este modo la holgura de los rodillos. Sin embargo, esta técnica, padecía de una limitación llamada Velocidad - Retardación.

Obsérvese la figura 32, el calibre es monitoreado en B el cual, en este caso, está a una cierta distancia de la salida del molino A. Si el material en B es muy grueso, la señal origina que el sistema de control empiece a cerrar la holgura. Cuando la holgura está en el valor correcto, la señal desde B es todavía de producto grueso y el cierre continuará "sobrepasando" el ajuste correcto. Conforme el material delgado pasa desde A a B, el proceso comienza a invertirse y ocasiona un "seguimiento" en el sistema de control. Esto puede subsanarse insertando un dispositivo electrónico de retardamiento de manera que el ajuste del tornillo se efectúe en bloques de tiempo en lugar de continuamente.

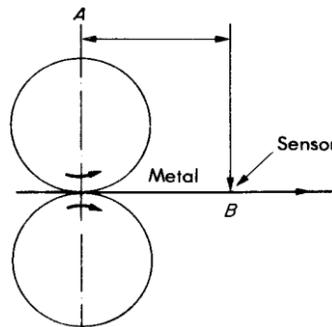


Figura 32 Esquema general del control automático del calibre.

Aun con esta técnica, grandes cantidades de material fuera de calibre pueden producirse. Mientras más cerca esté el monitor de la holgura de los rodillos, menor será el efecto Velocidad - Retardación, y en los molinos modernos el fenómeno ha sido eliminado usando cambios en las dimensiones del cabezal, las cuales están relacionadas con los cambios en la holgura de los rodillos. La Asociación Británica de Investigación del Hierro y el Acero fue pionera en el uso de medidores de deformación por resistencia para la medición de la fuerza de separación de rodillos. Las señales obtenidas de tales dispositivos se han usado para activar arietes hidráulicos o motores para bajar los tornillos para ajustar la holgura. Estas técnicas son llamadas métodos de control S o SD.

7.5. Ensanchado del material de trabajo

En la laminación de placas y hojas con elevadas relaciones de ancho a espesor, el ancho del material se conserva efectivamente constante durante la laminación. Sin embargo, con relaciones más pequeñas, como por ejemplo una sección transversal cuadrada, el ancho se incrementa de una manera considerable en el espacio de laminación, como resultado del mismo efecto que ocurre en el aplanado de la masa con un rodillo de amasar. Este incremento en anchura se conoce como ensanchado. En el cálculo de la fuerza de laminación, el ancho w de la ecuación se toma como ancho promedio.

Se puede demostrar que el ensanchado se incrementa con una reducción en la relación ancho a espesor del material de entrada (debido a la reducción en la limitación de

ancho), con un incremento en la fricción, y con un decremento en la relación del radio del rodillo al espesor de la tira (estos dos últimos debido a la mayor limitante longitudinal del flujo de material en el espacio de laminación). El ensanchado se puede evitar mediante el uso de rodillos verticales en contacto con los bordes del producto laminado (como en los molinos canteadores).

7.6. Problemas y defectos en los productos laminados

7.6.1. Por flexión de los rodillos

Pueden presentarse defectos en la superficie de las placas y hojas laminadas, o pueden existir defectos estructurales internos. Los defectos no son deseables, no sólo porque degradan la apariencia de la superficie sino también porque pueden afectar de manera adversa la resistencia, la capacidad de formado y otras características de manufactura.

Se han identificado un conjunto de defectos superficiales, como cascarilla, corrosión, ralladuras, mordeduras, picaduras y grietas. Estos defectos pueden haber sido causados por inclusiones e impurezas en el material fundido original o debido a varias otras situaciones relacionadas con la preparación del material y con la operación de laminado

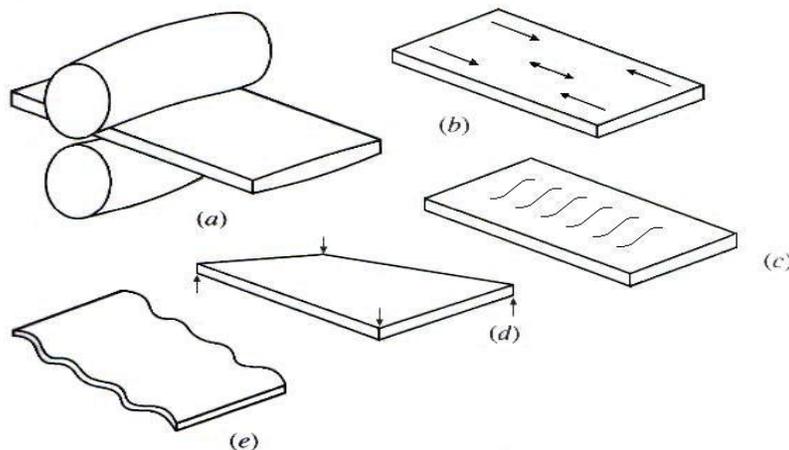


Figura 33 Defectos en los productos laminados por flexión de los rodillos

Los bordes ondulados en las hojas son el resultado de la flexión del rodillo. La tira es más delgada en sus bordes que en el centro figura 33(a); dado que los bordes se alargan más que el centro, se tuercen, ya que están limitados en su libre expansión en la dirección longitudinal (de laminado), debido a que el centro se encuentra en tensión y las orillas en compresión figura 33(b). Este patrón de esfuerzos puede ocasionar grietas en el centro figura 33(c), las orillas onduladas figura 33(e) o pandeo figura 33(d). Las grietas que se muestran son usualmente el resultado de una deficiente ductilidad del material a la temperatura de laminado.

7.6.2. Por combadura de los rodillos

El método usual para evitar la flexión de los rodillos, es rectificarlos de manera que su diámetro en la parte central sea ligeramente mayor que en sus bordes (dándoles una combadura), pero debido al calor generado por la deformación plástica, los rodillos pueden abarrilarse ligeramente provocando una combadura excesiva figura 34(a), lo cual provoca un patrón de esfuerzos no deseables provocando que la parte central del material se encuentre en compresión y las orillas en tensión figura 34(b), resultando en rupturas en las orillas figura 34(c), división del material figura 34(d) o arrugas en el centro figura 34(e).

