

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



**PLANIFICACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE LAMINACIÓN
DE BARRAS REDONDAS LISAS DE ACERO**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA**

PRESENTADO POR:
JUAN GABRIEL SANDOVAL SOTO

**LIMA – PERU
2011**

DEDICATORIA

A mi padre, Víctor Raúl,

que agotó sus fuerzas para que sus hijos

alcancemos hasta este punto de la vida.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	14
SUMMARY	15
INTRODUCCION	16
CAPITULO I - DEFINICIÓN DEL PROCESO	18
1. OBJETIVOS GENERALES	18
2. FUNDAMENTO TEORICO	18
2.1. ESTRUCTURA INTERNA DEL ACERO DURANTE EL PROCESO DE LAMINACIÓN	18
2.2. DEFORMACION LINEALES EN UNA PASADA	25
2.3. LEY DE LOS VOLUMENES CONSTANTES	27
2.4. DISTRIBUCIONES DE REDUCCIONES DE AREA EN EL TREN LAMINADOR	28
2.5. ESQUEMA DEL PROCESO DE LAMINACIÓN	29
3. MATERIA PRIMA	30
4. EQUIPOS DE LAMINACIÓN	31
4.1. HORNO DE RECALENTAMIENTO	31
4.2. TREN DE LAMINACIÓN	32
4.2.1. CAJAS	33
4.2.1.1. MOTOR	33
4.2.1.2. CAJA REDUCTORA	33
4.2.1.3. CASETA	33

4.2.1.4. CIZALLAS VOLANTES	34
4.2.2. FORMADOR DE BUCLE	35
4.3. ZONA DE ACABADOS	37
4.3.1. PLACA DE ENFRIAMIENTO	37
4.3.2. FORMACIÓN DEL PRODUCTO FINAL	38
5. ANÁLISIS DE CAUSAS DE DEFECTOS	39
5.1. AJUSTE DE LA LUZ	39
5.2. AJUSTE DE LA GUÍA	40
5.3. AJUSTE DE LOS CILINDROS	41
5.4. PLIEGUES	42
CAPITULO II - PLANIFICACIÓN DEL PROCESO	44
1. OBJETIVOS GENERALES	44
2. CÁLCULOS A INTERVENIR	44
2.1. ENSANCHAMIENTO	44
2.2. AGARRE	47
2.3. VELOCIDAD DE LAMINACION	50
2.4. DIAMETRO DE TRABAJO	53
2.5. FUERZA DE LAMINACION	54
3. VARIABLES DE TRABAJO	58
3.1. TEMPERATURAS EN EL TREN LAMINADOR	58
3.2. REFRIGERACION DE LOS CILINDROS	61
3.3. CALIBRACION DE PRODUCTOS LARGOS DE ACERO	63

3.3.1. SECUENCIA CUADRADO - CAJÓN	65
3.3.2. SECUENCIA REDONDO - OVALO - REDONDO	66
3.3.3. DISEÑO DE CANALES	67
3.3.3.1. ESTÁNDARES DE REDUCCIÓN DE ÁREA	67
3.3.3.2. ELONGACIÓN MEDIA Y REDUCCIÓN MEDIA	68
3.3.3.3. GEOMETRÍA DE CANALES	68
3.4. ACCIONAMIENTO DEL TREN CONTINUO	73
3.5. SOBRECARGA DE TORQUE	76
3.6. SOBRECARGA DE POTENCIA	77
4. ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO FINAL	78
CAPITULO III - REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS	79
1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	79
1.1. EQUIPOS UTILIZADOS	80
1.2. MATERIA PRIMA	80
1.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CALIDADES	80
1.2.1.1. ACERO AISI-SAE 1018	80
1.2.1.2. ACERO AISI-SAE 1045	81
1.3. CALENTAMIENTO	83
1.4. CALIBRADO	84
1.5. LAMINACIÓN EN CALIENTE	91
1.6. PARAMETROS DEL TREN UTILIZADOS EN EL PROCESO	93
1.7. EVACUACIÓN DEL PRODUCTO	95

1.8. INSPECCIÓN DEL PRODUCTO	97
1.9. ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN	98
1.9.1. LA PASADA 1	98
1.9.2. LA PASADA 2	99
1.9.3. LA PASADA 3	99
1.9.4. LA PASADA 4	99
1.9.5. LA PASADA 5	100
1.9.6. LA PASADA 6	100
1.9.7. LA PASADA 7	100
1.9.8. LA PASADA 8	101
1.9.9. LA PASADA 9	101
1.9.10. LA PASADA 10	101
1.9.11. LA PASADA 11	102
1.9.12. LA PASADA 12	102
1.9.13. LA PASADA 13	102
1.9.14. LA PASADA 14	103
2. RESULTADOS DE LA CALIDAD	104
2.1. CALIDAD SUPERFICIAL	104
2.1.1. DEFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LAMINACIÓN	104
2.2. ENSAYOS METALGRÁFICOS	105
2.3. TOLERANCIAS DIMENSIONALES	107
CONCLUSIONES	110

RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	116
ANEXO 1. DIAGRAMAS DE LENDL – PARA CÁLCULO DE MEDIDA DE ÓVALOS	116
ANEXO 2. CURVA DE CORRECCIÓN DE ELONGACIONES DE LENDL	118
ANEXO 3. FACTOR DE CORRECCIÓN DE PASADAS PARA FÓRMULA DE EKELUND	119
ANEXO 4. DIMENSIONES DE CANALES	120
ANEXO 5. EJEMPLO DE DESARROLLO DE FORMULA DE EKELUND	127
ANEXO 6. EJEMPLO DE CÁLCULOS DE FUERZAS, VELOCIDADES Y POTENCIAS	129
ANEXO 7. RESULTADOS DE CALCULOS SECUNDARIOS	131
ANEXO 8. NORMAS TÉCNICAS	132

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Efecto del laminado en caliente sobre la estructura del grano.	19
Figura 1.2. Microestructura de la austenita durante la deformación y recristalización.	20
Figura 1.3. Tamaño de grano recristalizado.	21
Figura 1.4. Cambios en los granos de austenita según la temperatura de deformación	22
Figura 1.5. Variación de la micro estructura para 2 casos extremos de enfriamiento.	23
Figura 1.6. Evolución estructural entre deformaciones sucesivas.	24
Figura 1.7. Variación de dimensiones durante la laminación.	25
Figura 1.8. Variación de la altura y el ancho de la sección transversal.	26
Figura 1.9. Alargamiento de la barra.	27
Figura 1.10. LAY OUT del proceso de laminación de barras redondas lisas de acero.	29
Figura 1.11. Palanquillas de acero y estructura interna dendrítica del acero.	30
Figura 1.12. Horno de recalentamiento.	31
Figura 1.23. Tren de Laminación.	32
Figura 1.14. Partes de una caseta.	34
Figura 1.15. Cizalla Volante para eliminar puntas frías y deformadas.	35
Figura 1.16. Formador de bucle.	35
Figura 1.17. Esquema del accionamiento de la formación de bucle.	36
Figura 1.183. Placa de enfriamiento. Las barras se enfrían a medio ambiente.	37
Figura 1.19. Paquete de Barras redondas lisas \varnothing 1-1/16" calidad 1018.	38
Figura 1.20. Variación de medidas por efecto de la luz del cilindro.	39

Figura 1.21. Variación de las medidas por efecto de centrado de guías.	40
Figura 1.22. Variación de las medidas por efecto del cruzado de canales.	41
Figura 1.23. Ubicación de pliegues.	42
Figura 1.24. Formación de pliegue durante la laminación.	43
Figura 2.1. Ángulo de contacto de la barra con el cilindro de laminación.	47
Figura 2.2. Descomposición de las fuerzas que intervienen en el agarre.	48
Figura 2.3. Caudal del material entre dos pasadas de laminación.	50
Figura 2.4. Punto neutro.	52
Figura 2.5. Ubicación del diámetro de trabajo.	53
Figura 2.6. Fuerza de Laminación en la deformación de la barra.	55
Figura 2.7. Variaciones de temperatura en el laminado.	58
Figura 2.8. Posiciones de la ducha de refrigeración.	62
Figura 2.9. Para el proceso de laminación se requiere una secuencia de deformaciones.	63
Figura 2.10. Secuencia cuadrado - cajón.	65
Figura 2.11. Secuencia óvalo - redondo.	66
Figura 2.12. Dimensiones de un canal cajón.	69
Figura 2.13. Dimensiones de un canal redondo.	70
Figura 2.14. Dimensiones de un canal óvalo.	71
Figura 2.15. Secuencia de doble reducción.	72
Figura 2.16. Límites del funcionamiento del motor de las cajas.	73
Figura 2.17. Comparación entre dos motores con línea base diferentes.	74
Figura 2.18. Ubicación del reductor .	75
Figura 2.19. Comportamiento del torque en diferentes puntos de trabajo.	76

Figura 2.20. Cargas del motor en diferentes puntos de trabajo.	77
Figura 3.1. Perfil calentamiento de las palanquillas en el horno.	83
Figura 3.2. Laminación de la barra en la caja N° 9.	91
Figura 3.3. Guías de rodillos utilizadas en la prueba de laminación.	92
Figura 3.4. Inspección de medidas de una muestra de redondo liso \varnothing 1-1/6".	97
Figura 3.5. Uso del descascarillador.	98
Figura 3.6. Ralladuras formadas en las primeras barras de prueba.	104
Figura 3.7. Análisis metalográfico a 100X de la estructura interna calidad 1018	105
Figura 3.8. Análisis metalográfico a 100X de la estructura interna calidad 1045	106
Figura 3.9. Secuencia de la inspección de medidas de las barras calidad 1018	108
Figura 3.10. Secuencia de la inspección de medidas de las barras calidad 1045	109

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rango de reducciones de área por tipo de secuencias.	67
Tabla 2. Rango de trabajo real de temperatura en el horno de recalentamiento.	84
Tabla 3. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo cajón.	85
Tabla 4. Estimación del número de pasadas para la secuencia óvalo-redondo.	86
Tabla 5. Valores de los diámetros referenciales de los canales tipo redondo.	87
Tabla 6. Elongaciones corregidas de las pasadas tipo redondo.	87
Tabla 7. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo cajón.	88
Tabla 8. Áreas de los canales tipo óvalo.	88
Tabla 9. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo óvalo.	89
Tabla 10. Parámetros obtenidos por los cálculos teóricos para el proceso de laminación.	90
Tabla 11. Calibrado obtenido luego de aplicar los parámetros teóricos en la prueba.	93
Tabla 12. Cargas obtenidas luego de aplicar los parámetros teóricos en la prueba.	94
Tabla 13. Tolerancias dimensionales para barra redonda \varnothing 1-1/16".	107
Tabla 14. Resultados de la inspección de medidas para la calidad 1018.	107
Tabla 15. Resultados de la inspección de medidas para la calidad 1045.	108

NOMENCLATURAS

A [%] =	Avance de velocidad de la barra
A_d [mm ²] =	Área de contacto proyectada
A_n [mm ²] =	Área de la sección transversal de la barra en la pasada n.
B [mm] =	Ancho del canal
B_f [mm] =	Ancho de fondo del canal
b_m [mm]=	Ancho medio
b_n [mm] =	Ancho de la sección transversal de la barra en la pasada n.
B_t [mm] =	Ancho teórico del canal
C [%] =	Porcentaje de Carbono en la barra
CG [Kcal/m ² .h.°C ⁴]=	Factor de corrección para variación de temperatura por radiación.
C_p [Kcal/kg.°C]=	Calor específico del material de la barra
Cr [%] =	Porcentaje de cromo en la barra
D_n [mm] =	Diámetro nominal del cilindro
D_t [mm] =	Diámetro de trabajo
f =	Factor del material de los cilindros
f_g =	Factor de geometría de Ekelund
f_v =	Factor de velocidad de Ekelund
G [kg] =	Masa de la barra
H [mm] =	Altura del canal
h_n [mm] =	Altura de la sección transversal de la barra en la pasada n.

$K_1 =$	Coeficiente de ensanchamiento
$K_2 =$	Coeficiente de corrección
$K_D =$	Coeficiente de longitud
l_d [mm] =	Longitud de contacto
l_n [mm] =	Longitud de la barra en la pasada n.
$m =$	Factor de forma para la ecuación de ensanchamiento de Ekelund
M_a [N.m] =	Torque de fricción
M_n [%] =	Porcentaje de Manganeso en la Barra
M_t [N.m] =	Torque total
M_v [N.m] =	Torque en vacío
M_w [N.m] =	Torque de laminación
N_t [Kw] =	Potencia total
N_w [Kw] =	Potencia de laminación
ϕ [kcal/m ² .h°C] =	Coeficiente de transferencia de calor del acero
P [N] =	Fuerza de laminación
Q_n [mm ² .m/s] =	Caudal de la barra en la pasada n
R [mm] =	Radio
R_m [%] =	Porcentaje de reducción media
R_n [%] =	Porcentaje de reducción en la pasada n
rpm =	Revoluciones por minuto
R_w [kgf/mm ²] =	Resistencia a la deformación
T [°C] =	Temperatura
t_B [s] =	Tiempo de contacto entre el cilindro y la barra

T_c [°C]=	Temperatura del cilindro de laminación (~50°C)
T_L [°C]=	Temperatura de la barra
V_n [m/s] =	Velocidad de la barra en la pasada n.
z [s] =	Tiempo de radiación
Z =	Factor de corrección de pasadas
α [°]=	Ángulo de contacto entre el cilindro y la barra.
ε =	Coefficiente de radiación de la barra
θ [°] =	Ángulo lateral del canal
λ_m =	Elongación media
λ_n =	Elongación de la barra en la pasada n
η [kgf.s/mm ²]=	Tenacidad del acero
$\Delta\theta_L$ [°C] =	Variación de temperatura por conducción térmica
$\Delta\theta_S$ [°C] =	Variación de temperatura por radiación
$\Delta\theta_u$ [°C] =	Variación de temperatura por transferencia de energía
μ =	Coefficiente de fricción de los cilindros

RESUMEN

En este informe presento el desarrollo de las labores que realicé en la Planta de Pisco de la Corporación Aceros Arequipa S.A. junto al staff de ingenieros del área de Laminación. Como Jefe de Turno y parte del equipo de Coordinación de Procesos de Laminación hemos realizado el análisis y las observaciones correspondientes al desarrollo del proceso de laminación para la barras redondas lisas con nuevas medidas, el desarrollo en Laminación consiste desde la elaboración y evaluación del calibrado, el realización de las pruebas y la validación de los parámetros de producción. En este informe está dividido en 3 capítulos. El primer capítulo se detalla los aspectos generales del informe tales como el fundamento teórico de la laminación y el reconocimiento de los equipos a emplear. El segundo capítulo consta de la planificación para la fabricación de las barras laminadas así como las herramientas a utilizar tales como fórmulas, criterios teóricos, para la factibilidad del proceso. En el tercer capítulo se detalla las pruebas realizadas en caliente para la verificación de los parámetros calculados, la evaluación de los resultados de las pruebas y la estandarización de los parámetros y los resultados de la fabricación de las barras redondas lisas evidenciando la eficacia del proceso de laminación. Se finaliza el informe con las conclusiones y recomendaciones respecto al tema.

SUMMARY

In this report I present the development of the workings that I realized in Planta de Pisco of Corporación Aceros Arequipa S.A. with the staff of engineers of the area of Lamination. As Head of Turn and part of the equipment of Coordination of Processes of Lamination we have realized the analysis and the observations corresponding to the development of the process of lamination round bars with new measures, the development in Lamination consists from the elaboration and evaluation of the calibration, the accomplishment of the tests and the validation of the production parameters. In this report it is divided in 3 chapters. The first chapter details to the general aspects of the report such as the theoretical fundament of the lamination and the recognition of the equipment to use. The second chapter consists of the planning for the manufacture of the laminated bars as well as the tools to use such as formulas, theoretical criteria, for the feasibility of the process. In the third chapter details the tests realized for the verification of the calculated parameters, the evaluation of the tests resulted and the standardization of the parameters and the results of the manufacture of round bars demonstrating the effectiveness of the lamination process. The report finalizes with the conclusions and recommendations with respect to the subject.

INTRODUCCION

El objetivo de la laminación de barras de acero es mejorar sus propiedades mecánicas mediante la conformación del material de tal forma que los granos de la estructura interna sean finos y homogéneos para alcanzar las exigencias de trabajo del producto que el cliente requiere.

Nuestro proceso consiste primero en calentar las palanquillas, barras de acero, ya que no son utilizables directamente. Se hace pasar el semi-producto caliente (palanquilla) entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentidos contrarios, reduciendo su sección transversal gracias a la presión ejercida por éstos. En este proceso se aprovecha la ductilidad del acero, es decir, su capacidad de deformarse cuanto mayor es su temperatura. De ahí que la laminación en caliente se realiza a temperaturas comprendidas entre 1150°C, al inicio del proceso, y 900°C aproximadamente al final del mismo.

Alcanzada la temperatura deseada en toda la masa de la palanquilla, ésta es conducida a través de un camino de rodillos hasta el tren de laminación. Este tren está formado por parejas de cilindros que van reduciendo la sección de la palanquilla. Primero de la forma cajón a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma redonda. A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren se controla de forma automática, de forma que la velocidad de las distintas cajas que lo componen va aumentando en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior manteniendo constante el caudal del material.

Las barras ya laminadas se depositan en una gran placa o lecho de enfriamiento. De ahí, son trasladadas a las líneas de corte a medida y empaquetado y posteriormente pasan a la zona de almacenamiento y expedición. Durante la laminación se controlan los distintos parámetros que determinarán la calidad del producto final: la temperatura inicial de las palanquillas, el grado de deformación de cada pasada —para evitar que una deformación excesiva dé lugar a roturas o agrietamientos del material—, así como el grado de reducción final, que define el grado de forja, y sobre todo el sistema de enfriamiento controlado.

El objetivo del presente informe, es mostrar cómo se desarrolla la planificación y cálculos para los parámetros de producción del tren de laminación utilizando fórmulas establecidas, la realización de pruebas, la validación del proceso y la manufactura de un producto nuevo de acero en la planta de laminación tomando como ejemplo el desarrollo de la barra redonda lisa de 1-1/16" de diámetro calidad 1018 y 1045.

CAPITULO I

DEFINICIÓN DEL PROCESO

1. OBJETIVOS GENERALES

Para toda ejecución de la fabricación de un nuevo producto, se realiza la planificación del proceso, para ello se requiere una serie de herramientas para los cálculos y definición de los parámetros de producción, para verificar su factibilidad y fijar las condiciones en que se realizará el laminado, así como constatar que la capacidad de nuestros equipos cumplirán con la producción, además se requiere conocer los equipos e instrumentos que se necesitará para la laminación de un nuevo producto.

2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. ESTRUCTURA INTERNA DEL ACERO DURANTE EL PROCESO DE LAMINACIÓN

Un efecto del trabajo en caliente con la operación de laminado, es el refinamiento del grano causado por la recristalización. Esto se muestra gráficamente en la **Figura 1.1**. La estructura gruesa es definitivamente despedazada y alargada por la acción de laminado.

Debido a la alta temperatura, la recrystalización aparece inmediatamente y comienzan a formarse pequeños granos. Estos granos crecen rápidamente hasta que la recrystalización es completa. El crecimiento continúa a altas temperaturas, si además la elaboración no es mantenida, hasta que la temperatura baja del rango recrystalino es alcanzada.

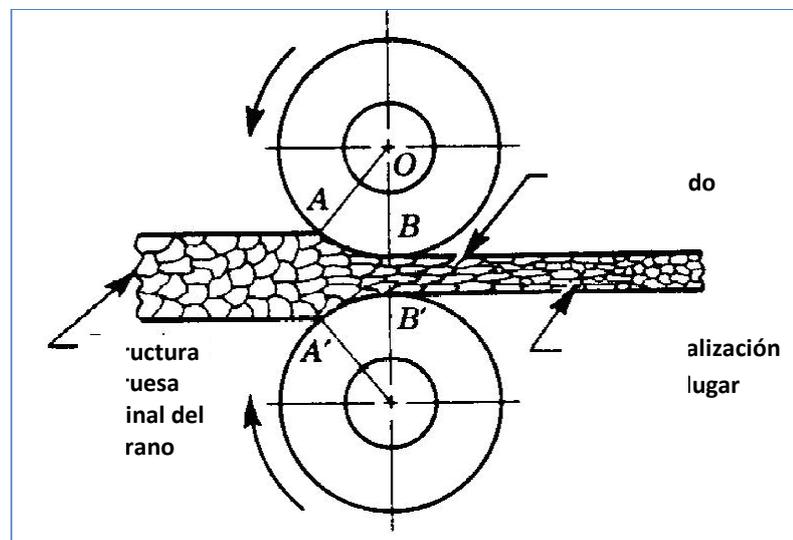


Figura 1.1. Efecto del laminado en caliente sobre la estructura del grano.

Los arcos AB y A'B' son arcos constantes sobre los rodillos. La acción de acuñadura en la elaboración es superada por las fuerzas de rozamiento que actúan en estos arcos y arrastran al metal a través de los cilindros. El metal emerge de los cilindros viajando a mayor velocidad de la que entra. En un punto medio entre A y B la velocidad del metal es la misma que la velocidad periférica del rodillo. La uniformidad de la temperatura es

importante en todas las operaciones de laminado, puesto que controla el flujo del metal y la plasticidad.

Los parámetros involucrados en el proceso de deformación en caliente influyen la evolución estructural del acero, particularmente en:

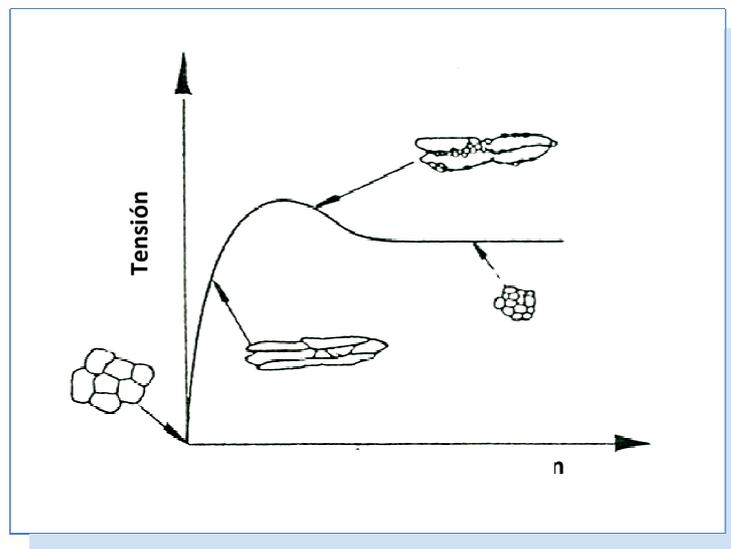


Figura 1.2. Esquema de los cambios en la microestructura de la austenita durante la deformación y recristalización.

- a) La curva de fluencia (σ - ϵ) obtenida mediante ensayo de torsión, refleja los cambios producidos en la austenita deformada a elevada temperatura (**Figura 1.2**). Se puede prever la evolución del tamaño de grano austenítico con la deformación a distintas temperaturas (**Figura 1.3**).

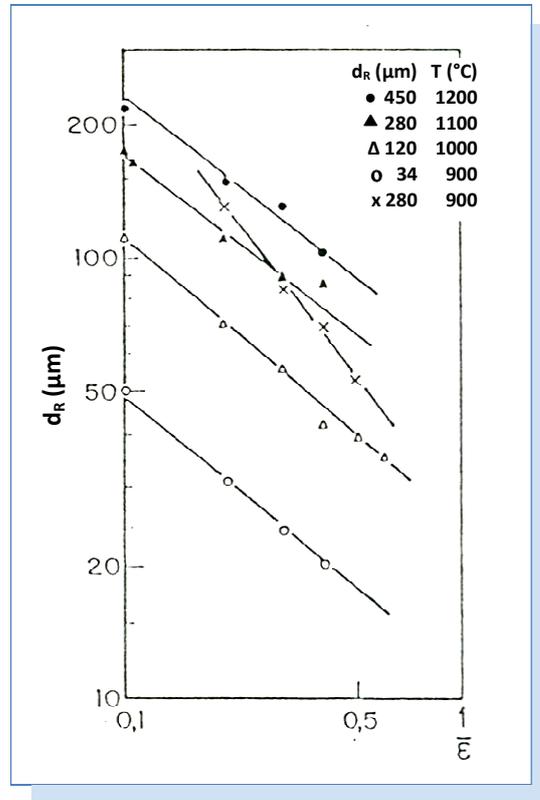


Figura 1.3. Tamaño de grano recristalizado en función de temperatura y deformación.
 Ref.: *ATLAS DE TRABAJABILIDAD EN CALIENTE DE ACEROS*

Así es posible establecer la temperatura óptima de trabajado para obtener un tamaño de grano austenítico definido y homogéneo. En la **Figura 1.4** se puede observar los cambios producidos en los granos de austenita según la temperatura de deformación.

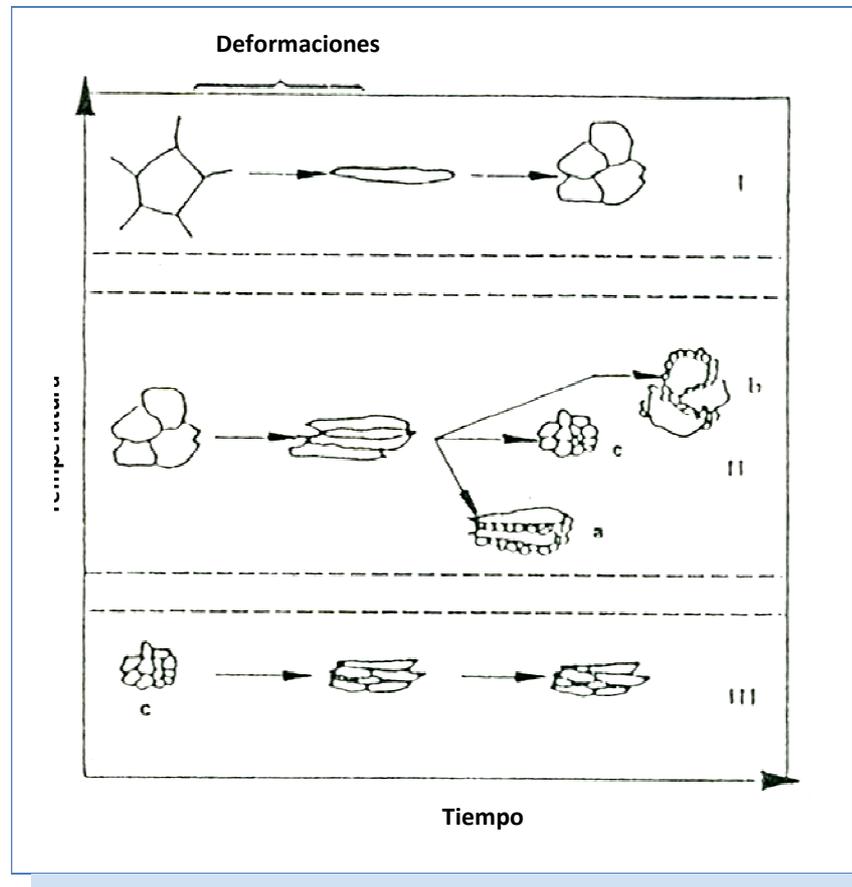


Figura 1.4. Cambios en los granos de austenita según la temperatura de deformación.
Ref.: ATLAS DE TRABAJABILIDAD EN CALIENTE DE ACEROS

Presenta 3 zonas bien definidas: Zona I, deformación a alta temperatura, se produce recristalización y crecimiento de grano. Zona II, deformación a temperaturas intermedias, a) austenita con poca recristalización, b) austenita recristalizada y con crecimiento de grano parcial (en a y b tamaño de grano no homogéneo), c) austenita totalmente recristalizada con tamaño de grano homogéneo. Zona III, deformación a baja temperatura, la austenita no recristaliza.

b) La velocidad de enfriamiento también juega un papel importante en la evolución de la micro estructura deformada, ya que limita el crecimiento del grano austenítico luego de la recristalización (**Figura 1.5**). Velocidades de enfriamiento rápidas favorecen la formación de granos pequeños, ya que a los granos deformados y recristalizados se les impone un corto periodo de crecimiento de grano. Por otro lado, dependiendo de la deformación y la velocidad de enfriamiento, pueden obtenerse estructuras con tamaño de granos no homogéneo, perjudicando las propiedades mecánicas del acero.

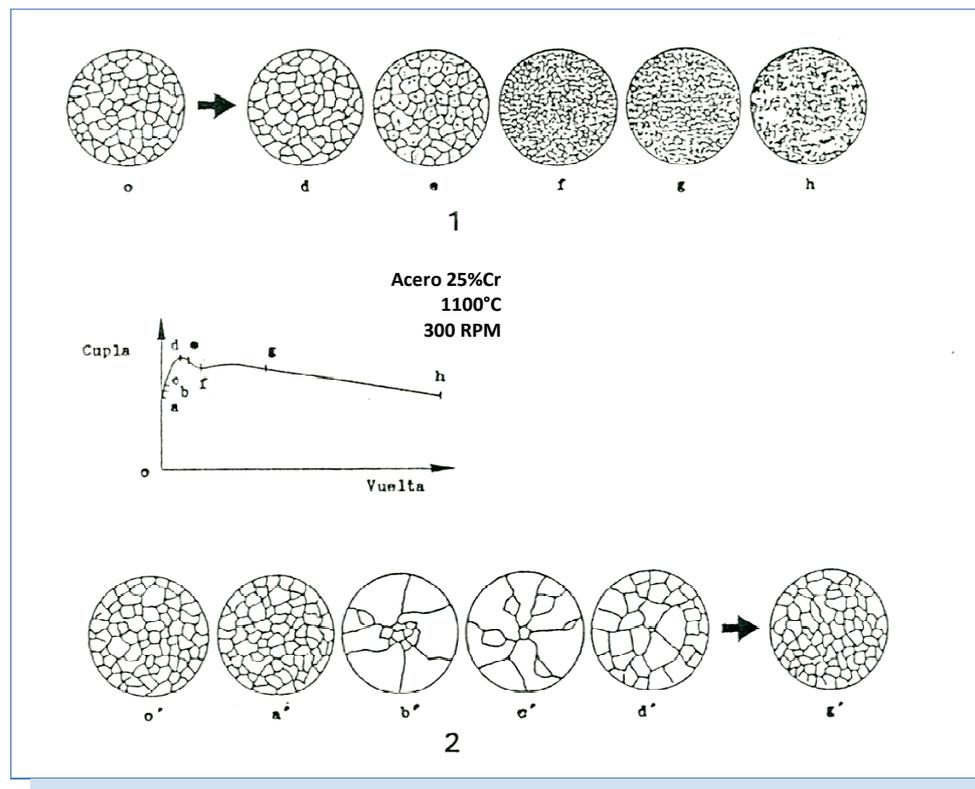


Figura 1.5. Variación de la micro estructura para 2 casos extremos de enfriamiento.
Ref.: ATLAS DE TRABAJABILIDAD EN CALIENTE DE ACEROS

c) Permite tener idea concreta de la micro estructura final del acero, como también de sus propiedades mecánicas, luego de la deformación y una vez que han ocurrido los procesos de formación de segundas fases, precipitados y cambios de fases correspondientes.

d) Cuando el proceso de fabricación involucra más de una etapa de deformación es importante analizar la evolución estructural entre deformaciones sucesivas (**Figura 1.6**). La deformación, la temperatura y el tiempo entre deformaciones determinan si el acero recrystaliza total o parcialmente y si se produce crecimiento de grano. La estructura resultante se modifica nuevamente por la deformación y la posterior restauración.

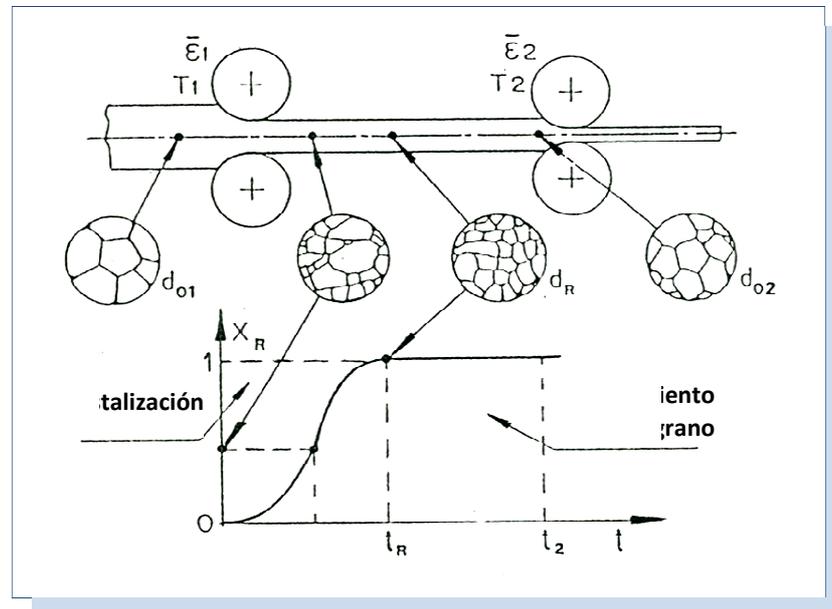


Figura 1.6. Evolución estructural entre deformaciones sucesivas. Ref.: ATLAS DE TRABAJABILIDAD EN CALIENTE DE ACEROS

2.2. DEFORMACION LINEALES EN UNA PASADA

En una pasada de laminación existen tres deformaciones lineales. Estas deformaciones lineales se conocen como reducción de altura, ensanchamiento y alargamiento.

Sus expresiones matemáticas son las siguientes:

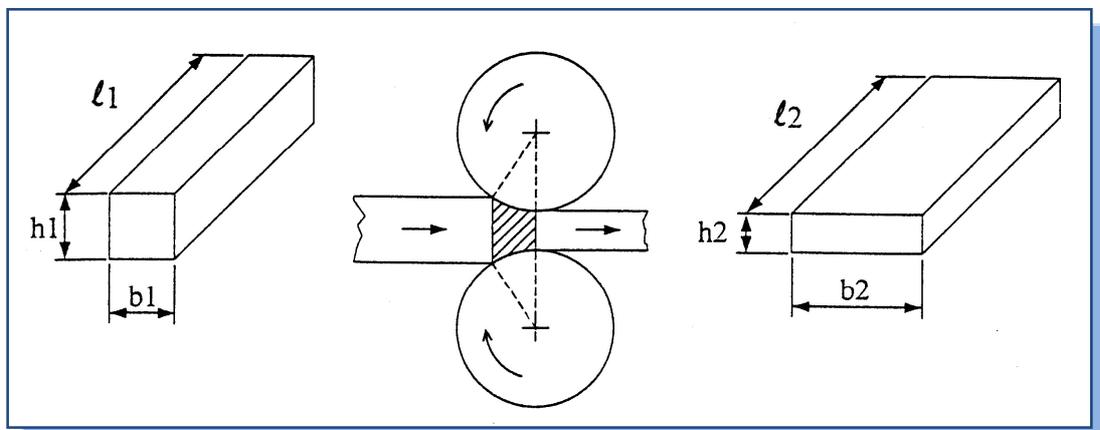


Figura 1.7. Variación de dimensiones durante la laminación

Reducción de altura : $\Delta h = h_1 - h_2$

Ensanchamiento : $\Delta b = b_2 - b_1$

Alargamiento : $\Delta l = l_2 - l_1$

La interacción de estas deformaciones lineales produce una reducción del área superficial entre el área de la sección transversal de ingreso y salida de la barra y su formulación matemática es la siguiente:

$$\%R = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \times 100 \quad (1.1)$$

Donde:

A_1 = Área inicial o área de entrada

A_2 = Área final o área de salida

Para comprender mejor la reducción en altura y el ensanchamiento se ilustra en la siguiente figura para una pasada cuadrado – óvalo:

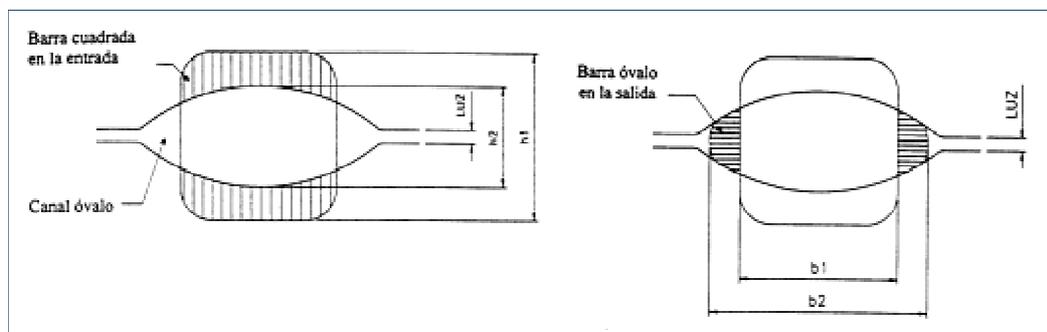


Figura 1.8. Variación de la altura y el ancho de la sección transversal

Donde:

h_1 = altura de entrada

h_2 = altura de salida

b_1 = ancho de entrada

b_2 = ancho de salida

La reducción de altura es efecto de la compresión directa del proceso de conformación por laminación y está definida por el canal, ajuste de la luz y deformación elástica del stand.

Con el ensanchamiento no hay reducción de área. Mientras tanto alargamiento se muestra en la siguiente gráfica:

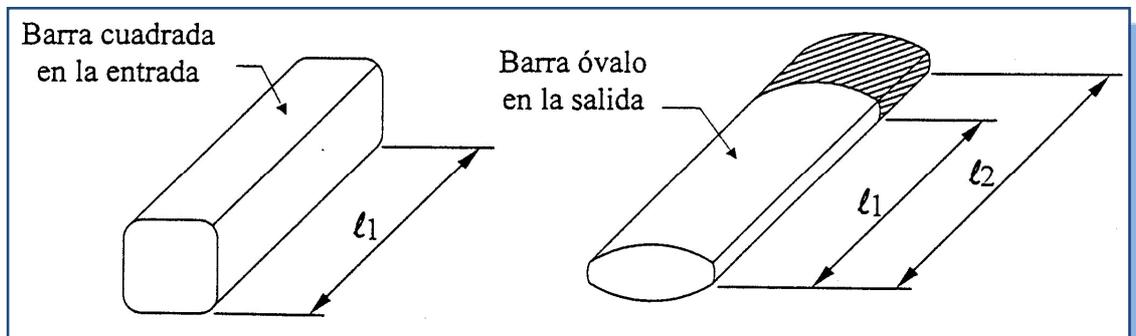


Figura 1.9. Alargamiento de la barra.

Con el alargamiento si hay reducción de área y es equivalente a la reducción del área en la pasada de laminación.

2.3. LEY DE LOS VOLUMENES CONSTANTES

El acero presenta pequeños cambios en su volumen debido a la deformación plástica a la cual es sometido, pero en general para efectos prácticos se considera que su volumen es casi constante, por lo tanto tenemos los siguientes cálculos:

$$V_1 = V_2$$

$$h_1 \times b_1 \times l_1 = h_2 \times b_2 \times l_2 \quad (1.2)$$

$$A_1 \times l_1 = A_2 \times l_2 \quad (1.3)$$

Ahora definimos matemáticamente la elongación como:

$$\lambda = \frac{l_2}{l_1} \quad (1.4)$$

Reemplazando las ecuaciones de la ley de los volúmenes constantes, elongación o alargamiento y el porcentaje de reducción de área se tiene las siguientes relaciones matemáticas muy útiles:

$$\%R = \frac{\lambda-1}{\lambda} \times 100 \quad (1.5)$$

$$\lambda = \frac{100}{100-R} \quad (1.6)$$

2.4. DISTRIBUCIONES DE REDUCCIONES DE AREA EN EL TREN LAMINADOR

La reducción de área varía por pasada de laminación de acuerdo con la secuencia de calibración adoptada y el tipo geométrico de la pasada. Como regla general no debemos practicar reducciones superiores a 35 % de área por pasada sea cual sea la secuencia adoptada.

2.5. ESQUEMA DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

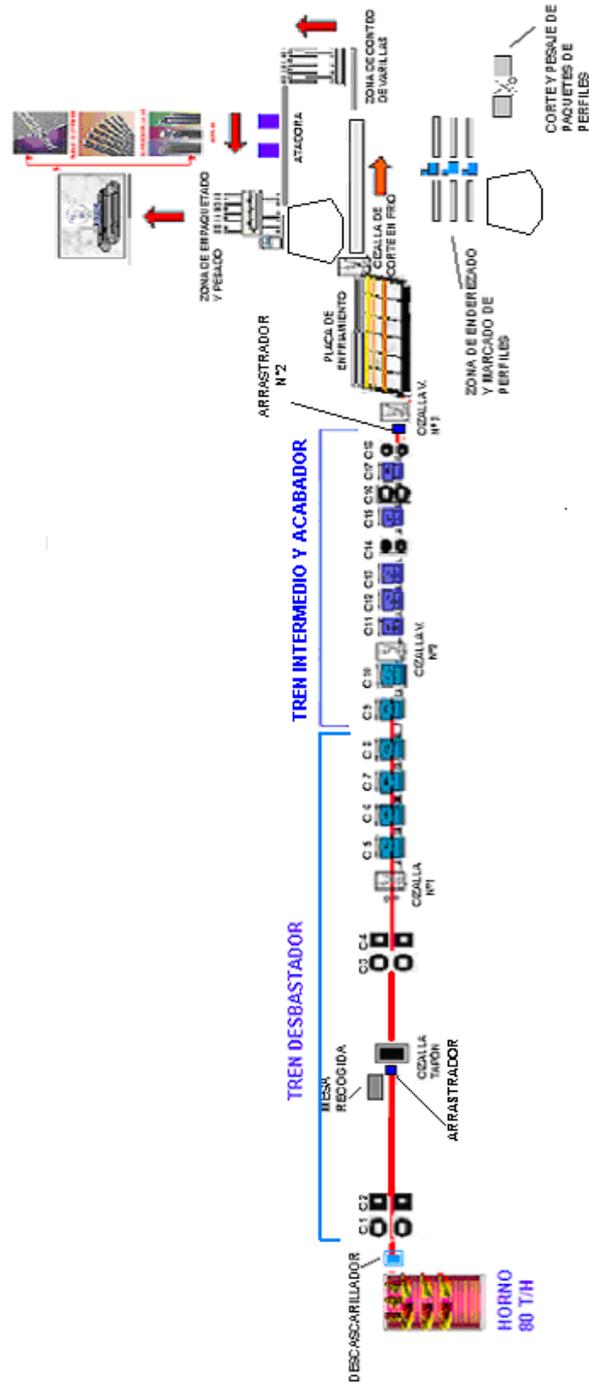


Figura 1.10. LAY OUT del proceso de laminación de barras redondas lisas de acero.