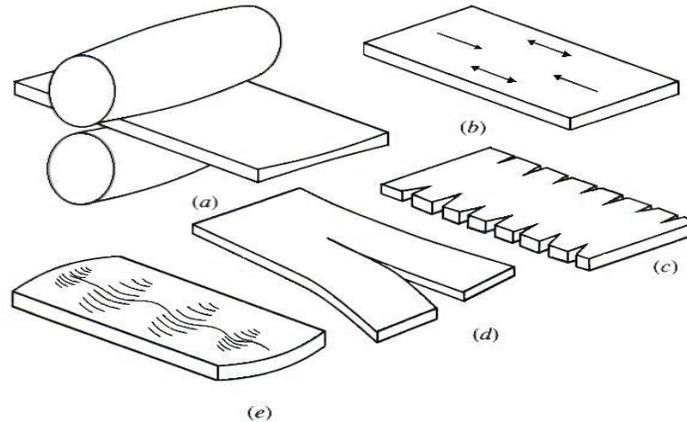


Figura 34 Defectos en los productos laminados por flexión de los rodillos

7.6.3. Hojeamiento

El hojeamiento (alligatoring) mostrado en la figura 35, es un fenómeno complejo y puede estar causado por una deformación no uniforme durante el laminado o por la presencia de defectos en la palanquilla por el fundido original. Dado que la calidad de los bordes de la hoja es importante en operaciones de formado con lámina de metal, a menudo los defectos en los bordes en las hojas laminadas son eliminados mediante operaciones de corte y hendedura.

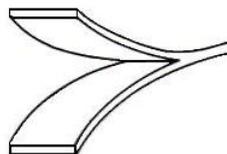


Figura 35 Hojeamiento

Para minimizar las probabilidades de que ocurran los defectos y problemas antes mencionados en las placas laminadas, se sugiere la ecuación del espesor mínimo h_{\min} que se debe de emplear en el laminado en frío.

$$h_{\min} = \frac{C \mu R}{E} (\bar{\sigma} - \sigma_t) \dots \dots \dots (51)$$

Donde:

μ = coeficiente de fricción

R = Radio de los rodillos

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo de cedencia promedio

C = parámetro de deformación elástica por el aplastamiento de los rodillos y está dado por:

$$C = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \dots\dots\dots(52)$$

Donde:

ν = módulo de Poisson del material de los rodillos

E = módulo elástico del material de los rodillos

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \dots\dots\dots(53)$$

σ_t = esfuerzo de tensión promedio y esta dado por:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{bt} + \sigma_{ft}}{2} \dots\dots\dots(54)$$

Donde:

σ_{bt} = tensión posterior

σ_{ft} = tensión frontal

7.7 Otras características

7.7.1. Esfuerzos residuales

Debido a la deformación no uniforme del material en el espacio de laminación, se pueden desarrollar esfuerzos residuales en placas y hojas laminadas, especialmente durante la laminación en frío. Los rodillos de pequeño diámetro o las pequeñas reducciones por pasada tienden a deformar el metal plásticamente en sus superficies como se muestra en la figura 36 en el inciso (a). Esta situación produce esfuerzos residuales a la compresión sobre las superficies (que pueden ser benéficos para una mejor vida a la fatiga) y esfuerzos a la tensión en el centro.

Por otra parte, los rodillos de gran diámetro y las grandes reducciones tienden a deformar todo el volumen más que las superficies como se muestra en la figura 36 en el inciso (b); esto se debe a la limitante por fricción en las superficies a lo largo del arco de contacto entre el rodillo y la tira. Esta situación produce esfuerzos residuales o puestos a los que se presentan en el caso de rodillos de pequeño diámetro.

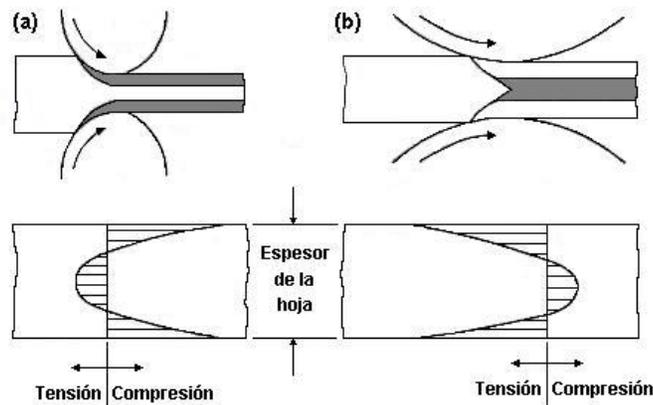


Figura 36 Esfuerzos residuales

7.7.2. Tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales variaran de acuerdo al tipo de metal utilizado, el tipo de proceso que se realiza, el espesor nominal y en algunos casos en el ancho.

Como es demasiada extensa la lista de metales que se pueden conformar mediante laminado, no es posible colocar todas las tablas de tolerancias de cada uno de ellos, es por esto que solo se dará a medida de ejemplo las tablas de tolerancias del acero al carbón.

Tolerancias en espesor para hojas de acero al carbón laminadas en frío

Variaciones permisibles en espesor		
Espesor Nominal		Tolerancia
Pulgadas	Milímetros	
0.0077 a 0.0087	0.196 a 0.220	+/- 5.5%
0.0088 a 0.059	0.224 a 1.5	+/- 5%
0.0591 a 0.1046	1.5 a 2.7	+/- 6%

Tolerancias en espesor para hojas de acero al carbón laminadas en caliente

Variaciones permisibles en espesor nominal especificado para aceros al carbono							
Ancho especificado (pulgadas)	Espesor nominal especificado (pulgadas)						
	.059 - .071	.072 - .098	.099 - .180	.181 - .230	.231 - .313	.314 - .375	.376 - .500
28 - 40	+/- 0.0030	+/- 0.0035	+/- 0.0035	+/- 0.0040	+/- 0.0055	+/- 0.0060	+/- 0.0070
> 40 - 48	+/- 0.0030	+/- 0.0035	+/- 0.0040	+/- 0.0045	+/- 0.0060	+/- 0.0065	+/- 0.0070
> 48 - 60	+/- 0.0035	+/- 0.0035	+/- 0.0040	+/- 0.0050	+/- 0.0060	+/- 0.0070	+/- 0.0075
> 60 - 63.75	+/- 0.0035	+/- 0.0040	+/- 0.0040	+/- 0.0055	+/- 0.0065	+/- 0.0075	+/- 0.0080

Variaciones permisibles en espesor nominal especificado para aceros al carbono							
Ancho especificado (milímetros)	Espesor nominal especificado (milímetros)						
	1.50 - 1.80	1.81 - 2.49	2.50 - 4.57	4.58 - 5.84	5.85 - 7.95	7.96 - 9.52	9.53 - 12.7
711 - 1016	+/- 0.076	+/- 0.089	+/- 0.089	+/- 0.102	+/- 0.140	+/- 0.152	+/- 0.178
> 1016 - 1219	+/- 0.076	+/- 0.089	+/- 0.102	+/- 0.114	+/- 0.152	+/- 0.165	+/- 0.178
> 1219 - 1524	+/- 0.089	+/- 0.089	+/- 0.102	+/- 0.127	+/- 0.152	+/- 0.178	+/- 0.191
> 1524 - 1619	+/- 0.089	+/- 0.102	+/- 0.102	+/- 0.140	+/- 0.165	+/- 0.191	+/- 0.203

Las tolerancias por planicidad usualmente quedan dentro de ± 55 mm / m (5 / 8 pulg / pie) para el laminado en caliente y de 6.4 a 19 mm / m (1/4 a 3/8 pulg / pie) para el laminado en frío.