3. MATERIA PRIMA

La materia prima en la laminación son las palanquillas, el cual consiste de barras de acero colado que proviene de Colada Continua. De acuerdo con la configuración de nuestros equipos estas pueden laminar palanquillas de:

Aceros al carbono (bajo – medio –alto)

Aceros al manganeso.

Aceros resulfurados.

Las palanquillas son de 14m con una sección cuadrada de 130mm de lado y un peso de 1,850 kg aproximadamente, la palanquilla tiene aristas redondeadas de 4 a 5mm de radio. La estructura interna del acero en la palanquilla es de forma dendrítica por efecto de la solidificación en la colada. Primero se forma una capa sólida o costra exterior, luego la solidificación del acero se orienta hacia el interior. Sus cristales crecen partiendo de la delgada capa formada de acero sólido superficial y se dirigen hacia la zona central.



Figura 1.41. Lado izquierdo, Palanquillas de acero. Lado derecho, estructura interna dendrítica del acero.

4. EQUIPOS DE LAMINACIÓN

4.1. HORNO DE RECALENTAMIENTO

Comprende una cámara cerrada y se calienta la atmósfera interna por medio de la combustión de gas natural y aire, el cual se utiliza para calentar palanquillas de acuerdo al ritmo de producción y de la calidad del acero. Las palanquillas ingresan al horno pasando por tres etapas de calentamiento:



Figura 1.12. Horno de recalentamiento.

Precaalentamiento: se precalienta la palanquilla con la finalidad de que exista una fluidez de calor dentro de la palanquilla, para ello el calentamiento lento. La temperatura en esta zona llega a 1000°C aproximadamente.

Calentamiento: Donde se realiza el proceso propio de calentamiento de la palanquilla con el mayor poder calorífico necesario, llegando a la temperatura de trabajo (1150-1200°C)

Igualación: para evitar las diferencias de temperaturas en distintas partes de la palanquilla se realiza un calentamiento moderado en esta zona manteniendo la temperatura de trabajo.

4.2. TREN DE LAMINACIÓN

El tren de laminación es una serie de equipos que realiza la acción del conformado del acero, para ello, detallamos los componentes de esta zona.



Figura 1.53. Tren de Laminación.

4.2.1. CAJAS

Cada caja realiza la deformación de una pasada de la sección transversal de la barra manteniendo el caudal del material con una velocidad definida. Una caja comprende por tres partes principales:

4.2.1.1. Motor

Componente que trabaja con energía eléctrica continua que entrega la potencia necesaria para ejercer la fuerza para la deformación del acero así como la velocidad en r.p.m. para el avance del material.

4.2.1.2. Caja reductora

Comprendido por un juego de engranes que transforma la velocidad ejercido por el motor por la velocidad de laminación que se requiere en la pasada.

4.2.1.3. Caseta

Es el equipo mecánico compuesto por un par de cilindros con canales mecanizados, ampuezas o cojinentes que alberga a los cilindros y las guías de entrada y salida. Este equipo realiza la deformación directa del acero mediante la compresión con los cilindros girando en sentido

contrario al avance de la barra consiguiendo una menor sección transversal y alargamiento de la barra.

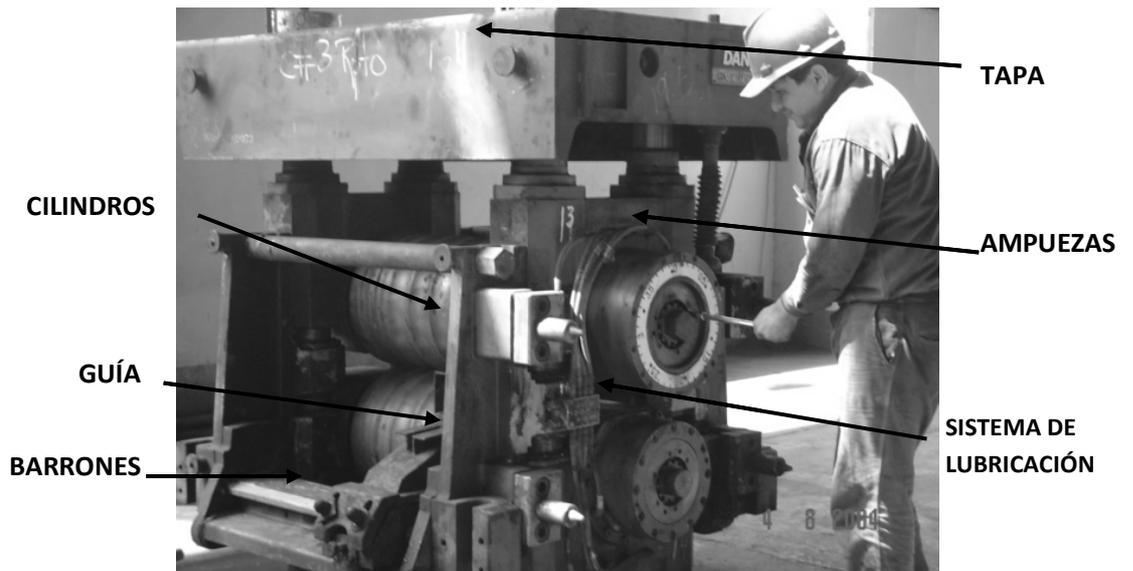


Figura 1.14. Partes de una caseta

4.2.1.4. Cizallas Volantes: Este equipo se encarga de cortar los extremos de la barra después de un cierto número de pasadas con el fin eliminar los defectos originados en esta zona por pliegues y aristas deformadas. Además las puntas tienen contacto directo con el agua de refrigeración por lo que se enfría y puede originar sobrecarga a los motores de los equipos.



Figura 1.15. Cizalla Volante para eliminar puntas frías y deformadas.

4.2.2. FORMADOR DE BUCLE

Para un buen control de caudales es necesario controlar las velocidades de los motores, los diámetros de los cilindros y el proyecto de calibrado. Para mantener el caudal constante se utiliza un sistema de control para el bucle:



Figura 1.16. Formador de bucle.

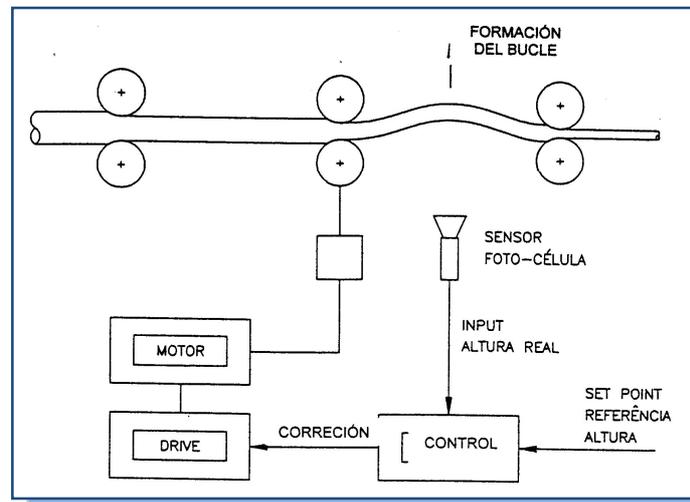


Figura 1.17. Esquema del accionamiento de la formación de bucle.

La fotocélula del sensor mide la altura real del bucle e informa al sistema de control. El sistema de control compara la altura real del bucle con el setpoint de referencia para la altura. Cuando la altura real del bucle tiende a salir fuera del rango de referencia, el sistema de control actúa ajustando la velocidad del motor utilizando el sistema drive.

Así, la altura del bucle siempre está dentro la referencia, la tracción es eliminada y la tendencia es mantener el caudal constante.

4.3. ZONA DE ACABADOS

4.3.1. PLACA DE ENFRIAMIENTO

Las barras son cortadas en la Cizalla Volante N° 3 a longitudes de 54, 60 y 63 m (dependiendo del producto) y llega a la Placa de Enfriamiento a una temperatura de 950 °C a 1050 °C aproximadamente. La placa es un mecanismo de traslación el cual durante su paso, las barras son enfriadas al medio ambiente para no distorsionar la estructura interna del acero con enfriamiento brusco. Los cortes se van trasladando y emparejando en los rastrillos de la placa hasta formar estratos en los magnetos para ser evacuados al camino de rodillos; las muestras para el peso métrico e inspección de calidad, dimensiones y superficial, son tomados en esta zona.



Figura 1.186. Placa de enfriamiento. Las barras se enfrían a medio ambiente.

4.3.2. FORMACIÓN DEL PRODUCTO FINAL

Las barras son cortadas comercialmente a longitud de 6, 9 y 12 m en la Cizalla de Corte en Frio; se cuenta el N^º piezas x tonelada en paquetes de 2 t aprox. Los paquetes son pesados automáticamente en línea e identificado con su tarjeta metálica con el código de barras; donde se indica el producto, código, norma, N^º paquete, N^º colada, N^º piezas, peso y orden de fabricación.



Figura 1.19. Paquete de Barras redondas lisas \varnothing 1-1/16" calidad 1018

5. ANÁLISIS DE CAUSAS DE DEFECTOS

Si no hay un buen control del proceso durante el laminado del acero puede generarse una serie de defectos en el producto. Para poder detectar el origen de estos defectos presentamos las siguientes causas posibles y las soluciones que se puede dar durante las regulaciones en el tren:

5.1. AJUSTE DE LA LUZ

El ajuste de la luz puede conducir a defectos en el material laminado cuando es realizado en forma descontrolada.

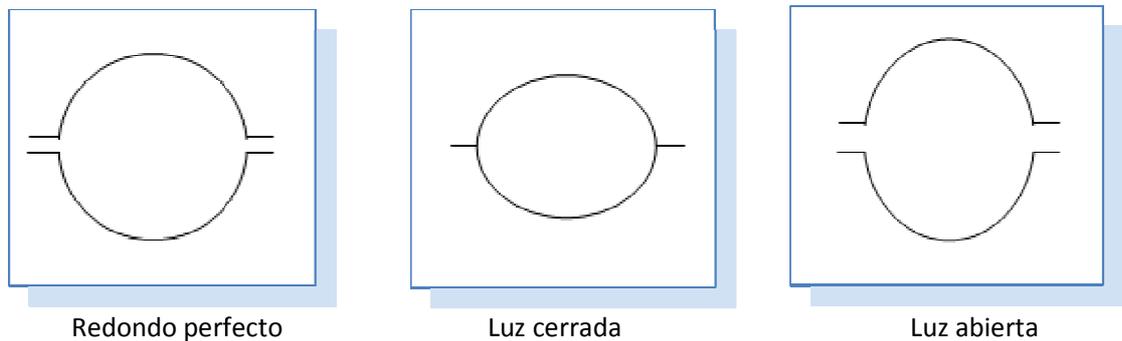


Figura 1.20. Variación de medidas por efecto de la luz del cilindro.

Cerrar la luz de forma exagerada provoca mala deformación en el material y puede generar overfill (reventón).

Abrir la luz de forma exagerada provoca deformación irregular en el material laminado.

Los siguientes ítems son recomendables practicar:

- Se debe realizar el ajuste de luz de acuerdo con la altura de la pasada de laminación determinada por el proyecto de calibración.
- Controlar la profundidad del canal en el tallado de los cilindros.
- Acompañar el desgaste de los canales, cerrando la luz solamente cuando sea necesario.
- La luz ideal de un canal es la mínima necesaria.

5.2. AJUSTE DE LA GUIA

La posición de la guía de entrada es importante para la correcta operación de una pasada de laminación. El guiado de entrada debe estar perfectamente centrado con el canal, en caso contrario se tendrá un defecto de laminación.

Guiado de laminación en una pasada redondo:



Figura 1.21. Variación de las medidas por efecto de centrado de guías.

Los siguientes ítems son recomendables practicar:

- Controlar el ajuste del guiado en el taller, considerando las normas de ajuste ya desarrolladas.
- Utilizar dispositivos ópticos para el guiado.
- Desarrollar modelos para posicionamiento del guiado en el stand para garantizar el correcto alineamiento.
- Desarrollar dispositivos para alineamiento del guiado en el laminador.

5.3. AJUSTE DE LOS CILINDROS

El ajuste perfecto de los cilindros es importante para garantizar la correcta deformación en la pasada de laminación.

Debemos garantizar:

- Tallado del canal en la línea y posición correctas.
- Ajuste de los cilindros garantizando el alineamiento entre perfil superior y el perfil inferior del canal.

Cilindros en la laminación de una pasada redonda:

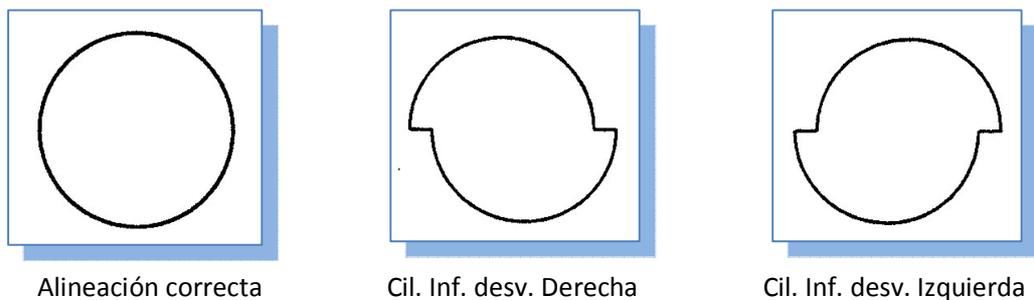


Figura 1.22. Variación de las medidas por efecto del cruzado de canales.

Los siguientes ítems son recomendables practicar:

- Garantizar el correcto tallado del canal en la posición determinada en el cilindro.
- Controlar el ajuste de los cilindros en el stand.
- Desarrollar normas para el ajuste de los cilindros.
- Mejorar las normas y entrenar el personal para realizarlas.

5.4. PLIEGUES

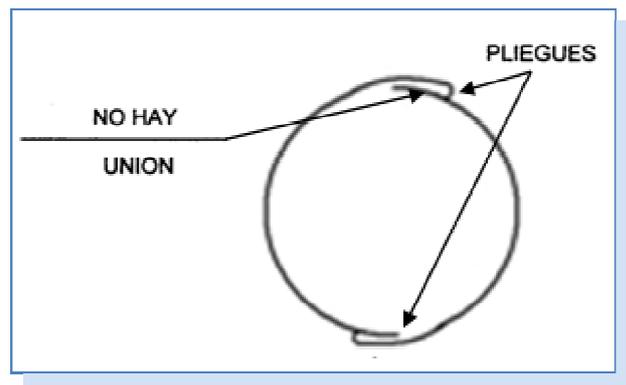


Figura 1.23. Ubicación de pliegues.

Cuando las pasadas de laminación operan con bigotes, estos bigotes pueden generar pliegues en las pasadas que vienen después.

Los pliegues son partes del material laminado que debido al tipo de deformación se quedan sueltos del núcleo de la sección transversal de la barra. La presión de compresión en la pasada de laminación no es suficiente para que haya unión entre el

material del pliegue y el material del núcleo de la sección transversal de la barra. El pliegue que no está unido constituye un defecto superficial que puede soltarse, romperse o generar irregularidades en la superficie del material.

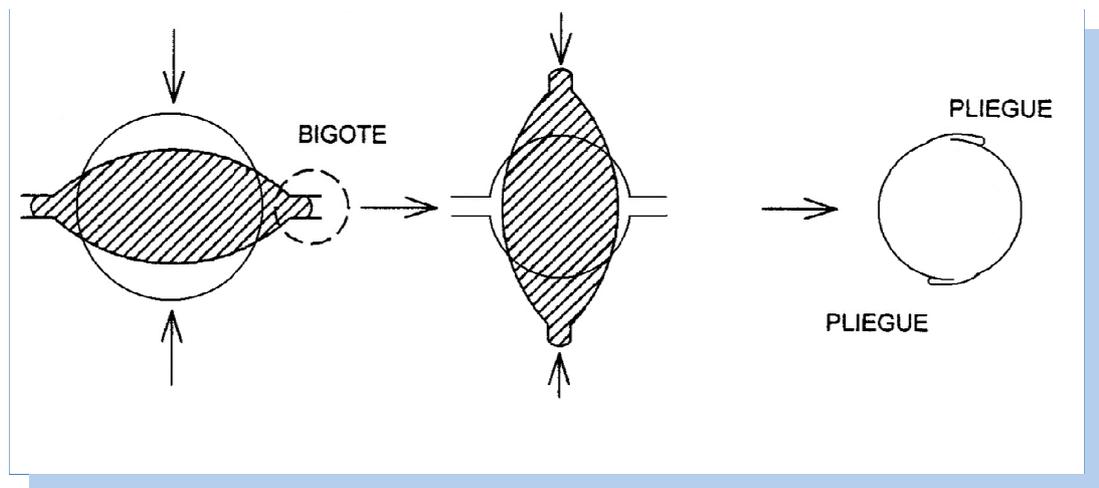


Figura 1.24. Formación de pliegue durante la laminación.

Para prevenir los pliegues hay que seguir las siguientes prácticas:

- Desarrollar el proyecto de la calibración adecuado, estimando el ensanchamiento y evitando bigotes.
- Operar con diámetros de cilindros y temperaturas de acuerdo al proyecto de calibración.
- Controlar siempre el ajuste de la luz de los canales, evitando cerrar demasiado los canales.

CAPITULO II

PLANIFICACIÓN DEL PROCESO

1. OBJETIVOS GENERALES

En este capítulo explico las herramientas para los cálculos de los parámetros para el laminado de barras de acero. Los cálculos de los parámetros se realizaron en una hoja de cálculo de Excel. Los resultados de las ecuaciones que se mostrarán a continuación se pueden apreciar en la **tabla 10**.

2. CÁLCULOS A INTERVENIR

2.1. ENSANCHAMIENTO

El ensanchamiento (Δb) corresponde al aumento del ancho de la barra que ocurre en una pasada de laminación:

$$b_2 = b_1 + \Delta b \quad (2.1)$$

b_1 = Ancho de entrada

b_2 = Ancho de salida

Como existe una luz entre los cilindros superior e inferior, no deseamos ensanchar totalmente los canales. Así, el ensanchamiento debe ser controlado con cuidados operacionales, ajuste de luz, correcta reducción de altura, calibrado y tallado de los canales. Canales con barras muy ensanchadas provocan defectos en el material laminado.

La influencia de los parámetros de operación en el ensanchamiento se muestra a continuación:

- A mayor altura de entrada del material, mayor es el ensanchamiento producido por el canal. Este ensanchamiento no es proporcional a la reducción de altura.
- Para una velocidad constante (rpm), a mayor diámetro del cilindro, mayor es el ensanchamiento producido en el canal.
- A mayor temperatura del material, menor es el ensanchamiento producido en el canal y menor es el coeficiente de fricción entre el cilindro y el material. Por lo tanto a una mayor coeficiente de fricción, le corresponde un ensanchamiento mayor.
- A mayor anchura del material, menor es el ensanchamiento producido por el canal. Un ejemplo de esto lo tenemos en la laminación de productos planos (planchas, chapas, etc.), donde el ensanchamiento es prácticamente nulo.
- A mayor velocidad de laminación, el ensanchamiento es menor, ya que el coeficiente de fricción disminuye.
- La composición química del acero también influye en el ensanchamiento, así los siguientes elementos aumenta el ensanchamiento: carbono, cromo, manganeso y níquel.

El ensanchamiento es importante porque nos permite elegir los parámetros apropiados para obtener una buena calidad superficial (evitando reventones) y el buen performance de los equipos evitando sobrecargas.

Fórmula de Ekelund:

$$b_1^2 - b_0^2 - 8 \times m \times Z \times ld \times \Delta h + 4 \times m \times Z \times (h_0 + h_1) \times ld \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = 0 \quad (2.2)$$

Donde: m es factor de forma

$$m = \frac{1.6 \times \mu \times ld - 1.2 \times \Delta h}{h_1 + h_0} \quad (2.3)$$

Z : factor de corrección de pasadas **ver anexo 3**

ld : longitud de contacto (ver ec. 2.11)

μ : Coeficiente de fricción (ver ec. 2.4)

Δh : diferencia de alturas de entrada y salida.