7.7.3. Rugosidad superficial

En la figura 37 se dan los rangos de rugosidad superficial en laminación en frío y en caliente; para fines de comparación, incluye rangos correspondientes a otros procesos de manufactura. Nótese que el laminado en frío puede producir un acabado superficial muy fino, por lo que los productos hechos con hojas laminadas en frío pudieran no requerir de operaciones de acabado. Nótese también que el laminado en caliente y la fundición en arena producen el mismo rango de rugosidad superficial.

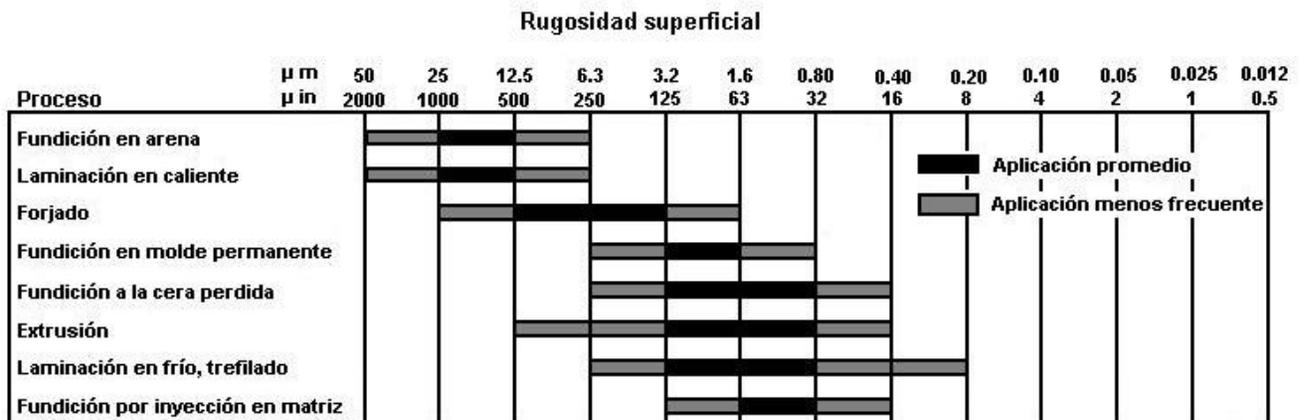


Figura 37 Rugosidad superficial

7.7.4. Número de calibre

El espesor de una hoja usualmente se identifica por un número de calibre: mientras más pequeño sea el número más gruesa será la hoja. Se utilizan varios sistemas de numeración, dependiendo del tipo de lámina de metal que se está clasificando. Las hojas laminadas de cobre y de latón también se identifican por cambios en su espesor durante el laminado, como por ejemplo 1/4 duro, 1/2 duro y así sucesivamente.

7.8 Molinos para laminación

Se construyen varios tipos de molinos y equipos para laminación; utilizan varios arreglos de rodillos. Aunque el equipo para el laminado en caliente y en frío es básicamente el mismo, existen diferencias en el material de los rodillos, los parámetros del proceso, los lubricantes y los sistemas de enfriamiento.

El diseño, la construcción y operación de los molinos de laminación, requiere de inversiones de consideración. Los molinos altamente automatizados producen placas y hojas de alta calidad y estrictas tolerancias en elevados volúmenes de producción y a un bajo costo por unidad de peso, particularmente cuando están integrados a la colada continua.

El ancho de los productos laminados puede tener un rango de hasta 5 metros (200 pulg) y un espesor de sólo 0.0025 mm. (0.0001 pulg). Las velocidades de laminación van hasta 25 m / s (aproximadamente una milla por minuto) para el laminado en frío, o incluso más en instalaciones muy automatizadas y controladas por computadora.

Los molinos de laminación se clasifican de acuerdo al número de rodillos que tenga. El molino de dos rodillos mostrado en la figura 38 a), fue el primero y el más simple pero su capacidad de producción tiende a ser baja debido al tiempo que se pierde al tener que regresar el metal al frente del tren o molino. Esto condujo al molino reversible de dos rodillos mostrado en la figura 38 b), donde el metal puede ser laminado en ambas direcciones. La desventaja de la configuración reversible es el momento angular significativo debido a la rotación de grandes rodillos, y los problemas técnicos asociados a la reversibilidad de la dirección. Este molino está limitado por la longitud que puede manejar y si la velocidad de laminado se aumenta, el resultado casi es el mismo debido al incremento del tiempo requerido para invertir la rotación en cada pasada. Lo anterior fija una longitud máxima económica de alrededor de 10 m.

El siguiente desarrollo fue el molino de laminación de tres rodillos mostrado en la figura 38 c), el cual tenía las ventajas de los molinos reversibles de dos rodillos. Estos molinos deben tener, por supuesto, mesas elevables en ambos lados de los rodillos. La holgura en un molino de dos y de tres rodillos no puede ser ajustada entre pasadas, por ello deben los rodillos superior e inferior estar provistos de ranuras para alojar las diferentes reducciones de la sección transversal de la superficie.

La mayoría de los laminados primarios se hacen ya sea en un laminador reversible de dos rodillos o en un laminador de rolado continuo de tres rodillos. En el laminador reversible de dos rodillos, la pieza pasa a través de los rodillos, los cuales son detenidos y regresados en reversa una y otra vez. A intervalos frecuentes el metal se hace girar 90° sobre su costado para conservar la sección uniforme y refinar el metal completamente. Se requieren alrededor de 30 pasadas para reducir un lingote grande a una lupia.

El laminador de dos rodillos es bastante versátil, dado que posee un amplio rango de ajustes según el tamaño de piezas y relación de reducción. Está limitado por la longitud que puede laminarse y por las fuerzas de inercia, las cuales deben ser superadas cada

vez que se hace una inversión. Esto se elimina en el laminador de tres rodillos, pero se requiere un mecanismo elevador. Aunque existe alguna dificultad debido a la carencia de velocidad correcta para todas las pasadas, el laminador de tres rodillos es menos costoso para hacerse y tiene un mayor rendimiento que el laminador reversible.

Los molinos de laminación con dos y tres rodillos se utilizan para la laminación en caliente en los pases iniciales (molino de desbaste primario, cogging mills) sobre los lingotes fundidos o en la colada continua, con diámetros de rodillos que van desde 0.6 a 1.4 metros (24 pulg a 55 pulg). En el laminador inversor de tres rodillos, la dirección del movimiento del material se invierte después de cada pasada; la placa que se está laminando es elevada de forma repetida al espacio superior de laminación, laminada y después bajada al espacio inferior de laminación mediante elevadores y diversos manipuladores.

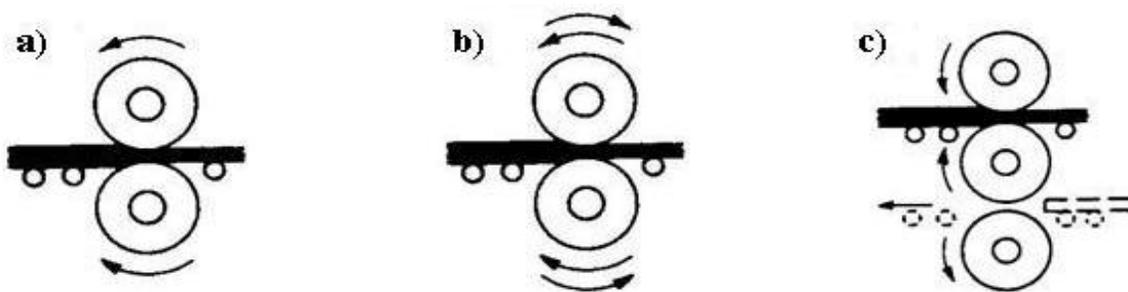


Figura 38 a) Molino laminador de dos rodillos, b) Molino laminador de dos rodillos reversible y c) Molino Laminador de tres rodillos

Los tres tipos de molinos de laminación, tienen la desventaja de que todas las etapas del laminado son efectuadas en la misma superficie del rodillo y la calidad de la superficie del producto tiende a ser baja. Los cambios de rodillo en estos molinos son relativamente frecuentes y requieren de tiempo. Es por ello que este tipo de molinos se usa para el laminado primario, donde se requiere un rápido cambio de forma, aun a expensas de la calidad de la superficie.

Los molinos de cuatro rodillos mostrado en la figura 39 b), son un tipo especial del molino de dos rodillos. Los laminadores de cuatro rodillos y los laminadores de conjunto o en racimo mostrado en la figura 39 a), también llamados molinos Sendzimir o molinos Z se basan en el principio de que los rodillos de diámetro reducido disminuyen las fuerzas de laminado y los requisitos de potencia, reduciendo el ensanchado. Como indican las ecuaciones anteriores, la longitud de contacto entre los rodillos y el trabajo se reduce con un menor radio de los rodillos y esto conduce a fuerzas más bajas, menor momento de torsión, y menor potencia. Además, cuando están desgastados o rotos, los rodillos pequeños pueden reemplazarse a un costo inferior que los grandes. Sin embargo, los rodillos pequeños de trabajo se flexionan bajo las fuerzas de laminado y deben ser soportados por otros rodillos más grandes de apoyo, como ocurre en laminadores de cuatro rodillos y de conjunto, ya que cualquier deflexión da lugar a que el metal producido sea más grueso en su centro que en sus orillas. El diámetro de los rodillos de apoyo, no puede ser mayor que 2 a 3 veces el de los rodillos de trabajo, y

como el diámetro de los rodillos de trabajo se disminuye más y más (para adecuarse a procesos con cargas de laminado excesivamente altas), el tamaño de los rodillos de apoyo debe también disminuir. Se llega a un punto en que los rodillos de apoyo en si mismos, comienzan a flexionarse y requieren ser apoyados, lo cual da lugar al diseño más avanzado (el molino Sendzimir).

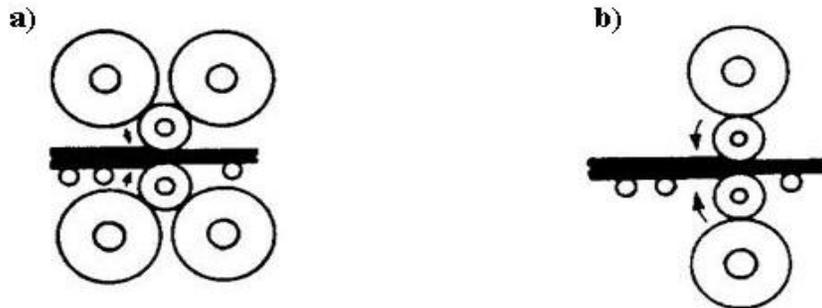


Figura 39 a) Molino laminador en conjunto y b) Molino Laminador de cuatro rodillos

Aunque el costo de una instalación de tren Sendzimir puede alcanzar millones de dólares, es particularmente adecuado para la laminación en frío de hojas delgadas de metales de alta resistencia. Los anchos comúnmente laminados son de 0.66 m (26 pulg), con un máximo de 1.5 m (60 pulg).

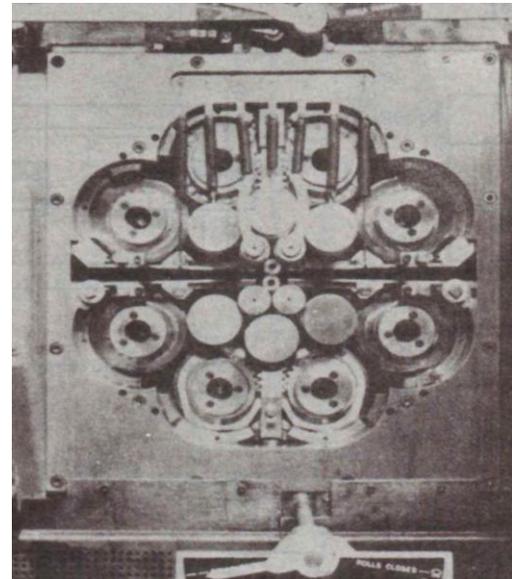
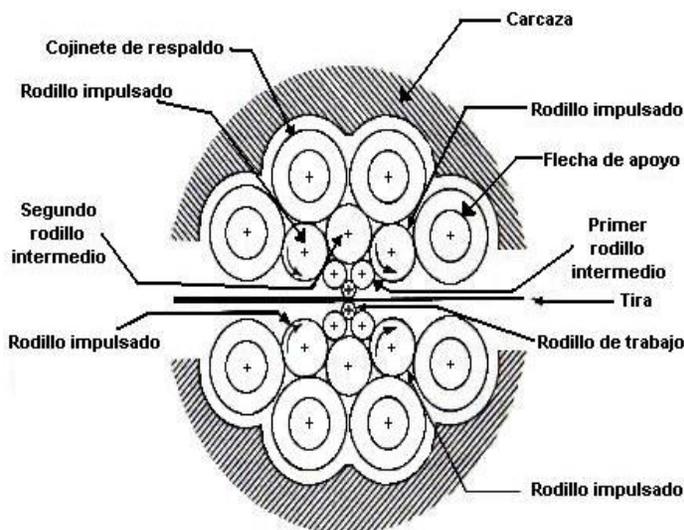


Figura 40 Molino laminador Sendzimir

La figura 40 muestra un molino Sendzimir que tiene rodillos de trabajo sumamente pequeños (10 mm), el cual puede usarse para procesos en los que se esperan cargas de laminado extremadamente altas, y los rodillos de trabajo pueden cambiarse con facilidad, Fig. 18. Este principio puede aplicarse a molinos más grandes y una instalación para laminar acero inoxidable de 1600 mm de ancho está equipada con rodillos de trabajo de 85 mm de diámetro.