Este modelo es el que recurrentemente utilizamos por sus requerimientos prácticos de datos para los cálculos. Existen otros modelos para el cálculo de ensanchamiento tales como de Wusatowski, Koster y Siebel, sin embargo estos modelos depende más de una fórmula secundaria por lo que resulta más complejo, y en el caso de una planta de producción, se requiere de cálculos prácticos. Así mismo, como cada planta de laminación es diferente a las demás, tiene sus propios factores de corrección el cual realiza el ajuste de la fórmula de Ekelund a la realidad de la planta, este factor propia de nuestro tren de laminación podemos apreciar en el **anexo 3**.

2.2. AGARRE

Durante el proceso de laminación en caliente, es necesario que la barra sea “mordida” por los cilindros y entre ellos por efecto de la fricción. Para que esto ocurra, es necesario que exista una relación entre el coeficiente de fricción y el ángulo de contacto. Para calcular el coeficiente de fricción entre el cilindro de laminación y el acero a laminar utilizamos la ecuación de Ekelund:

$$\mu = f \times (1.05 - 0.0005 \times T) \quad (2.4)$$

Donde “T” es la temperatura del acero en grados Celsius y “f” es un factor que considera el material de los cilindros:

- Cilindros de acero $f = 1.0$
- Cilindros de hierro nodular $f = 0.9$
- Cilindros de hierro grafitico $f = 0.8$

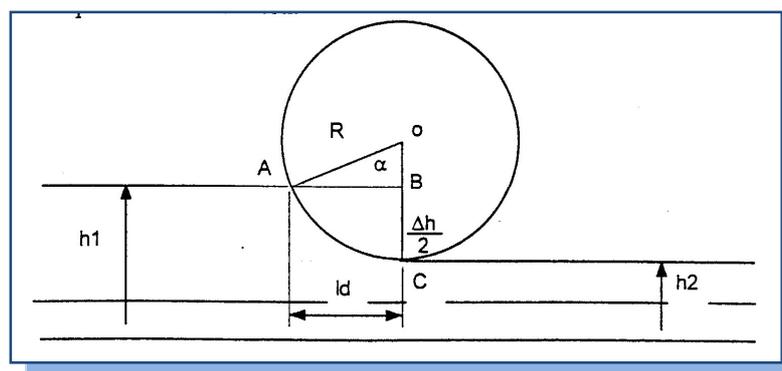


Figura 2.1. Ángulo de contacto de la barra con el cilindro de laminación

En una pasada de laminación el ángulo de contacto entre la barra y el cilindro de laminación está dado por:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{2R} \quad (2.5)$$

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

Donde α es el ángulo de contacto, R es el radio de trabajo de los cilindros y Δh es la reducción en altura de la pasada de laminación.

Cuando la barra se introduce entre los cilindros, ejerce una fuerza P en el punto de contacto que produce en los cilindros una reacción igual y de sentido contrario.

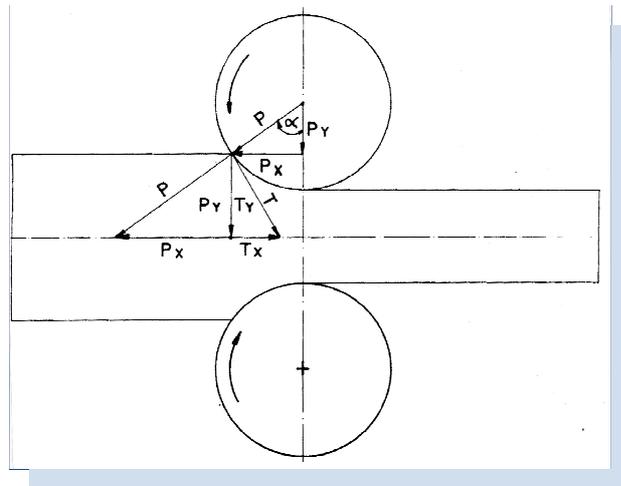


Figura 2.2. Descomposición de las fuerzas que intervienen en el agarre.

La condición de agarre es que $T_x > P_x$, entonces según la relación anterior:

$T \cos \alpha > P \sin \alpha$, de donde $T > P (\sin \alpha / \cos \alpha)$ o $T > P \tan \alpha$.

La relación de fuerza entre P y T viene expresada por $T = P \mu$, donde μ es el coeficiente de fricción. Entonces la condición de agarre natural queda determinada por:

$$\mu > \tan \alpha$$

La condición de agarre natural es establecida por la configuración de los esfuerzos actuantes en el agarre. Cuando la condición de agarre no está establecida naturalmente, debemos actuar sobre μ y α , de manera de poder obtener esta condición.

El agarre mejora con:

- Mayor coeficiente de fricción
- Superficies ásperas
- Cilindros usados
- Material más frío
- Cilindros con refrigeración
- μ acero > μ hierro colado
- Menor velocidad
- Mayor diámetro
- Menor reducción de altura

2.3. VELOCIDAD DE LAMINACION

El caudal del material debe ser analizado cuando tenemos laminación de pasadas con simultaneidad.

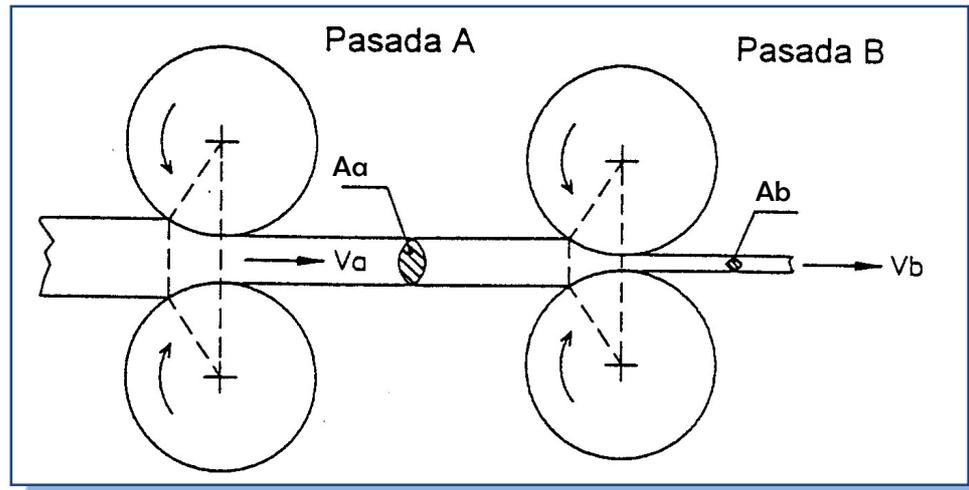


Figura 2.3. Caudal del material entre dos pasadas de laminación.

$$\text{Caudal de la pasada A:} \quad Q_a = A_a \times V_a \quad (2.6)$$

$$\text{Caudal de la pasada B:} \quad Q_b = A_b \times V_b$$

$$V_{a,b} = \frac{(\pi \times d_{a,b} \times rpm_{a,b})}{60000} \times \frac{(1 + A_{a,b})}{100}$$

Donde:

A_a, A_b = área calculada medida de la figura geométrica de las pasadas a y b

V_a, V_b = velocidad de salida de la barra para las pasadas a y b

$rpm_{(a,b)}$ = velocidad de los cilindros (rpm)

$d_{(a,b)}$ = diámetros de trabajo (mm)

A = avances (%)

$V_{(a,b)}$ = velocidades de salida de la barra (m / s)

Tenemos las siguientes situaciones:

Si $Q_b > Q_a$, entonces ocurre tracción entre A y B

- Determina el descontrol dimensional de las pasadas.
- Genera tensiones internas no deseadas en el material laminado.

Si $Q_b < Q_a$, sobra material entre A y B:

- Su estabilidad y control no son los adecuados.

Si $Q_b = Q_a$

- Es lo ideal.

En el proceso de laminación, la velocidad de entrada de la barra a través del espacio de los cilindros no es igual a la velocidad tangencial o periférica de los cilindros.

A la entrada de los cilindros, la velocidad del material es más lenta, ocasionando un deslizamiento de los cilindros sobre el material. A la salida de los cilindros, la velocidad de la barra es más rápida que la velocidad tangencial de los cilindros ocasionando un arrastre de los cilindros por la barra, conocido como el “avance”. Por lo tanto existe una zona donde la velocidad de la barra y la velocidad tangencial de los cilindros son iguales, esa zona se denomina zona neutra. En esta zona las partículas pueden sólo moverse en el sentido transversal a la laminación, es decir del centro del material de la barra hacia los bordes dando origen al ensanchamiento.

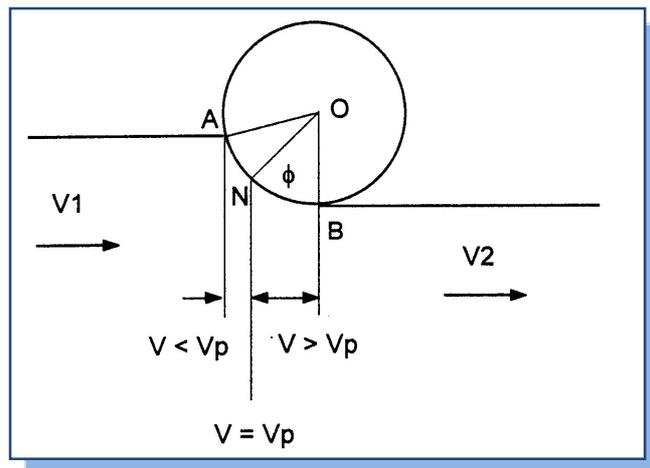


Figura 2.4. Punto neutro, donde la velocidad de laminación es igual a la velocidad del cilindro.

Donde:

ϕ = Angulo del punto neutro

V_p = Velocidad periférica del cilindro

$V_2 = V_p \times (1 + A')$, donde A' es el avance (1 – 3%)

2.4. DIAMETRO DE TRABAJO

El diámetro de trabajo es un diámetro medio de los cilindros en la zona del canal, donde están expresas las condiciones medias de velocidad del material laminado. El diámetro de trabajo es mayor que el diámetro del fondo del canal y menor que diámetro en la tabla de los cilindros. El cálculo recomendado para el diámetro de trabajo es:

$$D_t = D_n + s - h_2 \quad (2.7)$$

Donde:

D_n = Diámetro nominal en la tabla de los cilindros

s = luz

h_2 = Altura media de salida de la barra

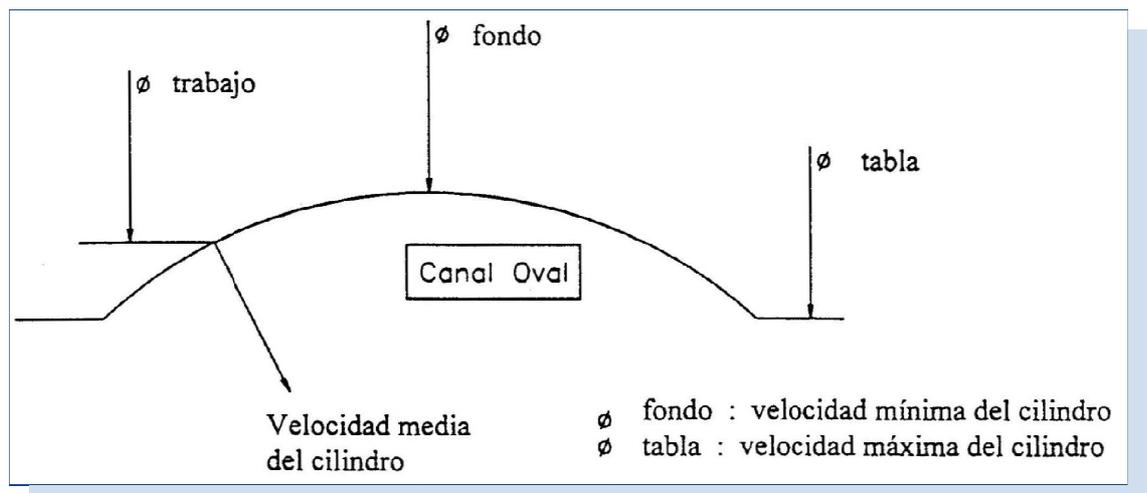


Figura 2.5. Ubicación del diámetro de trabajo

2.5. FUERZA DE LAMINACION

La resistencia a la deformación es la tensión necesaria para una determinada reducción permanente del material o la barra en ciertas condiciones del proceso.

A continuación se presentan la ecuación de Ekelund, el cual la resistencia depende de la composición del acero y la tenacidad:

SEGÚN EKELUND:

$$R_w = 100 \times \eta \times (1.4 + C + Mn + 0.3 \times Cr) \quad (2.8)$$

Donde:

C = % de carbono

Mn = % de manganeso

Cr = % cromo

η = tenacidad del material ($\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{mm}^2$)

$\eta = 0.01 \times (14 - 0.01 \times T)$

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

R_w es la resistencia a la deformación en kgf / mm^2 y tiene buenos resultados para acero estándar (0.15 % C y 0.45 % Mn).

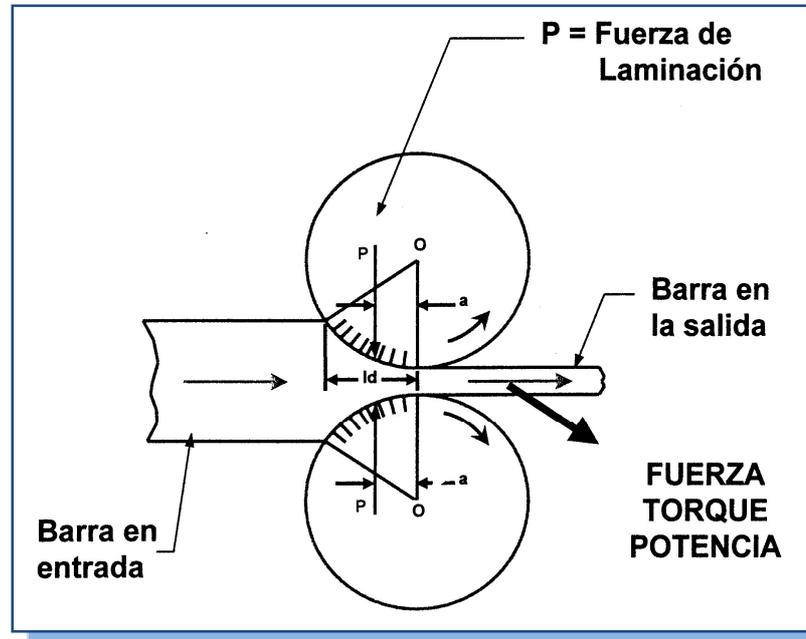


Figura 2.6. Fuerza de Laminación en la deformación de la barra.

Para determinar el torque y la potencia de laminación y así dimensionar los equipos mecánicos y eléctricos es necesario primeramente calcular las fuerzas que intervienen en la laminación. Con el valor de la resistencia a la deformación ya indicada como calcular, ahora será de utilidad para el cálculo de la fuerza de laminación.

Enseguida se presentan las ecuaciones más representativas para determinar la fuerza necesaria para deformar la barra en una pasada:

SEGÚN EKELUND:

$$P = (R_W + f_V) \times Ad \times f_g \times 9.8 \quad (2.9)$$

Donde:

f_g = factor de geometría de Ekelund = $1 + m$ (ver ec. 2.3)

f_V = factor de velocidad de Ekelund

$$f_V = \frac{k \times 2 \times \eta \times V \times \sqrt{\frac{(h_1 - h_2)}{R}}}{(h_1 + h_2)} \quad (2.10)$$

$k = 1.00$ para $0 < V < 6$ m/s

$k = 0.80$ para $6 < V < 10$ m/s

$k = 0.65$ para $10 < V < 15$ m/s

$k = 0.60$ para $15 < V < 20$ m/s

Una vez calculada la fuerza de laminación se calcula el torque de laminación por la siguiente relación:

$$M_W = \frac{2 \times P \times 0.455 \times ld}{1000} \quad (2.11)$$

Donde:

$$ld = \sqrt{R \times \Delta h} \quad (2.12)$$

Pero el torque total será:

$$M_t = M_W + M_a + M_V \quad (2.13)$$

Donde:

$$M_a = \text{Torque Fricción} = \mu_m \times D_p \times P / 1000$$

M_v = Torque en vacío.

Ahora con el torque de laminación calculamos la potencia de laminación, la cual está dada por:

$$N_W = \frac{M_W \times rpm_{cilindros}}{9550} \quad (2.14)$$

Y la potencia total estará dada por:

$$N_t = \frac{M_t \times rpm_{cilindros}}{9550 \times 0.945} \quad (2.15)$$

Los torques están dados en Nm

3. VARIABLES DE TRABAJO

3.1. TEMPERATURAS EN EL TREN LAMINADOR

La temperatura de la barra influye en forma muy importante en el proceso de laminación.

Los siguientes ítems son producidos por un aumento en la temperatura de la barra:

- Menor ensanchamiento y mayor reducción de área.
- Menor fricción barra – cilindro.
- Menor fuerza de laminación.
- Propiedades mecánicas y estructura metalúrgica

La mayor pérdida de calor se da por radiación y depende de la distancia entre pasadas y del tiempo entre pasadas.

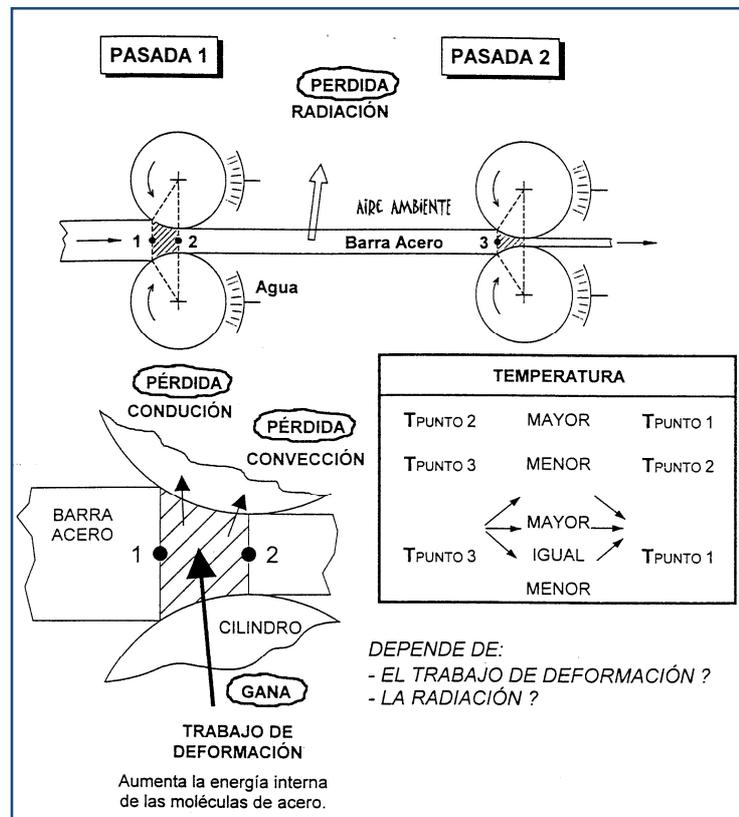


Figura 2.7. Variaciones de temperatura en el laminado.

Las pérdidas por convección y conducción de la barra a los cilindros son pequeñas y se puede despreciar.

Cuando se produce el trabajo de deformación de los cilindros en la barra se produce un ligero aumento de la temperatura aumentando la energía interna de las moléculas del acero.

La cascarilla formada sobre la superficie de la barra posee propiedades aislantes y disminuye la pérdida de temperatura. Como provoca defectos y disminuye la calidad del producto, debemos retirarla durante el proceso de laminación.

Los cálculos de variación de temperatura se realizan con los modelos de Geleji:

Ganancia de temperatura por transferencia de energía:

$$\Delta\theta_u = \frac{A_d \times R_W \times v \times t_B}{G \times C_p \times 427} \quad (2.16)$$

Donde:

A_d = área de contacto proyectada

R_W = Resistencia de deformación

C_p = calor específico del material de la barra

v = Velocidad tangencial del cilindro

G = Masa de la barra

t_B = tiempo de contacto entre el cilindro y la barra

Pérdida de temperatura por conducción térmica:

$$\Delta\theta_L = \frac{2 \times l_d \times b_m \times (T_L - T_C) \times t_B \times \phi}{G \times C_p} \quad (2.17)$$

Donde:

l_d = arco de contacto

b_m = ancho medio

T_c = temperatura del cilindro de laminación (~50°C)

T_L = Temperatura de la barra

t_B = Tiempo de contacto de entre el cilindro y la barra

ϕ = coeficiente de transferencia de calor del acero (~ 3,500 kcal/m².h°C)

G = Masa de la barra

C_p = Calor específico del acero

Pérdida de temperatura por radiación:

$$\Delta\theta_S = \frac{\varepsilon \times C_G \times Z \times A_R \times \left[\left(\frac{T_L}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right]}{G \times C_p} \quad (2.18)$$

Donde:

ε = Coeficiente de radiación de la barra (0.85)

C_G = Factor de corrección del modelo

Z = Tiempo de radiación

A_R = Área radiante superficial

T_L = temperatura de la barra

T_a = temperatura ambiente

Entonces la temperatura de la siguiente pasada es:

$$T_{n+1} = T_n + \Delta\theta_u - \Delta\theta_L - \Delta\theta_s \quad (2.19)$$

3.2. REFRIGERACION DE LOS CILINDROS

Un procedimiento muy importante es la técnica de enfriamiento que se debe usar, para evitar los efectos peligrosos de los golpes térmicos que se efectúan durante la operación del cilindro en el laminador. Los períodos alternos de calentamiento intensivo y de enfriamiento rápido de la superficie del cilindro, de corta o larga duración, crean peligrosas tensiones, además de las de compresión y flexión a las cuales está sometido el cilindro, que pueden causar graves daños si éstas no se controlan continuamente.