7.8.1. Laminación en Tándem

Para lograr altas velocidades de rendimiento en los productos estándar se usa frecuentemente un molino de rodillos en tándem. Esta configuración consiste en una serie de bastidores de rodillos, como se muestra en la figura 41. Aunque sólo se muestran tres bastidores en nuestro diagrama un molino laminador en tándem puede tener ocho o diez pares de rodillos, y cada uno realiza una reducción en el espesor o un refinamiento en la forma del material de trabajo que pasa entre ellos. A cada paso de laminación se incrementa la velocidad haciendo significativo el problema de sincronizar las velocidades de los rodillos en cada etapa.

En la laminación en tándem, la tira es laminada continuamente, a través de un número de pases, con calibres más pequeños en cada pase. Cada pase está formado por un juego de rodillos con su propia carcasa y controles. Un grupo de pasos se conoce como un tren. El control del calibre y de la velocidad a la que se mueve la hoja a través de cada espacio de laminación es crítico. En las operaciones de laminación en tándem se utilizan controles electrónicos y por computadora, junto con una amplia cantidad de controles hidráulicos, particularmente en laminado de precisión.

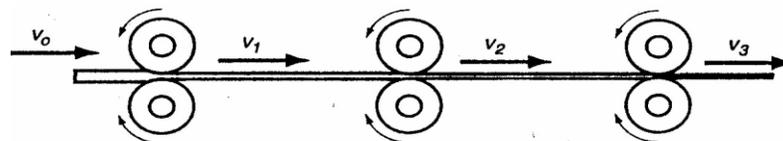


Figura 41 Laminación en Tándem

Los molinos continuos de laminación pueden clasificarse de acuerdo al arreglo de los bastidores de los rodillos o pases. Estos son molinos continuos de laminación en línea y en línea de frente con bastidores en circuito cerrado o abierto (figura 42).

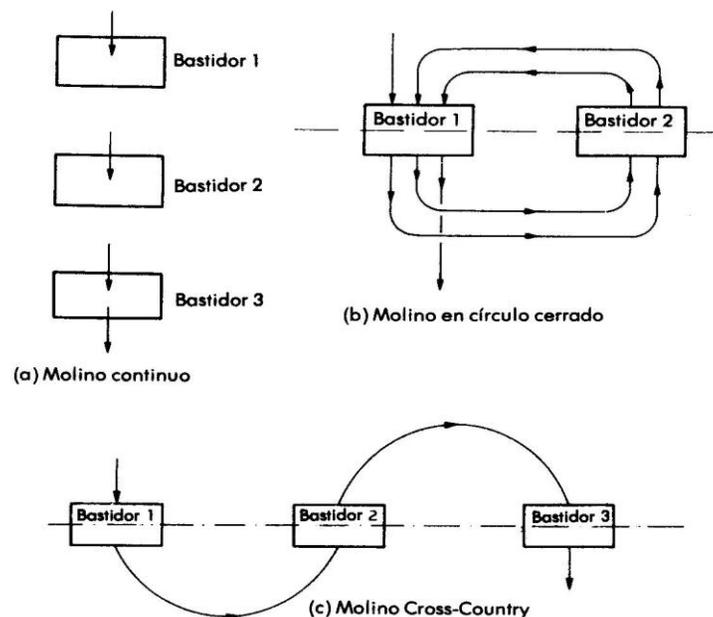


Figura 42 Clasificación de molinos de acuerdo con el arreglo de bastidores.

Los molinos en circuito abierto o cerrado requieren que la pieza de trabajo sea doblada o girada entre cada bastidor o castillo, y por ello se usan para laminar barras, rieles o secciones. Los molinos continuos se usan para placas, tiras u hojas. Todos ellos requieren de una gran inversión y sólo se justifican cuando se tiene garantizada una alta demanda del producto.

7.8.2. Rodillos

Los requerimientos fundamentales para el material de los rodillos son la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste. Los materiales más comunes para los rodillos son la fundición de hierro, el acero fundido y el acero forjado. También se utilizan carburos de tungsteno para rodillos de pequeño diámetro, como por ejemplo los rodillos de trabajo de un laminador Sendzimir. Los rodillos de acero forjado, aunque de un costo mayor, poseen más resistencia, rigidez y tenacidad que los rodillos de hierro fundido. Los rodillos que se van a usar para la laminación en frío se rectifican hasta un acabado fino; para aplicaciones especiales, los rodillos, además, se pulen.

Los rodillos diseñados para la laminación en frío no deben ser usados para la laminación en caliente, ya que pueden agrietarse por ciclado térmico (cuarteaduras por calor) y astillarse (agrietamiento o escamación de las capas superficiales).

7.8.3. Lubricantes

La laminación en caliente de las aleaciones ferrosas se efectúa por lo general sin lubricantes, aunque se puede usar grafito. Se emplean soluciones de base agua para enfriar los rodillos y para romper la cascarilla sobre el material laminado. Las aleaciones no ferrosas se laminan en caliente utilizando una diversidad de aceites compuestos, emulsiones y ácidos grasos. La laminación en frío se efectúa con lubricantes solubles en agua o lubricantes de baja viscosidad, como aceites minerales, emulsiones, parafina y aceites grasos.

El medio de calentamiento usado para el tratamiento térmico de las palanquillas y de las placas también puede servir como lubricante. Por ejemplo, las sales residuales de baños de sales fundidas ofrecen una lubricación efectiva durante el laminado.

7.9 Operaciones de laminado de forma

Además de la laminación plana, se pueden producir varias formas mediante el laminado de forma. Pasando la materia prima a través de un juego de rodillos especialmente diseñados, se laminan formas estructurales rectas y largas, como barra sólida, canales, vigas y rieles de ferrocarril.

7.9.1. Laminado de perfiles

En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma y se genera un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como perfiles en I, en L y canales en U; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas. El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

La mayoría de los principios que se aplican al laminado plano son aplicables al laminado de perfiles. Los rodillos formadores son más complicados; y el material inicial, de forma generalmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección fina.

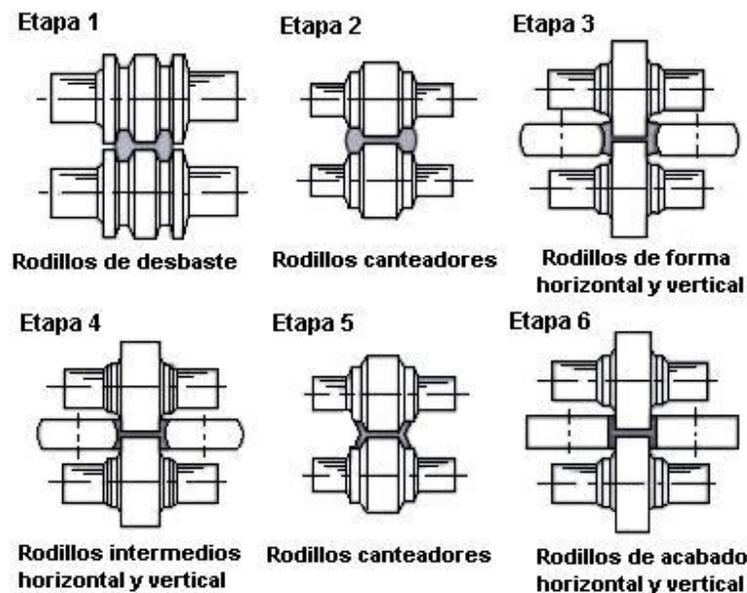


Figura 43 Laminado de perfiles

El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama diseño de pases de laminación. Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor elongación en estas secciones. Las consecuencias de una reducción no uniforme pueden ser torceduras y agrietamiento del producto laminado. Se utilizan rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo, como se muestra en la figura 43.

En la etapa 1 los rodillos de desbaste comprimen el material deformándolo en su parte central, en la etapa 2, los rodillos canteadores ensanchan la parte central y reducen la sección transversal a un menor grosor, en la etapa 3 los rodillos de forma horizontales como verticales dan una forma inicial básica parecida a la forma final, en la etapa 4 los

rodillos intermedios horizontales y verticales definen aun más la forma que tomará en la etapa final, en la etapa 5 los rodillos canteadores dan la deformación final del material para obtener las especificaciones requeridas del grosor y finalmente en la etapa 6 los rodillos de acabado dan la forma final del perfil.

7.9.2. Laminado de anillos

El laminado de anillos es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor, como se muestra en la figura 44. Conforme el anillo de paredes gruesas se comprime, el material se alarga, ocasionando que el diámetro del anillo se agrande. El laminado de anillos se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños.

El anillo se coloca entre dos rodillos, uno de los cuales es impulsado, y su espesor se va reduciendo al ir acercando los rodillos entre sí conforme giran. Dado que el volumen del anillo se conserva constante durante la deformación, la reducción de espesor se compensa con un incremento en el diámetro del anillo.

La pieza en bruto en forma de anillo puede producirse cortándola de una placa, perforándola o cortando un tubo de pared gruesa. Mediante el uso de rodillos para anillo se pueden producir varias formas. Las aplicaciones típicas para el laminado de anillos son los grandes anillos para cohetes y turbinas, las coronas de engranajes, las pistas para bolas y rodillos de cojinetes, las bridas y los anillos de refuerzo para tuberías, llantas de acero para ruedas de ferrocarril, recipientes a presión y máquinas rotatorias.

El proceso de laminado en anillo se puede efectuar a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas, dependiendo del tamaño, resistencia y ductilidad del material de la pieza de trabajo. Las paredes de los anillos no se limitan a secciones rectangulares, el proceso permite la laminación de formas más complejas. En comparación con otros procesos de manufactura capaces de fabricar la misma pieza, las ventajas de este proceso son un corto tiempo de producción, ahorros de material, estrictas tolerancias dimensionales, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío.

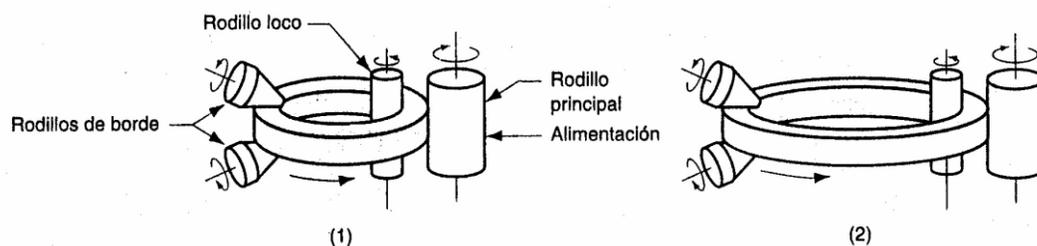


Figura 44 Laminación de anillos que se usa para reducir el espesor e incrementar su diámetro: (1) inicio y (2) proceso terminado.

7.9.3. Laminado de roscas

El proceso de laminado de roscas es un proceso de conformado en frío en el cual se forman roscas rectas o cónicas en varillas redondas, al pasar éstas entre dos dados para darles forma, para este proceso se utilizan máquinas laminadoras de roscas. Estas máquinas están equipadas con dados especiales que determinan el tamaño y forma de la cuerda, los dados son de dos tipos, pueden ser dados planos que se mueven alternativamente entre sí, como se muestran en la figura 45 a) y 45 c), o dados redondos que giran relativamente entre si para lograr la acción de laminado, como se muestra en la figura 45 b). Las roscas se forman sobre la varilla o sobre el alambre en cada carrera entre un par de dados. Los productos típicos con roscas externas son los tornillos, los pernos y piezas similares. Dependiendo del diseño del dado, el diámetro principal de una rosca laminada puede o no ser mayor que el de una rosca maquinada, esto es, la misma que el diámetro de la varilla en bruto. En cualquier caso se mantiene el volumen constante, ya que no hay remoción de material.

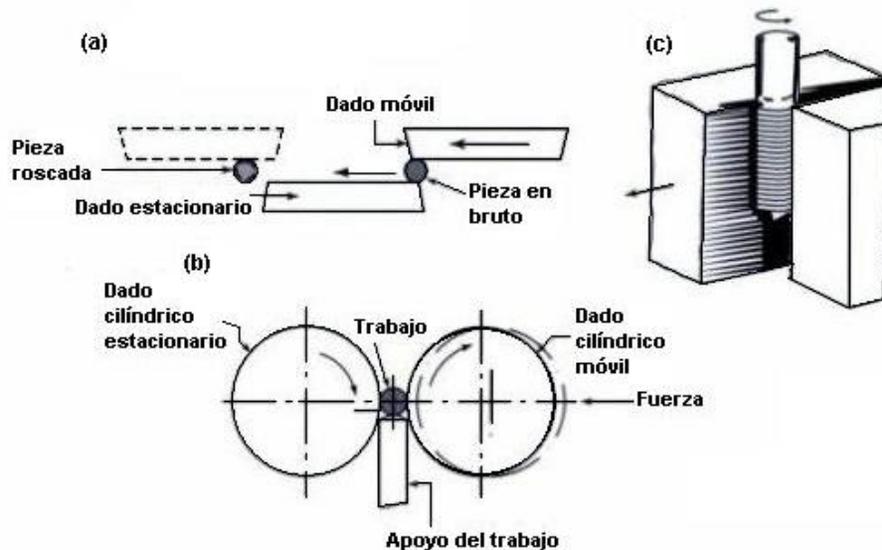


Figura 45 Tipos de dados en el laminado de roscas

El proceso es capaz de generar formas similares, como ranuras y varias formas de engranaje, en otras superficies, y se puede utilizar en la producción de casi todos los sujetadores roscados a elevadas tasas de producción. Las velocidades de producción en el laminado de roscas pueden ser muy altas, su capacidad alcanza hasta 80 piezas por segundo.