Para limitar en lo posible las tensiones de origen térmico producidas en los cilindros, hay que tener en cuenta una serie de factores:

- A mayor temperatura de laminación y longitud de barra, mayor debe ser la refrigeración de los cilindros.

- Una elevada productividad exige una refrigeración especialmente abundante.
- Si las demoras son cortas, se puede mantener la refrigeración continua de los cilindros.
Si las demoras son largas, se debe cortar el paso de agua o disminuir su cantidad.
- Si los cilindros no están girando debe cerrarse el agua, porque de lo contrario se enfrían desigualmente y se producen grandes tensiones de origen térmico, con peligro de rotura.
- Si la barra se queda trabada durante el proceso de laminación, hay que cortar el agua de inmediato ya que de lo contrario, el punto de contacto barra – cilindro tiene una temperatura mayor que el resto del cilindro dando origen a formación de grietas y rotura por tensiones de origen térmico.
- Mientras más alta sea la reducción de altura de la barra o si los pases son muy profundos, más intensa debe ser la refrigeración.
- Cuanto mayor sea la dureza del material del cilindro y cuanto más aleado esté, mayor debe ser la refrigeración.

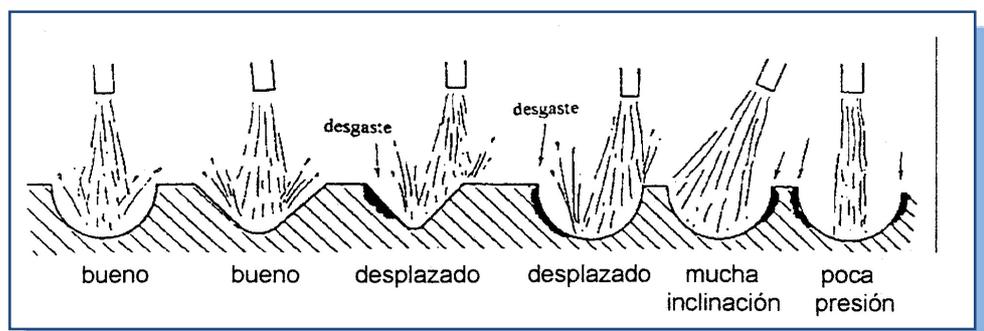


Figura 2.8. Posiciones de la ducha de refrigeración

3.3.CALIBRACION DE PRODUCTOS LARGOS DE ACERO

La calibración es la distribución de la deformación total deseada en la barra en un conjunto de deformaciones intermedias.

Estas deformaciones intermedias son llamadas pasadas de laminación y los diferentes tipos de conjuntos de pasadas son llamados secuencias de calibración.

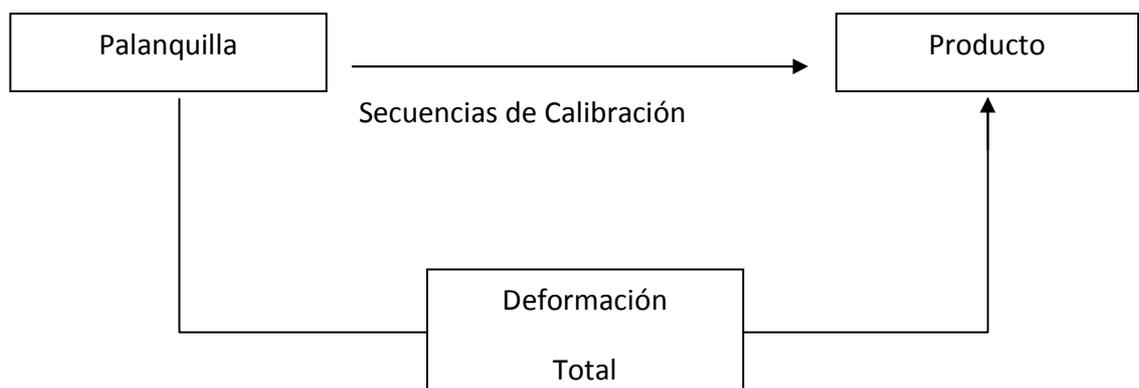


Figura 2.9. Para el proceso de laminación se requiere una secuencia de deformaciones, llamado calibración.

Los objetivos de la calibración son:

- Maximizar calidad de la deformación.
- Maximizar productividad.
- Reducir esfuerzos de laminación
- Facilitar operaciones complementarias (guiado, etc.).
- Minimizar costos.

Podemos clasificar las secuencias de calibración para laminación en caliente de productos largos de acero en: desbaste, intermedio y acabador.

La secuencia de desbaste:

- Deformación de secciones grandes.
- Esfuerzos de laminación altos.
- Peso lineal de las barras laminadas grande.
- Posible problema de agarre debido a Δh y a los ϕ de los cilindros.
- Las reducciones de áreas son medianas, controlar la forma de las pasadas.
- Movimiento de las pasadas determina la forma geométrica.

La secuencia intermedio:

- Deformación de secciones medianas.
- Esfuerzos medianos.
- Problema de agarre es pequeño.
- Altas reducciones de área.
- El movimiento de las pasadas es más flexible.
- El guiado asume un papel más importante.

La secuencia acabadora:

- Deforma los productos finales laminados.

- Determina la forma, dimensiones y calidad superficial.
- Determina las propiedades mecánicas.
- Esfuerzos de acuerdo al tipo y dimensiones del producto.
- Reducciones de áreas menores, el objetivo es la calidad.

A continuación describiremos las secuencias más importantes:

3.3.1. SECUENCIA CUADRADO - CAJÓN

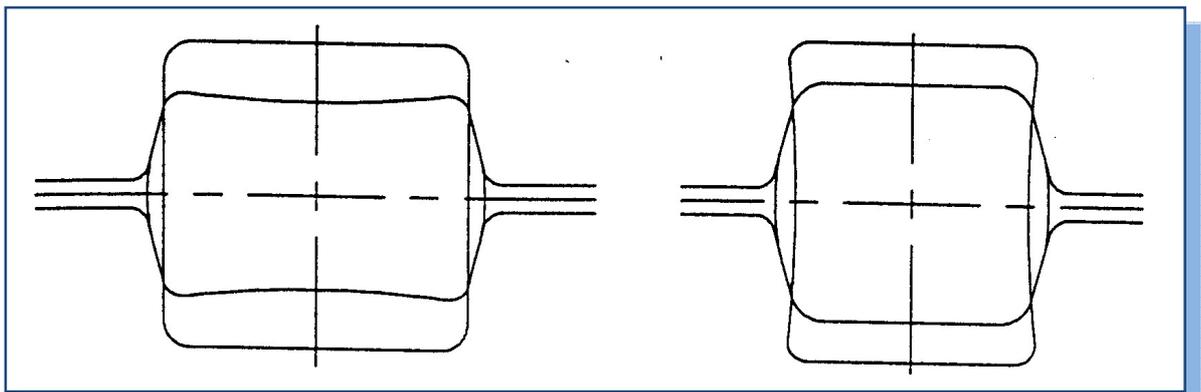


Figura 2.10. Secuencia cuadrado - cajón.

Aplicación:

- Inicio de laminación para palanquillas cuadradas.
- Trenes abiertos y primeras pasadas de desbastadores continuos. **En nuestro caso las dos primeras pasadas.**
- Normalmente en desbastadores abiertos con velocidades bajas (0.6 -1.5 m/s).
- Reducciones medianas en secciones pesadas.

- Se utiliza para las palanquillas de 130mm.
- Buen descascarillado.
- Buenas condiciones de agarre.
- Fondo abarrilado que determina agarre progresivo.

3.3.2. SECUENCIA REDONDO – OVALO – REDONDO

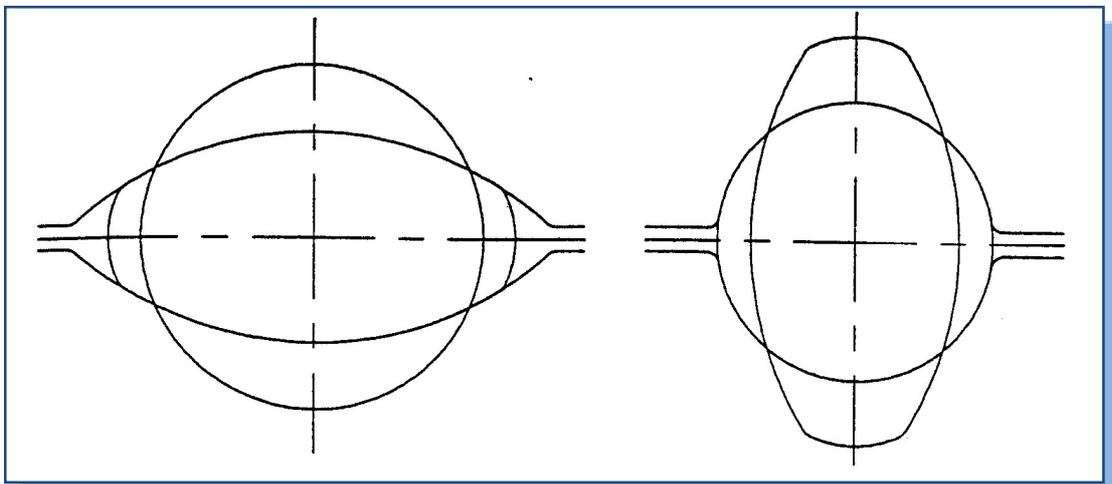


Figura 2.11. Secuencia óvalo - redondo.

Aplicación:

- Trenes continuos, como es el caso de nuestro proceso a partir de la tercera pasada, el tren es continuo.
- Reducción mediana y alargamiento mediano.
- La precisión en las medidas es importante.
- Secuencia preparadora para redondos mecánicos y alambón.
- Normalmente para secuencias con cuadrados menores que 40 mm.

3.3.3. DISEÑO DE CANALES

Para realizar la distribución de la deformación total del acero, los cilindros de laminación son mecanizados con canales de formas específicas en medidas para conseguir la reducción necesaria sin generar defectos en el producto. Para el diseño de los canales que darán forma al acero durante el conformado depende varios factores:

- Definir número de pasadas requeridas
- Criterio de rangos de reducción de áreas
- Cálculos de ensanchamiento (ver capítulo II punto 2.1.)
- Geometría de canales
- Fórmulas y tablas para distribución de reducciones de secuencias de calibrado

3.3.3.1. Estándares de reducción de área.

La reducción de área varía de acuerdo a la secuencia de calibración o tipo geométrico de la pasada. se presenta tabla de valores recomendadas para la reducción del área:

Tabla 16. Rango de reducciones de área por tipo de secuencias.

TIPO DE SECUENCIA	RANGO DE REDUCCIÓN DE ÁREAS
CUADRADO – OVALO - CUADRADO	20 % a 28 %
CUADRADO – OVALO SUECO - CUADRADO	25 % a 35 %
CAJÓN - CAJÓN	16 % a 30%
DIAMANTE - DIAMANTE	20 % a 30 %
REDONDO – OVALO - REDONDO	2 % a 14 %

3.3.3.2. Elongación Media y Reducción media

Este criterio se utiliza para definir el número de pasadas que se requiere tomando como referencia los rangos de reducción del punto anterior. Para ello se presenta las siguientes ecuaciones:

$$\text{Elongación media: } \lambda_m = \sqrt[n]{\frac{A_i}{A_f}} \quad (2.20)$$

n : número de pasadas

A_i : área transversal inicial de la secuencia (palanquilla)

A_f : área transversal final de la secuencia (producto)

$$\text{Reducción media: } R_m = \frac{\lambda_m^{-1}}{\lambda_m} \times 100 \quad (2.21)$$

3.3.3.3. Geometría de canales

Las dimensiones de los canales dependen de las medidas de la forma que se requiere en una pasada específica. Las dimensiones se dan en milímetros. Estas son:

Altura (H): Para el caso de redondos es el diámetro (D)

Fondo de canal (f): Es la altura (H) menos la luz entre dos.

Luz de cilindros (s): De 10% a 20% del diámetro D

Ángulo lateral (θ): De 15° a 30°

Radio de tabla (r): De 2 a 10 mm

Radio de fondo de canal (R): En caso de los redondos es el radio del área.

Ancho teórico (B_t)

Ancho de canal (B)

Ancho de fondo (B_f)

a) CANAL CAJÓN

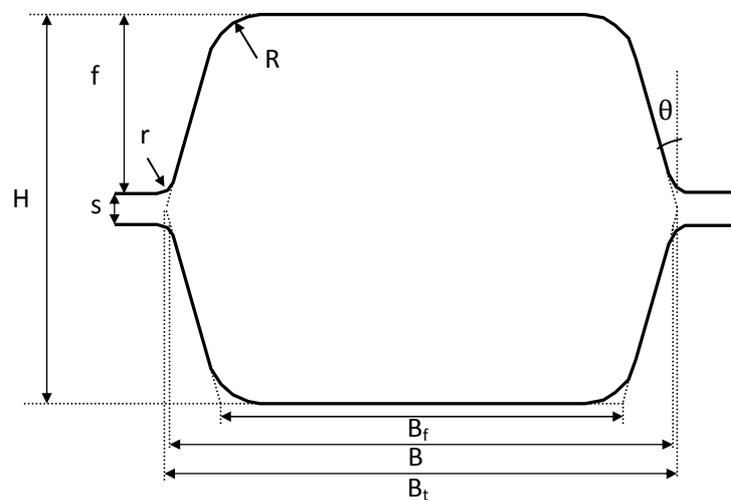


Figura 2.12. Dimensiones de un canal cajón.

El ancho de la forma reducida (b) debe encontrarse a la mitad de la pared del canal.

Entonces el ancho b (sección del acero) es:

$$b = \frac{B+B_f}{2} \quad (2.22)$$

$$\Delta b = \Delta H \times 0.2 \quad (2.23)$$

$$AREA = H \times b \times 0.975 \quad (2.24)$$

$$B_f = B_t - H \times \tan\theta \quad (2.25)$$

b) CANAL REDONDO

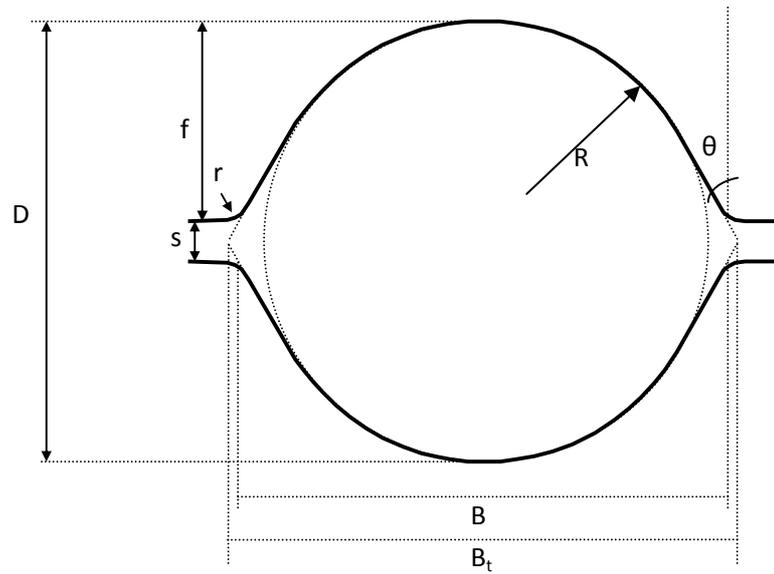


Figura 2.13. Dimensiones de un canal redondo.

$$AREA = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (2.26)$$

$$B_t = \frac{D}{\cos\theta} \quad (2.27)$$

$$B = \frac{D - s \times \text{sen}\theta}{\cos\theta} \quad (2.28)$$

c) CANAL ÓVALO

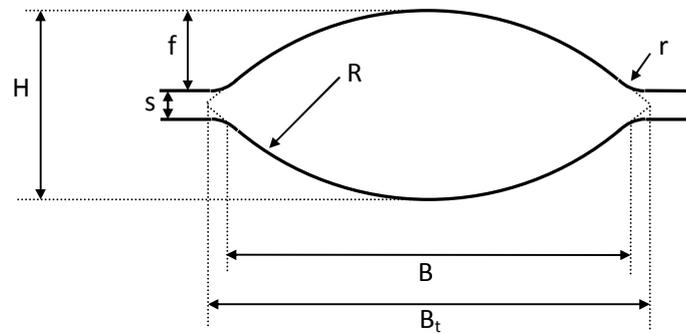


Figura 2.14. Dimensiones de un canal óvalo.

$$AREA = \frac{\pi \times H \times b \times 0.975}{4} \quad (2.28)$$

$$R = \frac{B_t^2 - H^2}{4 \times H} \quad (2.29)$$

$$B = \sqrt{4 \times R \times (H - s) - (H - s)^2} \quad (2.30)$$

El ancho de la forma (b) depende del ensanchamiento durante la reducción.

Ancho Teórico Ovalo

$$B_t = K_D \times K_1 \times K_2 \quad (2.31)$$

K_D: coeficiente de longitud

K₁: coeficiente de ensanchamiento

K₂: coeficiente de corrección

Ver diagramas en el anexo 1.

Altura De Canal Ovalo

$$H = \frac{3 \times A}{2 \times B} \quad (2.32)$$

3.3.3.4. Distribución de reducciones de secuencias de calibrado

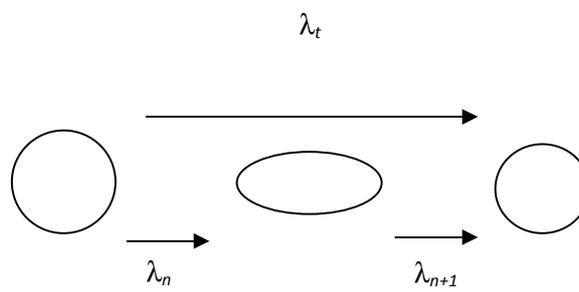


Figura 2.15. Secuencia de doble reducción.

REDONDO – REDONDO

$$\lambda_t = \lambda_n \times \lambda_{n+1} \quad (2.33)$$

REDONDO – OVALO – REDONDO

$$R_{n+1} = 0.6 \times R_n$$

$$\lambda_n^2 - 0.4 \times \lambda_t \times \lambda_n - 0.6 \times \lambda_t = 0 \quad (2.34)$$

Factor de corrección de distribución de elongaciones:

$$K = \sqrt[n]{\frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times \dots \times \lambda_n}{\lambda_t}} \quad (2.35)$$

3.4. ACCIONAMIENTO DEL TREN CONTINUO

Los motores de corriente continua operan con variación de velocidad manteniendo las condiciones de torque en cierto rango de velocidad, la variación de velocidad es muy importante en un laminador continuo. Esto permite hacer el ajuste del caudal del material laminado por pasada de laminación eliminando los problemas debidos a la tracción entre pasadas o la onda exagerada entre dos pasadas consecutivas.

La variación de velocidad puede ser obtenida modernamente también por las altas potencias nominales con motores de corriente alterna con variadores de frecuencia. Los variadores de frecuencia actúan en la velocidad del motor, procurando simular la misma variación obtenida con motores de corriente continua. El motor siderúrgico es normalmente diseñado para altas potencias. Existe una zona llamada "control de campo".

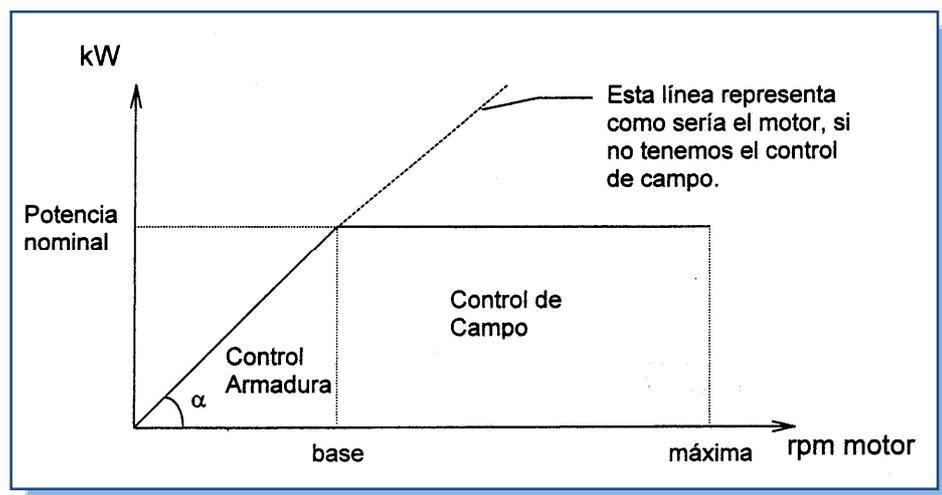


Figura 2.16. Límites del funcionamiento del motor de las cajas.