El proceso de laminado de roscas tiene la ventaja de generar roscas sin ninguna pérdida de material (desperdicio) y con buena resistencia (debido al trabajo en frío). El acabado superficial es muy terso y el proceso induce sobre la superficie de la pieza esfuerzos residuales de compresión, mejorando por tanto la vida bajo condiciones de fatiga.

El laminado de roscas es superior a otros métodos de manufactura de roscas, dado que el maquinado de las roscas corta a través de las líneas el flujo del grano del material, en

tanto que el laminado de roscas deja un patrón de flujo de grano que mejora la resistencia de la rosca, como se muestra en la figura 46.

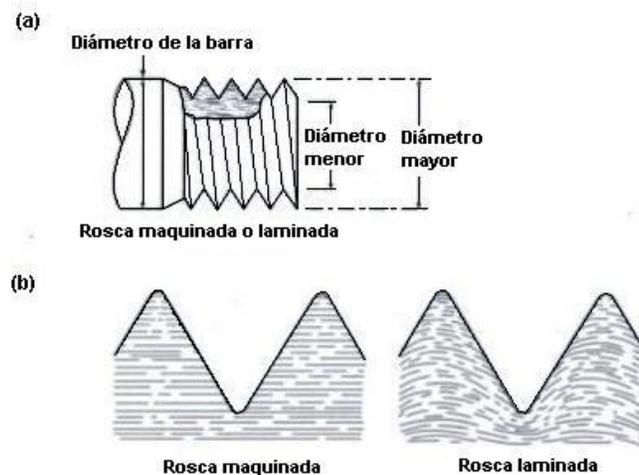


Figura 46 Laminado de roscas

Las roscas se laminan en los metales en condición suave, en vista de los requisitos de ductilidad. Sin embargo, posteriormente se pueden someter a tratamiento térmico y, de ser necesario, a un maquinado o rectificado final. Para metales en condición dura, las roscas se maquilan y/o se rectifican. Las roscas laminadas están disponibles en las formas de rosca estándar de más amplio uso; las roscas poco comunes o las de propósito especial, por lo general, se maquilan.

En las operaciones de laminado de roscas la lubricación es importante, a fin de obtener buenos acabados e integridad superficial y minimizar defectos. Es importante la forma en que el material cambia de forma durante la deformación plástica, ya que es fácil que se generen defectos internos. Los dados que por lo general son fabricados de acero endurecido, son de manufactura costosa debido a que su forma es compleja. Por lo general no es posible rectificarlos una vez desgastados. Sin embargo, con los materiales apropiados para los dados y una buena preparación, la vida del dado puede alcanzar una producción de millones de piezas.

7.9.4. Laminado de engranes

Éste es un proceso de formado en frío que produce engranajes rectos y helicoidales. La industria automotriz es un importante usuario de estos productos. La instalación para el laminado de engranes es similar al laminado de roscas, excepto que las características de deformación de los cilindros o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en el caso de engranes helicoidales) en lugar de la espiral del laminado de cuerdas. Las ventajas del laminado de engranes, comparadas con el maquinado son

similares a las ventajas en el laminado de roscas: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menos desperdicio de material.

7.9.5. Producción de tubos y tuberías sin costura

El perforado rotativo de tubos es un proceso especializado de trabajo en caliente para la manufactura de tubos y tuberías largas sin costura de pared gruesa. Utiliza dos rodillos opuestos y por tanto se agrupa entre los procesos de laminado. El proceso se basa en el principio de que cuando se somete un sólido cilíndrico a fuerzas radiales de compresión, se desarrollan esfuerzos de tensión en el centro del mismo. Si la compresión es lo suficientemente alta se forma una grieta interna, como se muestra en la figura 47 a). Posteriormente esta barra se somete a esfuerzos cíclicos de compresión y se empieza a formar una cavidad en el centro del sólido, como se muestra en la figura 47 b).

La perforación rotativa de tubos (proceso Mannesmann) se lleva a cabo utilizando un conjunto de rodillos giratorios. Los ejes de los rodillos están en ángulo, a fin de tirar del sólido redondo a través de los rodillos debido al componente axial del movimiento rotatorio. Un mandril o árbol interno ayuda en la operación, expandiendo la perforación y dimensionando el diámetro interno del tubo, como se muestra en la figura 47 c). El mandril puede mantenerse en un sitio mediante una varilla larga, o puede tratarse de un mandril flotante sin apoyo. Debido a la severa deformación que sufre el sólido, el material debe tener una elevada ductilidad y debe estar libre de defectos.

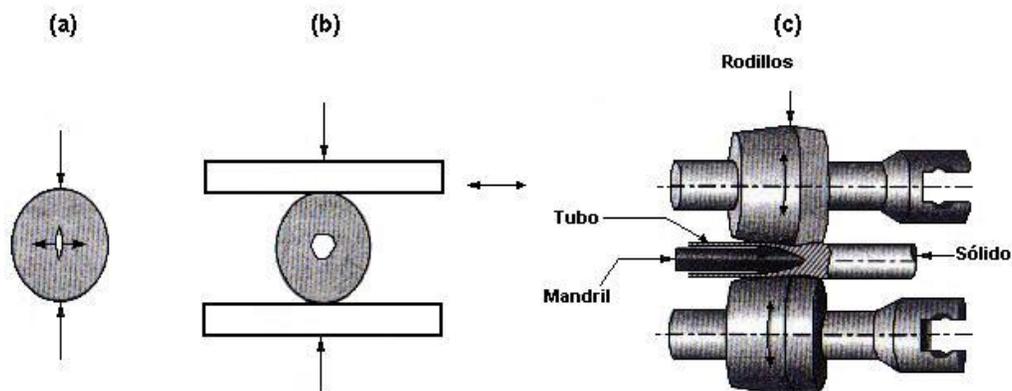


Figura 47 Laminado de tubería sin costura

El diámetro y el espesor de tubos y tuberías se pueden reducir mediante la laminación de tubos, que usa rodillos de forma. Algunas de estas operaciones pueden hacerse con mandril interno, como se muestra en la figura 48 a) y b) y sin mandril interno, como se muestra en la figura 48 c). En la laminación Pilger, mostrada en la figura 48 d), el tubo y

el mandril interno tienen un movimiento recíprocante; los rodillos poseen una forma especial y giran continuamente. Durante el ciclo de espacio del rodillo, el tubo se adelanta y rota, iniciando otro ciclo de reducción del tubo.