La línea recta de la potencia disponible desde la rotación cero hasta la rotación base representa la relación entre potencia y rotación. Esta relación potencia / rotación es el torque máximo del motor:

$$M_t = 9550 \times \left(\frac{N}{rpm} \right) \quad (2.36)$$

La inclinación α de la línea recta representa la intensidad del torque máximo del motor.

Por ejemplo en la siguiente gráfica el motor A tiene mayor torque máximo que el motor B:

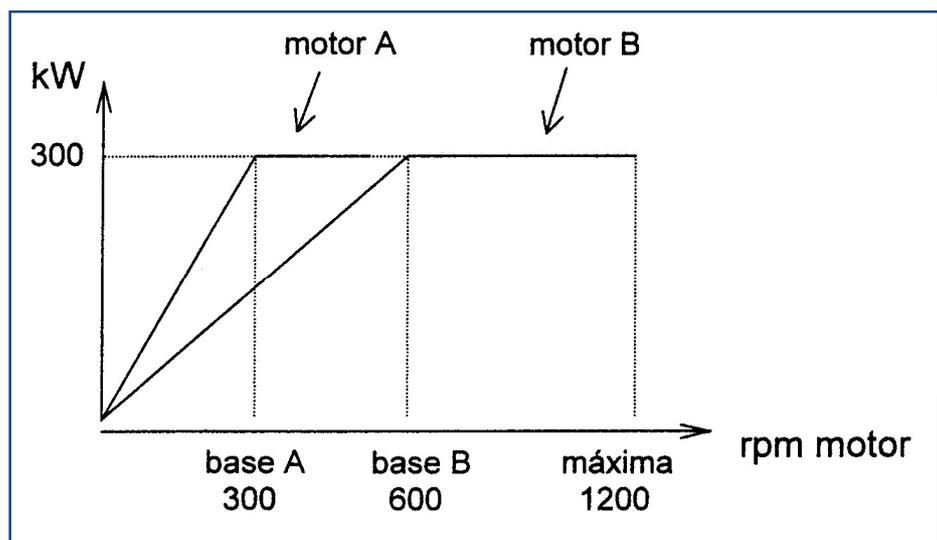


Figura 2.17. Comparación entre dos motores con línea base diferentes.

En conclusión en la zona de control de campo considerando un aumento en la rotación del motor tenemos que la potencia disponible permanece constante y el torque disponible disminuye.

En la zona de control de armadura, considerando un aumento en la rotación del motor, tenemos que la potencia disponible aumenta y el torque disponible permanece constante.

La relación de transmisión es una característica del equipo reductor o multiplicador de velocidad. La relación de transmisión determina la relación entre la rotación del motor y la rotación de los cilindros.

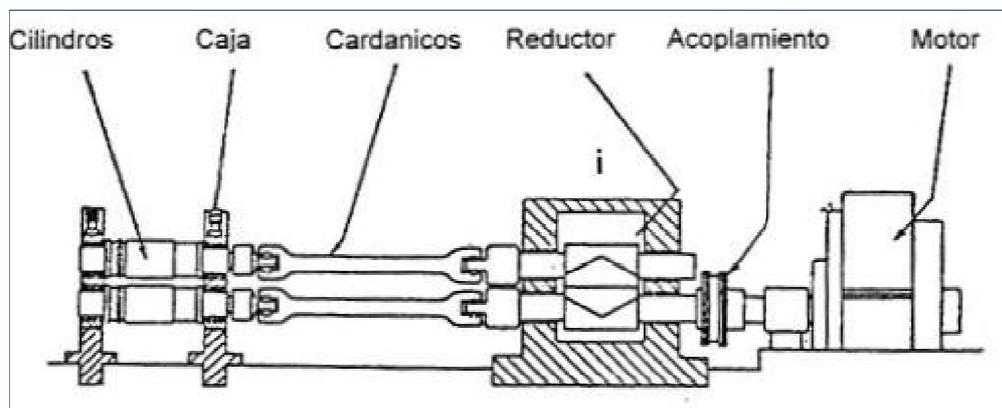


Figura 2.18. Ubicación del reductor

Donde “*i*” es la relación de transmisión.

$$RPM_{motor} = rpm_{cilindro} \times i \quad (2.37)$$

Ejemplos: $i = 1 : 2.5$ (reductor)

$i = 5 : 1$ (multiplicador)

Es importante para el proceso de laminación la rotación de los cilindros y la energía disponible en el sistema de accionamiento.

3.5. SOBRECARGA DE TORQUE

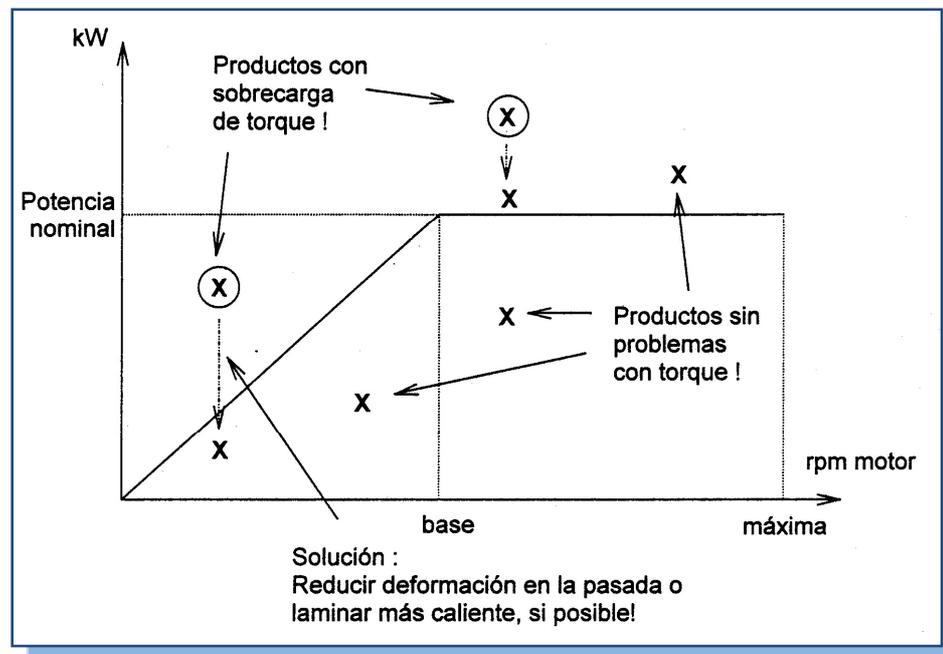


Figura 2.19. Comportamiento del torque en diferentes puntos de trabajo.

El torque de una pasada depende de la deformación, ósea del proyecto de calibración de la pasada. Las pasadas que tienen problema de sobrecarga de torque pueden tener solución cuando reducimos la deformación. Lo que quiere decir cambiando la calibración, el proyecto del canal o el ajuste de luz.

Otra posibilidad es laminar más caliente, si esto es posible. Variar la velocidad en esta situación no resuelve el problema.

3.6. SOBRECARGA DE POTENCIA

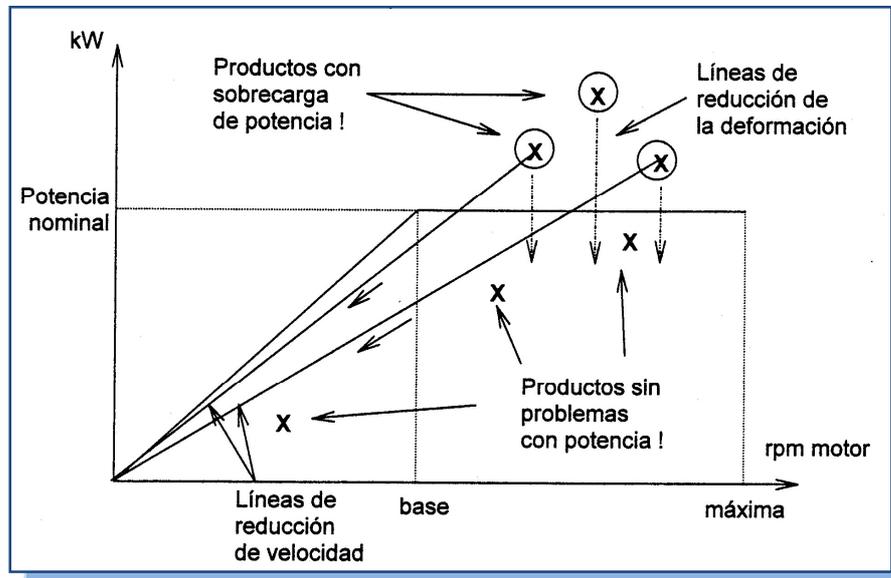


Figura 2.20. Cargas del motor en diferentes puntos de trabajo.

La potencia de la pasada depende básicamente de la velocidad de laminación y del torque de la deformación. Es posible resolver problemas de sobrecarga de potencia solamente reduciendo la velocidad de la pasada, ósea disminuyendo la velocidad del tren laminador. No es necesario cambiar la calibración o eliminar productos. El gran problema es que disminuye la producción del tren y por lo tanto es una decisión de compromiso.

Si no deseamos la reducción de la producción (velocidad), la alternativa es reducir la deformación, imaginando como un problema de sobre carga de torque. Para esto cambiamos la calibración, el proyecto del canal, los ajustes de luz o laminamos más caliente la barra.

4. ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO FINAL

El producto a desarrollar es una Barra redonda lisa de calidad 1018 y 1045 de diámetro de 1-1/16" con una longitud comercial de 6m cumpliendo con las normas técnicas de calidad (*ver anexo 5*). Siendo la densidad del acero laminado 7,850 kg/m³, el peso métrico nominal para este producto es **4.491 kg/m**.

De acuerdo a las condiciones para la ejecución del proceso mencionado en los puntos anteriores, se realizaron los cálculos (ver los resultados en el siguiente capítulo) de fuerza de laminación, velocidad, reducción, cargas de los motores y dimensiones de las pasadas tomando en consideración las tolerancias dimensionales y requisitos de la calidad del producto final.

La calidad del producto nos indica que estas barras serán utilizadas por nuestros clientes para ser calibradas, es decir, trefiladas (un proceso posterior a la laminación) reduciendo su sección transversal para obtener barras que serán mecanizadas para obtener piezas de alta precisión.

CAPITULO III

REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La prueba de producción se realizó tomando como parámetros de inicio los valores calculados para la laminación de las palanquillas de acero. El producto a fabricar es barra redonda lisa de 1-1/16" (26.99mm) de diámetro de calidad 1018 y 1045. Para ello se debe establecer la temperatura de trabajo para calentar la palanquilla, los números de pasadas para la reducción de áreas así como las medidas del calibrado, las cargas y potencias de los equipos del tren de laminación.

Así mismo una vez establecido los parámetros se registraron los valores reales obtenidos durante las pruebas para su comparación con lo teórico y su estandarización. De igual forma se llevó el control de la calidad del producto tales como tolerancias dimensionales, calidad superficial e inspección metalográfica.

1.1. EQUIPOS UTILIZADOS

- a) Un horno de recalentamiento automatizado nivel 2.
- b) Un tren de laminación con capacidad de 18 pasadas.
- c) Cizallas volantes despuntadoras y divisora
- d) Placa de enfriamiento
- e) Cizalla de corte en frío

1.2. MATERIA PRIMA

La palanquilla de acero a utilizar es:

Sección: 130 x 130mm

Longitud: 14m

Peso: 1850 kg

1.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CALIDADES

1.2.1.1. ACERO AISI-SAE 1018

a) Descripción: este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

b) Normas involucradas: SAE J403 JUN00 – ASTM A29/ A 29M - 05

- c) Propiedades mecánicas:** Dureza 126 HB (71 HRb)
- Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)
- Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)
- Elongación máxima 15% (en 50 mm)
- Reducción de área 40%
- Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)
- Maquinabilidad 76%
- d) Propiedades físicas:** Densidad 7.85 g/cm³ (0.284 lb/in³)
- e) Propiedades químicas:** 0.15 – 0.20 % C
- 0.60 – 0.90 % Mn
- 0.03 % P máx.
- 0.05 % S máx.

f) Usos: se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina.

1.2.1.2. ACERO AISI-SAE 1045

a) Descripción: es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es

recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada.

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

b) Normas involucradas: SAE J403 JUN00 – ASTM A29/ A 29M - 05

c) Propiedades mecánicas: Dureza 163 HB (84 HRb)

Esfuerzo de fluencia 310 MPa (45000 PSI)

Esfuerzo máximo 565 MPa (81900 PSI)

Elongación 16% (en 50 mm)

Reducción de área (40%)

Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

Maquinabilidad 57%

d) Propiedades físicas: Densidad 7.85 g/cm³ (0.284 lb/in³)

e) Propiedades químicas: 0.43 – 0.50 % C

0.60 – 0.90 % Mn

0.03 % P máx.

0.05 % S máx.

f) Usos: los usos principales para este acero es piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches.

g) Tratamientos térmicos: se da normalizado a 900°C y recocido a 790°C

1.3. CALENTAMIENTO

El horno de recalentamiento tiene una capacidad de 80 t/h, de alimentación continua con capacidad de 105 palanquillas de 1850 kg cada una. El tiempo de calentamiento para una barra a lo largo de su desplazamiento es de 2 horas aproximadamente.

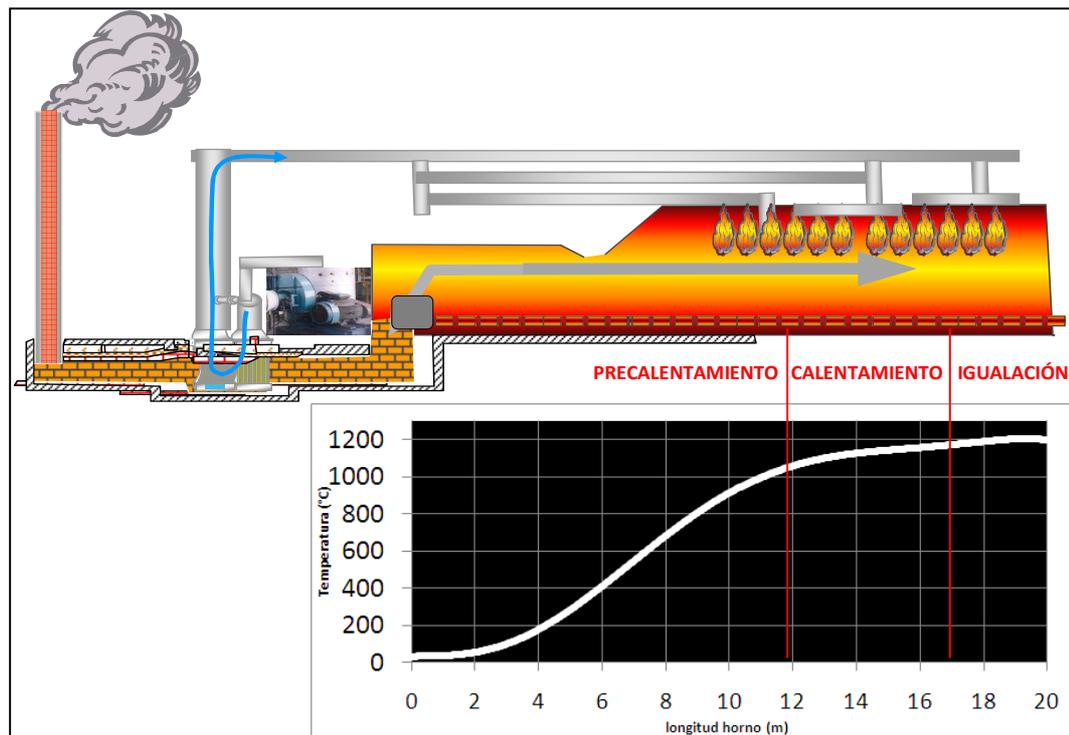


Figura 3.1. Perfil calentamiento de las palanquillas en el horno

La **Figura 3.1**, muestra el croquis de vista perfil del horno de recalentamiento. Este croquis muestra la posición de los 64 quemadores en el techo del horno y el avance de las palanquillas por las tres zonas de calentamiento, donde conforme avanza adquieren mayor temperatura. Durante el calentamiento se forma una capa de óxido llamado cascarilla el cual es inherente al proceso pero se controla su mínima generación con la relación aire/gas natural. Los valores de trabajo en el horno se muestran a continuación:

Tabla 17. Rango de trabajo real de temperatura en el horno de recalentamiento.

	PRECALENTAMIENTO	CALENTAMIENTO	IGUALACIÓN
TEMPERATURA °C	1040 - 1091	1185 - 1203	1173 - 1185
RELACIÓN EXCESO AIRE/GAS NATURAL	1.00	0.94 - 0.95	0.94 - 0.95

Una vez que sale la palanquilla del horno, hay una caída de temperatura de 50°C aprox. por pasar de un entorno caliente (horno) a un entorno frío (medio ambiente), teniendo al final **Temperatura de inicio para la laminación de 1120 - 1150°C.**

1.4. CALIBRADO

El criterio para elegir la secuencia de calibrado es que las dos primeras pasadas deben ser de forma cajón – cajón para facilitar el desprendimiento de la cascarilla así como facilitar la trituración de los granos dendríticos de la palanquilla.

Calibrado de la formas tipo cajón:

Área transversal de la palanquilla: 16900 mm²

Área final (del producto): $A_f = \frac{\pi \times (26.99)^2}{4} = 572 \text{mm}^2$

De acuerdo a la tabla 1, considerando un porcentaje de reducción de la primera pasada:

$R_1 = 28\%$, entonces $\lambda_1 = 1.39$

Área: $A_1 = \frac{16,900}{1.39} = 12,160 \text{mm}^2$

De igual forma para la pasada 2:

$R_1 = 18\%$, entonces $\lambda_1 = 1.22$

Área:
$$A_2 = \frac{12,160}{1.22} = 9,967\text{mm}^2$$

Como la segunda pasada debe ser de forma regular, es decir un cuadrado, se calcula los lados:

$$L_2 \times L_2 \times 0.975 = 9,967\text{mm}^2$$

$$L_2 \approx 101\text{mm}$$

Como ya tenemos el lado del cajón cuadrado de la pasada 2, complementamos las demás dimensiones de acuerdo a los criterios del punto 3.3.3.3. (a) del capítulo 2:

Tabla 18. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo cajón.

	Área	Ángulo lateral	Altura H (mm)	Luz S (mm)	Ancho de canal B (mm)	Ancho del fondo B _f (mm)	Ancho teórico B _t (mm)
A ₁	12,160	11.5°	92.7	19	153.6	138.5	157.4
A ₂	9,967	11.5°	101	18	109.4	92.6	113.1

Calibrado de la formas tipo redondo:

Ya se tiene dos pasadas para la reducción, ahora se requiere saber cuántas pasadas adicionales se necesitan, el cual la siguiente secuencia a usar es la redondo –ovalado –redondo. Para ello utilizamos las ecuaciones (2.20) y (2.21):

Elongación media:
$$\lambda_m = \frac{n\sqrt{A_2}}{\sqrt{A_f}} = \frac{n\sqrt{9967}}{\sqrt{572}} = \sqrt[3]{17.42}$$

El rango de reducción en esta secuencia es de 12% a 28% entonces comenzamos a tabular los valores del número de pasadas y tenemos los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 19. Estimación del número de pasadas para la secuencia óvalo-redondo.

n	λ_m	R _m	Evaluación
6	1.610	37.9%	Incorrecto
8	1.429	30.0 %	Incorrecto
10	1.330	24.8 %	Correcto
12	1.269	21.5 %	Correcto

Entonces tenemos 2 alternativas, pero como queremos garantizar la capacidad de los equipos y evitar posibles cargas elevadas escogemos la última opción (12). Esto sumado a las dos primeras pasadas ya calculadas, entonces el proceso consta de catorce pasadas (14) para reducir la palanquilla y obtener el producto final. Ahora hallamos el área y diámetro de los redondos de la secuencia, para ello primero calculamos los diámetros referenciales:

$$\lambda_t \text{ Redondo} - \text{Redondo:} \quad 1.269 \times 1.269 = 1.611$$

Tabla 20. Valores de los diámetros referenciales de los canales tipo redondo.

	Área (mm ²)	Diámetros referenciales (mm)
A₄	$\frac{9,967}{1.611} = 6,186$	89
A₆	$\frac{6,186}{1.611} = 3,840$	70
A₈	$\frac{3,840}{1.611} = 2,384$	55
A₁₀	$\frac{2,384}{1.611} = 1,480$	44
A₁₂	$\frac{1,480}{1.611} = 919$	34
A₁₄	$\frac{919}{1.611} = 3,840$	27

Con estos diámetros referenciales obtenemos las elongaciones reales de acuerdo a la curva de ajuste de LENDL realizando el promedio geométrico. **Ver anexo 2:**

Tabla 21. Elongaciones corregidas de las pasadas tipo redondo.