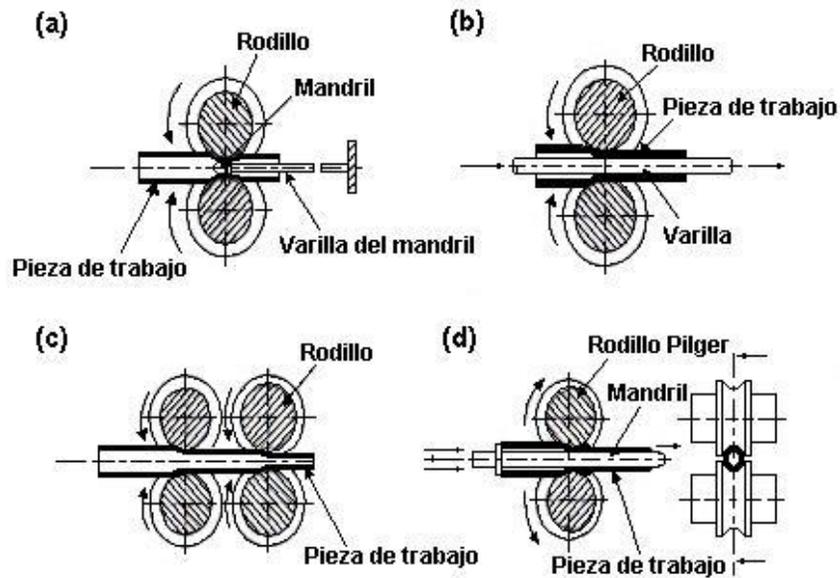


Figura 48 Ilustración esquemática de varios procesos de laminado de tubos: (a) con mandril fijo; (b) con mandril móvil; (c) sin mandril; (d) laminado Pilger sobre un mandril y un par de rodillos de forma.

Conclusiones

La laminación es un método de conformado utilizado para producir productos metálicos, este proceso se puede realizar con varios tipos de máquinas, la elección de la máquina más adecuada va en función del tipo de lámina que se desea obtener (espesor y longitud) y de la naturaleza y características del metal. En la laminación de metales existen dos procesos de laminado, en caliente y en frío.

El principal factor que se debe controlar en el proceso de laminado en caliente, es la temperatura a la cual se está calentando el metal. Si el calentamiento es insuficiente será más difícil de trabajar debido a que posee una menor ductilidad y maleabilidad, propiedades que se le confieren al calentarlos a una temperatura adecuada.

El proceso de laminado en caliente debe seguir una secuencia: primero calentamiento, pasar la chapa por el tren de desbaste, luego por el tren de laminación y por último el tren de acabado. Si no se respeta esta secuencia se presentan diversos problemas tales como: desgaste excesivo de los rodillos de laminación, excesiva potencia para realizar el trabajo, etc.

También es posible la laminación a temperaturas bajas (laminado en frío). En este caso la relación de espesor de entrada a los rodillos frente al espesor de salida es menor que en el caso de laminado en caliente, necesiéndose varias pasadas hasta completar el proceso. Es habitual utilizar en este caso laminadores reversibles. La calidad del laminado en frío suele ser mayor que la laminación en caliente, ya que es posible tomar medidas de espesores, realizando así un mejor control del proceso.

La laminación en frío se ve como un proceso altamente productivo, las ventajas particulares de este proceso son la variedad casi ilimitada de formas, y el endurecimiento tensional del material como resultado del conformado, lo cual se puede convertir en una gran ventaja.

Estos son los beneficios, pero hay también desventajas como el consumo de tiempo derivado del diseño y fabricación de las herramientas (los rodillos en este caso), la instalación y prueba de los trenes de laminación, tensiones internas indeseables o deformación del producto final.

Después de haber analizado el proceso de laminación, llegué a la conclusión de que es de suma importancia en el campo de la ingeniería. Los beneficios prácticos en el conformado por laminación van más allá de la reducción de los tiempos y el control de proceso mejorado.

El lector tiene ahora una cantidad significativa de conocimiento y experiencia en el proceso de laminación, que le permitirá eliminar fallas y problemas en la fase de introducción de nuevos productos descartando la experiencia heredada, obtenida al realizar los procesos a base de prueba y error, por generaciones de obreros y artesanos.

Además de contar con una fuente que puede ser de gran utilidad para el estudio del proceso de laminación de metales ya que en la biblioteca de nuestra facultad no se cuenta con un libro que se enfoque solamente en este proceso.

Bibliografía

Black Stewart C., Principios de Ingeniería de Manufactura, CECSA, 1era edición, México, 1999.

Kalpakjian Serope, Schmid Steven R., Manufactura. Ingeniería y Tecnología, Prentice Hall, 4ta Edición, México, 2002.

Groover Mikell P., Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas, Prentice Hall, México, 1997.

Alting Leo, Procesos para Ingeniería de Manufactura, Alfaomega, 1 era Edición, México, 1999

Chryssolouris George, Manufacturing Systems. Theory and Practice, Springer – Verlag, New York, 1992

Amstead B. H., Procesos de Manufactura, Editorial Continental, México, 1997.

Neely John E., Materiales y Procesos de Manufactura, Limusa, 1era Edición, México, 1992

Timings R. L., Tecnología de la Fabricación, Alfaomega, México, 1992

Mielnik Edward M., Metalworking Science and Engineering, McGraw Hill, U.S.A, 1991

Dieter George E., Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, 3era Edición, U.S.A., 1986

Jorge Luis González, Metalurgia mecánica, Editorial Limusa, México, 1999.

http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_V.html

http://personales.com/mexico/mexico/Documentaciones_Cs/forjado.html

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-322.pdf> Proceso de forjado

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-323.pdf> Proceso de extrusión

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-324.pdf> Proceso de estirado

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-333.pdf> Proceso de embutido

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-336.pdf> Proceso de rechazado

<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-32.pdf> Proceso de laminado

http://personales.com/mexico/mexico/Documentaciones_Cs/laminado.html Laminado

<http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyAVFylpAJPrzwNVr.php> Proceso de laminado

http://www.ahmsa.com/Acero/productos/rollo_frio/Prod_lamfrio_Rollo_tolerancias.htm
Tolerancias laminado en frío

http://www.ahmsa.com/Acero/productos/Rollo_Cal/Prod_lamcal_Rollo_Tolerancias.htm
Tolerancias laminado en caliente