	λ curva	Promedio geométrico	Corrección
A₄	1.92	$\sqrt[6]{\frac{1.92 \times 1.92 \times 1.92 \times 1.84 \times 1.76 \times 1.60}{17.42}} = 1.131$	$\frac{1.92}{1.131} = 1.698$
A₆	1.92		$\frac{1.92}{1.131} = 1.698$
A₈	1.92		$\frac{1.92}{1.131} = 1.698$
A₁₀	1.84		$\frac{1.84}{1.131} = 1.627$
A₁₂	1.76		$\frac{1.76}{1.131} = 1.556$
A₁₄	1.60		$\frac{1.60}{1.131} = 1.414$

Con estas elongaciones obtenemos las áreas finales de los redondos de la secuencia de reducción así como las dimensiones de los canales de acuerdo a los criterios en indicados en el punto 3.3.3.3. (b) del capítulo 2:

Tabla 22. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo cajón.

	Área mm ²	Diámetro D (mm)	Luz de canal S (mm)	Angulo lateral	Ancho de canal b (mm)
A₄	$\frac{9,967}{1.698} = 5,890$	86	13	30°	91.9
A₆	$\frac{6,186}{1.698} = 3,469$	66	10	30°	70.5
A₈	$\frac{3,840}{1.698} = 2,043$	51	7.7	30°	54.5
A₁₀	$\frac{2,384}{1.627} = 1,255$	40	6.0	30°	42.7
A₁₂	$\frac{1,480}{1.556} = 806$	32	3.2	30°	35.1
A₁₄	$\frac{919}{1.414} = 572$	27	1.4	15°	27.6

Calibrado de la formas tipo óvalo:

Para hallar el área de los óvalos se requiere calcular las elongaciones de esta pasada, entonces utilizando las ecuaciones (2.33) y (2.34) se calcula la raíz cuadrática mediante la fórmula conocida:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.1.)$$

Y se obtiene los siguientes valores:

Tabla 23. Áreas de los canales tipo óvalo.

	Elongación (λ_n)	Área $n = \frac{A_{n-1}}{\lambda_n}$ mm ²
A₃	1.380	$\frac{9,967}{1.380} = 7,222$
A₅	1.380	$\frac{5,890}{1.380} = 4,268$
A₇	1.380	$\frac{3,469}{1.380} = 2,514$
A₉	1.394	$\frac{2,043}{1.394} = 1,466$
A₁₁	1.326	$\frac{1,255}{1.326} = 946$
A₁₃	1.246	$\frac{806}{1.246} = 647$

Con el área obtenida calculamos las demás dimensiones del canal de los óvalos de acuerdo a los criterios en indicados en el punto 3.3.3.3. (c) del capítulo 2:

Tabla 24. Valores de los canales de las dos primeras pasadas tipo óvalo.

	Ancho teórico B_t (mm)	Altura H (mm)	Luz de canal S (mm)	Radio R (mm)	Ancho de canal b (mm)
A₃	147.5	73.7	11.0	92.2	138.6
A₅	129.6	49.4	7.4	97.3	120.8
A₇	99.5	37.9	5.7	74.8	92.7
A₉	77.3	28.5	4.3	59.6	72.0
A₁₁	59.6	23.8	2.7	43.3	56.6
A₁₃	46.6	20.8	2.1	31.3	44.6

Finalmente estos valores se verifica calculando el ensanchamiento con la ecuación de Ekelund (ec. 2.2) realizando las correcciones del calibrado mediante la variación de las luces. Se diseñó los canales con las medidas obtenidas (ver **anexo 4.**) para el mecanizado de los cilindros de laminación. Posteriormente se realiza una simulación del proceso con todos los parámetros del tren de laminación utilizando todas las ecuaciones mencionadas en el capítulo II y III, tanto en la secuencia de reducción, velocidades y cargas de los motores obteniéndose los siguientes valores¹:

¹ La forma de desarrollar la fórmula de Ekelund se encuentra en el anexo 5 y el ejemplo de secuencia de cálculos para fuerzas, velocidades y potencias se encuentra en los anexos 6.

Tabla 25. Parámetros obtenidos por los cálculos teóricos para el proceso de laminación de barra redonda lisa ϕ 1-1/16"

SOLVER=0	CAJA	Forma	ALTIURA	ANCHO	LUZ	REDUCTOR MOTOR	TORQUE EN VACIO	DIAMETRO CIENDRO	DISTANCIA CON LA CAJA	AREA	REDUCCIÓN %	ELONGACIÓN N	LONGITUD FINAL	VELOCIDAD	RPM CIENDRO	RPM MOTOR	POTENCIA LAMINACIÓN N	POTENCIA TOTAL Kw	DIAMETRO TRABAJO	TEMPERATURA
	PALANQUILLA	1	130	130	mm	mm	N.m	mm	mm	mm ²	%	N	mm	m/s	rpm	rpm	Kw	Kw	mm	°C
0.00	1	1	85	142.5	11.3	60.000	100	650	5	11746.1	30.1	1.432	20.00	0.210	6.92	415.4	75.0	79.6	578.9	1116
0.00	2	2	101	100.8	18.0	49.320	100	650	4.5	9873.5	15.9	1.190	23.75	0.250	8.36	412.5	64.8	68.8	570.0	1095
0.00	3	7	73.7	112.9	11.0	68.340	100	650	3.5	7133.6	27.5	1.380	32.84	0.345	11.01	732.5	77.0	81.9	597.6	1038
0.00	4	4	84	84.0	11.0	40.140	100	500	2	5339.4	22.6	1.291	42.41	0.445	19.09	766.4	90.0	95.8	445.0	1033
0.00	5	3	46	100.1	4.0	36.611	100	500	5.5	3527.0	36.3	1.571	66.60	0.699	28.47	1042.3	218.0	231.6	468.8	1024
0.00	6	4	62	61.1	6.0	24.110	100	500	3.5	2976.3	15.6	1.185	78.93	0.828	34.58	833.8	152.8	162.5	457.3	1019
0.00	7	3	42.2	68.7	10.0	17.983	100	500	3.5	2220.1	25.4	1.341	105.81	1.110	44.39	798.2	142.8	152.2	477.7	1016
0.00	8	4	45.5	49.6	6.2	13.479	100	500	3.5	1928.6	13.1	1.151	121.80	1.278	52.23	704.0	116.0	123.8	467.3	1013
0.00	9	3	33.2	56.3	9.0	10.300	100	500	6.2	1432.3	25.7	1.346	164.01	1.721	67.96	700.0	167.7	178.9	483.6	1009
0.00	10	4	39.5	39.5	5.5	7.535	100	420	4.5	1226.9	14.3	1.167	191.46	2.009	97.25	732.8	132.9	142.2	394.5	1006
0.00	11	3	24.5	47.1	3.4	7.542	100	470	11.8	884.1	27.9	1.388	265.72	2.788	117.11	883.3	224.1	239.4	454.6	1000
0.00	12	4	32.5	32.6	3.7	5.389	100	470	4.5	831.0	6.0	1.064	282.69	2.966	126.39	681.1	146.6	157.2	448.2	998
0.00	13	3	23.3	36.8	4.6	4.157	100	470	4.5	657.2	20.9	1.264	357.43	3.750	156.81	651.9	139.8	171.7	456.7	996
0.00	14	4	27.3	27.3	1.4	3.621	100	380	4.5	563.3	11.2	1.127	402.74	4.225	224.16	811.7	129.0	139.6	360.0	994

FORMA	1	2	3	4	5	6	7
cajón							
cuadrado							
óvalo							
redondo							
liso							
diamante							
Ovalo cajón							

DATOS DE INICIO	
PESO PALANQUILLA	1850 kg
SECCIÓN PALANQUILLA	130 mm
RITMO DEL HORNO	70 t/h
TEMPERATURA INICIO	1150 °C
Número de hilos	1

1.5. LAMINACIÓN EN CALIENTE



Figura 3.2. Laminación de la barra en la caja N° 9.

En la **Figura 3.2**, se muestra el tren laminador que para esta medida del producto se utilizó 14 pasadas. El tren está compuesto por equipos de motores de 400 a 600 Kw de potencia cada una, casetas con pares de cilindros que efectúan la compresión de la barra con la forma del canal mecanizado en los cilindros. Las dos primeras pasadas se utilizó la secuencia cajón – cajón para el inicio del laminado y las siguientes pasadas se utilizaron la secuencia óvalo – redondo para garantizar las medidas y la calidad superficial.

Al ingreso de las pasadas se utiliza guías de entrada para encaminar la barra hacia los canales de los cilindros. En el caso de las formas de óvalos, se utiliza guías de rodillos con

la forma teniendo una **tolerancia de +0.4mm** para estabilizar el ingreso de la barra y no reviente a un lado en la siguiente forma redonda.



Figura 3.3. Guías de rodillos utilizadas en la prueba de laminación.

1.6. PARAMETROS DEL TREN UTILIZADOS EN EL PROCESO

Tomando como punto de partida los parámetros de simulación del proceso indicados en la **tabla 11**, se realizaron las pruebas y con las regulaciones de los equipos para la obtención del producto dentro los rangos de calidad, se muestra los resultados a continuación:

Tabla 26. Calibrado obtenido luego de aplicar los parámetros teóricos en la prueba.

Caja	FORMA	Calibrado (mm)	Luz (mm)	Área (mm ²)	Reducción (%)	Velocidad (m/s)
1		90 x 140	16.3	11956.4	29.2	0.29
2		98 x 101	15.0	9184.8	23.2	0.35
3		70 x 115	6.3	7550.2	18.4	0.43
4		83 x 83.6	10.0	5808.8	24.6	0.57
5		47 x 107	5.0	3774.5	30.4	0.87
6		60 x 60.5	4.0	2827.4	26.7	1.24
7		42.6 x 70.0	10.4	2190.1	22.3	1.61
8		49.5 x 40.5	6.2	1809.6	18.2	1.95
9		33.8 x 58.1	9.6	1479.6	21.3	2.36
10		39.6 x 39.3	5.6	1209.0	18.8	2.75
11		26.6 x 47.1	5.5	925.3	22.9	3.45
12		29.5	0.7	750.0	18.9	4.28
13		23.8 x 33.7	5.1	648.1	13.6	4.98
14		27.10	1.2	565.0	12.8	5.70

Las cargas de motores reales obtenidos en la prueba de laminación se mantuvieron por debajo del 100% por lo que comprueba la factibilidad del proceso. Los valores se muestran a continuación:

Tabla 27. Cargas obtenidas luego de aplicar los parámetros teóricos en la prueba.

CAJA	CAPACIDAD MÁXIMA MOTOR(Kw)	DIAMETROS DE CILINDROS (mm)	TEMPERATURA DE LA PASADA (°C)	POTENCIA TOTAL DE LAMINACIÓN (Kw)	% CARGA
1	500	650	1122	425	35.0
2	500	650	1104	450	40.0
3	500	650	1053	275	55.0
4	500	500	1048	375	75.0
5	400	500	1040	260	65.0
6	500	500	1036	400	80.0
7	500	500	1033	275	55.0
8	400	500	1030	240	60.0
9	400	500	1027	340	85.0
10	400	420	1024	240	60.0
11	500	470	1019	350	70.0
12	400	470	1017	280	70.0
13	500	470	1015	175	35.0
14	500	380	1014	150	30.0

1.7. EVACUACIÓN DEL PRODUCTO

Una vez que se ha laminado hasta la forma del producto final, las barras fueron cortadas por la cizalla volante a una longitud de 60 m. El número de cortes que llegue a la placa por palanquilla se calcula aplicando la ecuación (1.3.) de la siguiente forma:

$$\frac{4 \times 130 \times 130}{\pi \times 26.99^2} \times 14 \times \frac{1}{60} \approx 7 \text{ cortes}$$

Estos 7 cortes por palanquilla son trasladados por la placa de enfriamiento al mismo ritmo de la producción. Durante su paso es enfriado al medio ambiente para no alterar la estructura interna del acero. La temperatura en esta zona fue medida por un pirómetro manual y son las siguientes:

Temperatura de llegada a la placa: **965°C – 978°C**

Temperatura a salida de la placa: **350°C – 450°C** (depende de la continuidad del ritmo de producción).

Finalmente las barras son cortadas en la Cizalla En Frío para dar la longitud comercial al producto el cual es 6m, por eso la longitud de la barra en placa es múltiplo de la longitud comercial para evitar merma de producción. Para ello se

calcula la longitud en caliente para evitar incumplir con las tolerancias por efecto de la contracción, para ello usamos el factor de dilatación $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, el resultado es:

$$6\text{m} \times [1 + 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times (450^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})] \approx \mathbf{6.030\text{ m}}$$

El producto con la longitud comercial es embalado con el peso de paquete estándar: cercano a las 2 toneladas. Para ello se calcula el número de varilla por paquete mediante el peso métrico nominal del producto (4.491 kg/m):

$$\frac{2,000\text{ kg}}{4.491\text{ kg/m} \times 6\text{m}} \approx \mathbf{74\text{ piezas por paquete}}$$

1.8. INSPECCIÓN DEL PRODUCTO



Figura 3.4. Inspección de medidas de una muestra de redondo liso \varnothing 1-1/6".

El procedimiento para el control de las medidas del producto se realizó tomando cada 20 minutos una muestra de los cortes en la placa de enfriamiento. Se enfriaron en agua solo para efectos de medición y se controlaron los diámetros de la barra redonda en cuatro puntos distintos: Fondo de canal, lado luz del canal y dos diagonales. Los resultados fueron satisfactorios luego de corregir las medidas con las variaciones de las luces de los canales en el tren de laminación. Los resultados podemos apreciarlos en el punto (2.3) del presente capítulo.

1.9. ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN

El proceso de laminación se dio con la palanquilla calentada, sale del horno y antes de ingresar al tren de laminación pasa por el descascarillador que mediante presión de agua retira la cascarilla (óxido por efecto del calentamiento) para evitar que durante el laminado estas marquen a la superficie de la barra.

La barra pasa por 14 cajas que efectúan el conformado y con corte de las puntas con cizallas volantes después de la pasada 4 y 10 para eliminar los pliegues en los extremos.

La secuencia se observa en la siguiente gráfica.



Figura 3.5. Uso del descascarillador.

1.9.1. La pasada 1

En la primera pasada se debe acondicionar la estructura interna para la creación de dislocaciones para ello, se tiene una forma cajón, rectangular, donde sus dimensiones

comparten con el calibrado de la mayoría de los productos de proceso estable. En esta pasada se dio **5 mm** más a la altura del calibrado por presentar dificultad en el agarre.

1.9.2. La pasada 2

Al igual que la pasada anterior, se tiene una calibrado de forma cajón con lados iguales, en este caso un cuadrado, no presentó reventones ni marcas en bajo relieve ya que a diferencia de las barras estándares, la barra pasa libre de cascarilla. Cabe indicar que estas dos primeras cajas son independientes con el resto del tren por lo que puede tener mayor velocidad de salida que si estuviera continuo, por lo que favorece en menos enfriamiento de la barra por el tiempo de permanencia.

1.9.3. La pasada 3

A partir de esta pasada, la sección cuadrada ingresa a una forma ovalada, pero esta forma de óvalo tiene las bases más rectas, para que tenga mayor zona de contacto con los lados del cuadrado, evitando deformidad del canal por desgaste irregular. Como este canal es más ancho que la pasada, sale vacío entonces se pudo cerrar **3.7mm** a la altura para compensar la abertura de la pasada 1 sin problemas de sobrellenado (reventón).

1.9.4. La pasada 4

Esta es la primera forma redonda en el proceso donde para mantener la barra en el ingreso se utiliza guía de rodillos planos el cual se ajustó con +0.2mm de altura para que mantenga el óvalo de la caja anterior. De acuerdo con la calibración teórica (\varnothing 84mm), se

tuvo que cerrar **1mm** más de altura (83mm) porque el ancho final era menor (82mm) por ello se compensó las dimensiones y además para no sobrecarga la pasada 5.

1.9.5. La pasada 5

Este óvalo tiene la mayor reducción teórica (36%) y por ello tiene carga de motor moderadamente alta por lo que la reducción de altura del redondo anterior ayuda a controlar la carga pero además se abrió **1mm** a la luz para aliviar la carga del motor consiguiendo un reducción final de 30% sin complicar el calibrado. Al inicio de la producción ya que por tener máxima reducción hubo inconvenientes de agarre y formación de bucle por lo que se tuvo que regular manualmente la velocidad (RPM) de la caja anterior, es decir reduciendo la velocidad para evitar la barra trabada.

1.9.6. La pasada 6

En esta pasada se presentó problemas de tensión de barra (tiro) distorsionando el caudal del material laminado por lo que se tuvo que aumentar la velocidad. Inicialmente se presentó un vacío en la pasada por que se optó por cerrar **1.5mm** para compensar las dimensiones y evitar la tensión de la barra en esta pasada.

1.9.7. La pasada 7

No hubo problemas de calibración ni de carga por lo que se hizo fue controlar las dimensiones de la pasada y el centrado de la guía de entrada para distribuir el material en la forma.

1.9.8. La pasada 8

En esta pasada se presentó un marcado del canal hacia la barra producto de un ligero sobre llenado por lo que se realizó la regulación en el calibrado dando de 1 a 2mm más a la altura de la pasada. Por efecto de la fuerza del paso de la barra hubo en un momento un desajuste de la guía de entrada por lo que comenzó a llenar a un lado, se detectó a tiempo y se centro de nuevo la guía de rodillos compartiendo el material en ambos lados.

1.9.9. La pasada 9

En esta pasada se tiene carga alta por las condiciones del proceso y menor capacidad del motor por lo que en todo momento se tuvo que regular las luces desde este punto hacia adelante, además a partir de esta pasada la barra deja la zona de desbaste e ingresa al tren intermedio y acabador haciendo uso de los formadores de bucle debido que la barra adquiere mayor velocidad y mayor sensibilidad para el control.

1.9.10. La pasada 10

Durante la producción se presentaron ralladuras en el producto final, uno de los motivos que se encontraron es que en la guía de entrada de esta pasada se estaba ametalando, un defecto debido a la fricción del paso de la barra con el interior del casquillo de la guía, por lo que se optó variar las dimensiones del casquillo y refrigerarlo con chorro de agua direccionado. El ametalamiento es la viruta de acero impregnado en el interior de la guía debida al paso estrecho por aumento de la calibración (requerimiento del proceso) y esta viruta trabaja como un punto filoso que raya la superficie de la barra.

1.9.11. La pasada 11

No hubo mayor inconveniente en esta pasada, se bien se tiene un alto porcentaje de reducción entre las pasadas del tren intermedio, su carga es constante ya que proviene de una forma redonda y la distancia entre la caja anterior y esta pasada es mayor por lo que otorga estabilidad y se realizó solo las regulaciones de rutina para mantener las medidas.

1.9.12. La pasada 12

Para mantener la medida del producto final se tuvo que cerrar las luces para disminuir el ingreso de material y el diámetro final, esta pasada es la que más se tuvo que cerrar (**3.0mm**) a comparación de las demás (de 0.5 a 1mm). Se cambió las medidas de regulación de las guías de rodillo para que pudieran mantener la barra. También se presentó sobrellenado en las luces por lo que se reguló uniformemente las medidas de las pasadas anteriores y pasar madera constantemente para que no apareciese de un momento a otro el sobrellenado y exista problemas de productos con defectos de pliegue. Se recomienda modificar la profundidad del canal para la próxima campaña.

1.9.13. La pasada 13

También llamada pre-acabador, esta pasada se trabajó manteniendo estrictamente las medidas del espesor y ancho con un rango de tolerancia de $\pm 0.5\text{mm}$ en las medidas del calibrado. Para garantizar que no exista defecto por cruzado se saca una muestra de la cola de esta pasada para regular la guía de entrada del acabador. Normalmente para el ingreso de una forma redonda a un canal óvalo se utiliza guía de fricción (sin rodillos)

pero en este caso donde esta pasada define la calidad superficial del producto se trabaja con guía de rodillos a la entrada del pre-acabador para minimizar y/o eliminar las ralladuras (*ver Figura 3.6.*)

1.9.14. La pasada 14

El acabador es la que define las regulaciones de calibrado durante el proceso y en consecuencia la forma final del producto. Por ello hemos laminado tendiendo el diámetro del redondo al nominal (26.99mm) ya que con el transcurrir la producción la variaciones de medida por desgaste de canales nos de la facilidad de regular el tren manteniendo la medida en el rango de tolerancia del diámetro de +0.5mm. Se presentaron problemas de cruzado cuando se cambiaron los canales de repuesto por lo fue importante que la Caseta Acabadora debe montarse con rodamientos nuevos para evitar el juego radial y/o axial. Para ello se reguló el juego axial. El mismo caso que la pasada 10, se presentó problemas de ametalamiento de las guía de entrada debido que el casquillo era muy preciso en la medida del ancho de la pasada, esto originó ralladuras en el producto por lo que se tuvo que cambiar de guía con nuevo perfil de forma de los rodillos.

2. RESULTADOS DE LA CALIDAD

2.1. CALIDAD SUPERFICIAL

2.1.1. DEFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LAMINACION



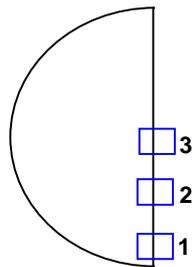
Figura 3.6. Ralladuras formadas en las primeras barras de prueba.

2.2. ENSAYOS METALGRÁFICOS

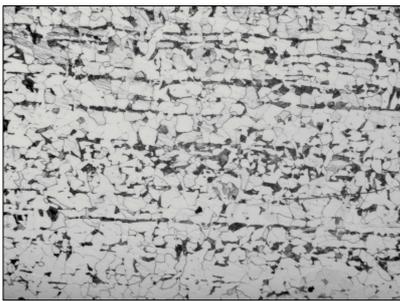
02 muestras de Redo P/C \varnothing 1.1/16": SAE 1018: colada 230838; SAE 1045: colada 230985

IDENTIFICACIÓN	CALIDAD	DEFECTOS	LIMPIEZA	MICROESTRUCTURA	TAMAÑO DE GRANO		
					SUPERF.	MITAD RADIO	CENTRO
REDO P/CALIBRAR 1 1/16"	1018	-	D - 2 - F	Ferrita / perlita bandeada	27.1	25.8	26.8
REDO P/CALIBRAR 1 1/16"	1045	Pliegue (0.12mm)	A-2-F/ D-1-F	Ferrita / perlita bord.	43.5	39.9	41.3

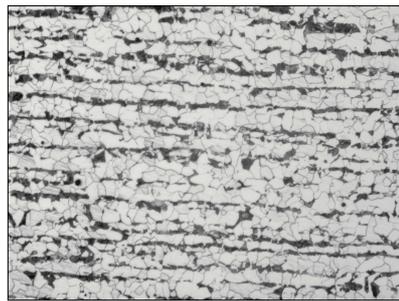
a) CALIDAD 1018



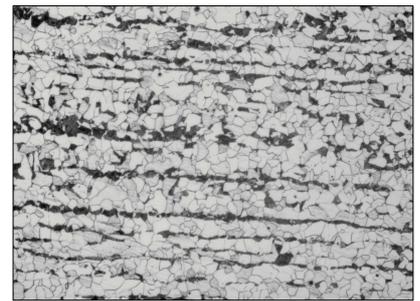
Redo p/calibrar \varnothing 1 1/16" 1018
col 230838- Micro estructura



1 Vista superficie, Nital, 100X



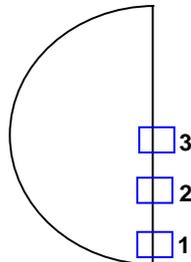
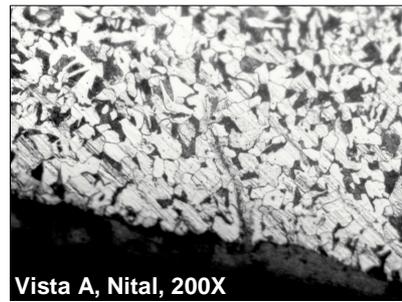
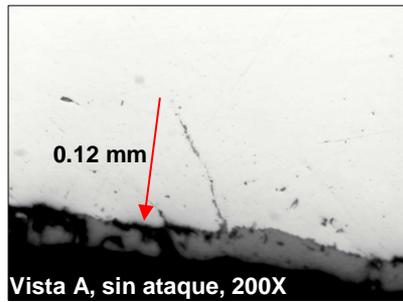
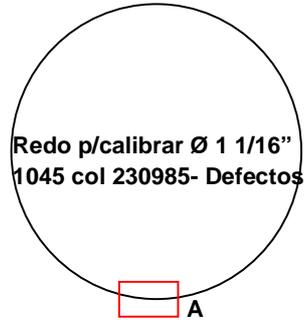
2 Vista mitad de radio, Nital, 100X



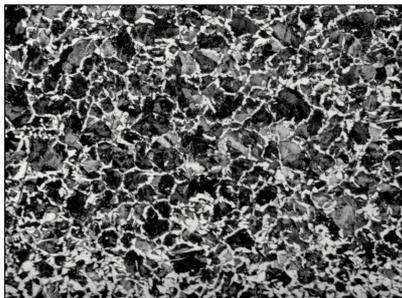
3 Vista mitad de sección, Nital, 100X

Figura 3.7. Análisis metalográfico a 100X de la estructura interna del redondo liso \varnothing 1-1/16" calidad 1018

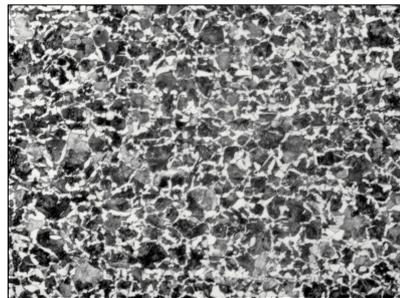
b) Calidad 1045



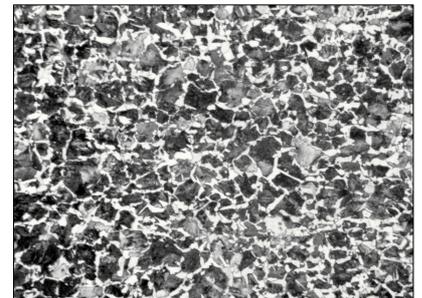
Redo p/calibrar \varnothing 1 1/16" 1045
col 230985- Micro estructura



1 Vista superficie, Nital, 100X



2 Vista mitad de radio, Nital, 100X



3 Vista mitad de sección, Nital, 100X

Figura 3.8. Análisis metalográfico a 100X de la estructura interna del redondo liso \varnothing 1-1/16" calidad 1045

2.3. TOLERANCIAS DIMENSIONALES

De acuerdo a la norma de calidad ASTM A29/A29M-05², las tolerancias dimensionales que se debe cumplir para obtener el producto de acero son las siguientes:

Tabla 28. Tolerancias dimensionales para barra redonda \varnothing 1-1/16"

CARACTERISTICA	NOMINAL (mm)	TOLERANCIA (mm)	VALORES DE TRABAJO (mm)
DIAMETRO	26.99	+ 0.38	27.35 máximo 26.65 mínimo
LONGITUD	5530	0 / +50	5530 mínimo 5580 máximo
OVALIZACION	-	0.45 máx.	0.45 máximo
FLECHA	5530	4 mm / m	22 mm máx.

Se presenta la siguiente estadística:

a) Calidad 1018

Tabla 29. Resultados de la inspección de medidas para la calidad 1018

Nº DE PAQUETE	INSPECCIÓN							DISPOSICIÓN
	DIMENSIONES (mm)					PESO MÉTRICO (kg/m)	INSPECCIÓN VISUAL	
	FONDO DE CANAL	DIAGONAL 1	LUZ ENTRE CILINDROS	DIAGONAL 2	OVALIZACIÓN			
1	26.91	26.80	26.78	26.94	0.16	4.485	RAY-LV-PL	CONFORME
	27.00	26.90	27.10	27.12	0.22	-	RAY-LV	CONFORME
19	26.90	26.77	26.96	27.02	0.25	4.500		CONFORME
	27.10	26.80	27.00	27.04	0.30	-		CONFORME
40	27.09	26.90	27.15	27.08	0.25	4.560		CONFORME
	27.16	27.06	26.96	27.16	0.20	-		CONFORME
62	27.30	26.98	27.20	27.15	0.32	4.569		CONFORME
	27.06	26.98	26.99	27.36	0.38	-		CONFORME
92	27.10	26.84	26.91	27.08	0.26	4.538	RAY-LV	CONFORME
	27.23	27.20	26.83	27.01	0.40			CONFORME
111	27.10	26.84	26.91	27.24	0.40	4.540	RAY-LV	CONFORME

² En coordinaciones con nuestro cliente interno ACAL, se tomó como referencia esta norma, ya que las tolerancias fueron modificadas ligeramente por los requerimientos del proceso de nuestro cliente.

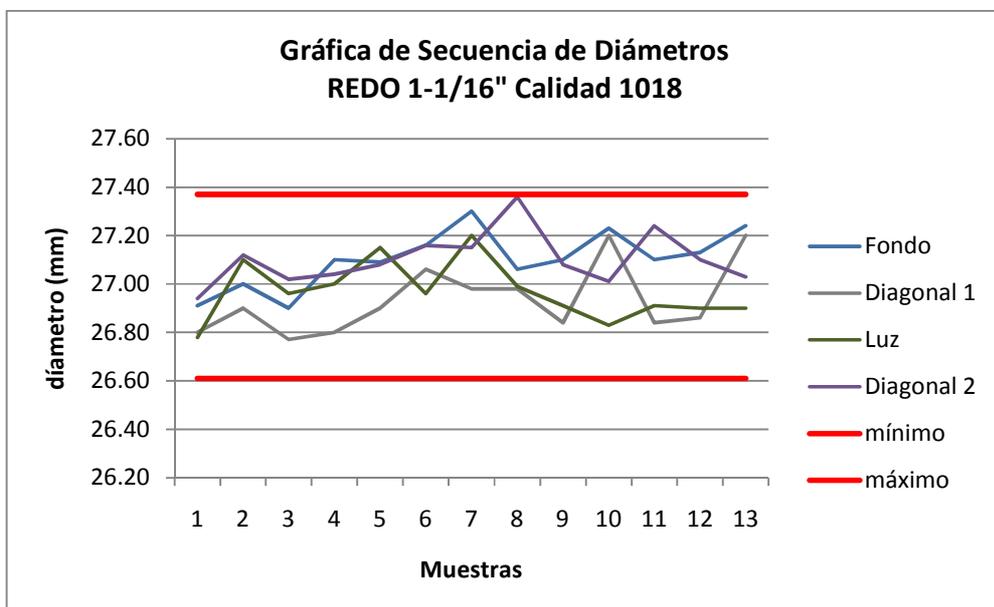


Figura 3.9. Secuencia de la inspección de medidas de las barras redondas lisas \varnothing 1-1/16" calidad 1018

b) Calidad 1045

Tabla 30. Resultados de la inspección de medidas para la calidad 1045

Nº DE PAQUETE	INSPECCIÓN							DISPOSICIÓN
	DIMENSIONES (mm)					PESO MÉTRICO (kg/m)	INSPECCIÓN VISUAL	
	FONDO DE CANAL	DIAGONAL 1	LUZ ENTRE CILINDROS	DIAGONAL 2	OVALIZACIÓN			
1	27.31	26.98	27.11	27.15	0.33	4.536	RU-MBR	CONFORME
	27.25	27.09	26.89	27.23	0.36	-	RU-MBR	CONFORME
24	27.26	27.02	27.11	27.19	0.24	4.540		CONFORME
	27.19	26.89	27.04	27.26	0.37	-		CONFORME
46	27.27	27.11	27.13	27.19	0.16	4.513		CONFORME
	27.22	27.04	27.11	27.25	0.21	-		CONFORME
73	27.16	26.95	27.08	27.16	0.21	4.487		CONFORME
80	27.24	27.08	27.04	27.23	0.20	4.489		CONFORME
	27.21	27.11	27.06	27.25	0.19	-		CONFORME
105	27.25	27.06	27.13	27.19	0.19	4.509		CONFORME

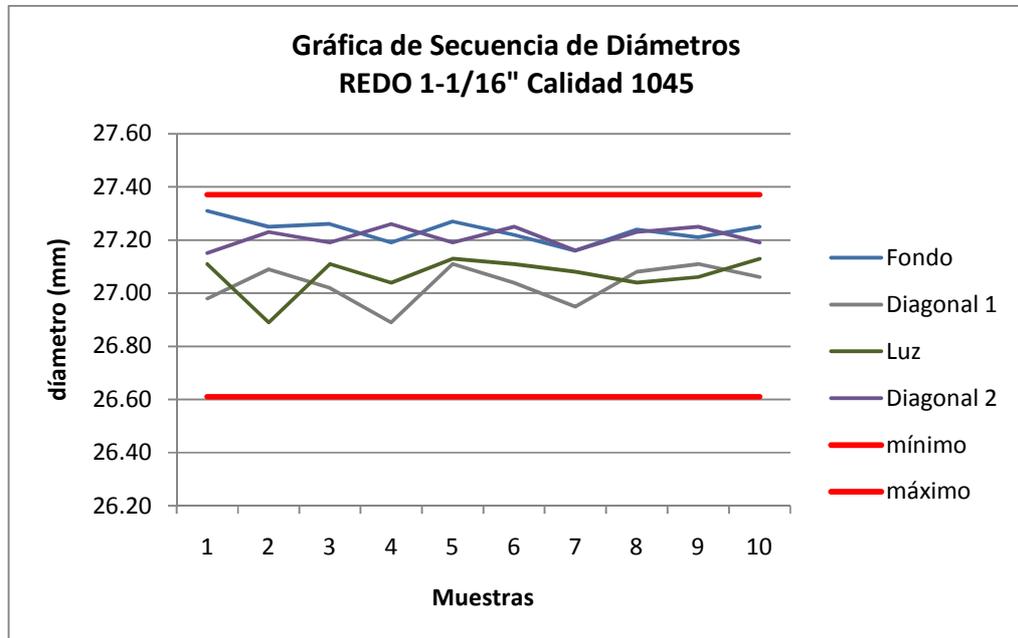


Figura 3.10. Secuencia de la inspección de medidas de las barras redondas lisas Ø 1-1/16" calidad 1045

CONCLUSIONES

1. Al inicio de la prueba se evidenció descontrol en la fluidez de material en las 8 primeras pasadas, ya que al laminar por primera vez los valores teóricos se sinceran con los parámetros reales, además en estas pasadas no existe formadores de bucle, ya que es tren de desbaste, que pueda estabilizar el flujo. El instrumentista del tren reguló las velocidades, variando las RPM de los motores para obtener una laminación uniforme.
2. Una de las causas que origina el descontrol en las primeras barras, es el recalentamiento de las palanquillas durante la parada para el cambio de medida (antes de iniciar la producción). Para ello se debe corregir la temperatura calentamiento de palanquillas durante las paradas. El recalentamiento de las palanquillas origina mayor reducción de las pasadas respecto a lo establecido, y en consecuencia la una mayor elongación que varia la velocidad de laminación.
3. Las ecuaciones utilizadas para el diseño de pasadas fueron satisfactorias ya que luego de conseguir el control de las velocidades y regular las luces se consiguieron las medidas del producto. Considerando que luego de las primeras 4 barras fuera de medidas, podemos estimar que la eficiencia de los cálculos ha sido de 96.2% respecto al total de la producción. Lo bueno de estas ecuaciones, tanto de dimensiones, fuerzas, velocidades como temperatura, es que todas dependen unas de otras en los cálculos el cual hace que todas las variables del proceso intervengan en los resultados de la producción.

4. Una vez obtenido las dimensiones, se presentaron inconvenientes en temas de ralladura y de cruzado en el producto, los cuales son problemas netamente operativos. Para ello se realizaron las regulaciones en campo, limpiando el camino de paso de la barra, también se colocó refrigeración a los casquillos de las guías para eliminar el metalizado para eliminar todo punto de ralladura. Se corrigió el juego axial del cilindro acabador para centrar los canales así como el ajuste de la guía de entrada de la caja acabadora para eliminar el cruzado y ovalizado.
5. Se evidenció marcas de bajo relieve esporádicamente en el producto resultado de un mal de direccionamiento del descascarillador, siendo corregido y reforzado con sopladores de aire adicionales en las primeras pasadas para eliminar los residuos de cascarilla impregnada. También hubo marcas de bajo relieve continuo producto del laminado de un ligero reventado en la pasada 12 no llegando a formar pliegue, sino una marca continua. Esta se corrige cerrando las luces de las pasadas antes del redondo de la caja 12 y abrir 0.5mm en dicha caja.
6. El análisis de la metalografía confirma que la reducción de la palanquilla ha sido correcta para obtener el tamaño de grano fino que pide la norma ($G > 6$, 48micras), donde se aprecia en el punto 2.2 del capítulo 3. En el caso del proceso de laminación se estima que la reducción total mínima para conseguir el afino del grano es de 80%. Este proceso tuvo una reducción total de 96.5%.

RECOMENDACIONES

1. Para la etapa de cálculos del calibrado, en cuanto al ensanchamiento se recomienda utilizar la opción “solver” del programa EXCEL debido a la complejidad de la fórmula de Ekelund (ver ecuación 2.2). Una vez que se obtiene los parámetros reales se recomienda realizar los ajustes de las fórmulas con factores de corrección en los cálculos del calibrado, ángulo de contacto, velocidad y cargas de motores.
2. Cuando existan paradas en la producción, la temperatura del horno debe disminuir hasta un valor de 1100°C en la zona de igualación del horno, esta temperatura debe ser controlada dependiendo del tiempo de parada para que posteriormente pueda recuperarse para la producción. La falta de este procedimiento genera descarburación de la palanquilla, mayor formación de cascarilla y para esta producción mayor posibilidad que se genere ralladuras en el producto (*ver Figura 3.6*).
3. Eliminar todo tipo de puntos de ralladura a la salida de la caja acabadora tales como puentes, embudos camino de rodillos, mediante refrigeración de las guías, esmerilado de los puentes y embudos y control del llenado de las pasadas. Así evitaremos este defecto en la calidad superficial del producto terminado, sobre todo en la calidad 1018 ya que es sensible a las marcas superficiales con temperaturas de trabajo superiores a 800°C.

4. En la entrada de la caja acabadora debe usarse guiado con mayor estabilidad para evitar las diferencias de medidas en el diámetro (ovalización). Para ello se recomienda usar guías de cuatro rodillos que resistan las variaciones del flujo del material.

5. Cuando se inicie las pruebas de laminación con los datos teóricos, se deberá iniciar con velocidades por debajo del teórico hasta un 20% menos, para que el operador tenga oportunidad de controlar y modificar las velocidades calculadas y obtener valores reales con flujo de material estable.

6. Una vez que se tiene estable el proceso se deberá hacer las regulaciones de las luces de las pasadas tomando en cuenta las medidas del producto final, de las cargas de los motores y de las muestras obtenidas en cada caja para verificar si existe reventón o vacío de las formas.

BIBLIOGRAFÍA**1. CALIBRACIÓN - PRODUCTOS LARGOS DE ACERO LAMINADOS EN CALIENTE**

Roberto de Cerqueira Coda – Laboratorio de Transformación Mecánica Fundación Luiz

Englert.

Porto alegre, Brasil – 2011

2. DEFECTOS EN PRODUCTOS LARGOS

Roberto de Cerqueira Coda – COPAR Engenharia e Tecnologia Industrial Ltda.

Porto alegre, Brasil – 2005

3. ACCIONAMIENTO TREN CONTINUO

Roberto de Cerqueira Coda – COPAR Engenharia e Tecnologia Industrial Ltda.

Porto alegre, Brasil – 2005

4. PROCESO DE LAMINACIÓN

Roberto de Cerqueira Coda – COPAR Engenharia e Tecnologia Industrial Ltda.

Porto alegre, Brasil – 2005

5. DEFORMACIÓN EN LA LAMINACIÓN EN CALIENTE DE PRODUCTOS LARGOS

Roberto de Cerqueira Coda – Instituto Argentino de Siderurgia

Argentina – 2004

6. EL ACERO, LO QUE HAY QUE SABER

Corporación Aceros Arequipa S.A. – Grupo S.R.L.

Lima, Perú - 2000

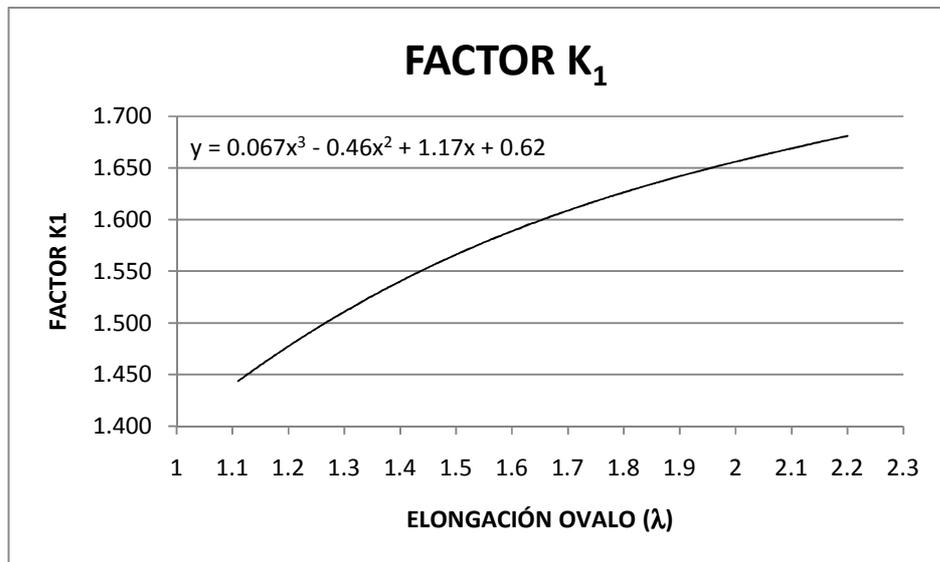
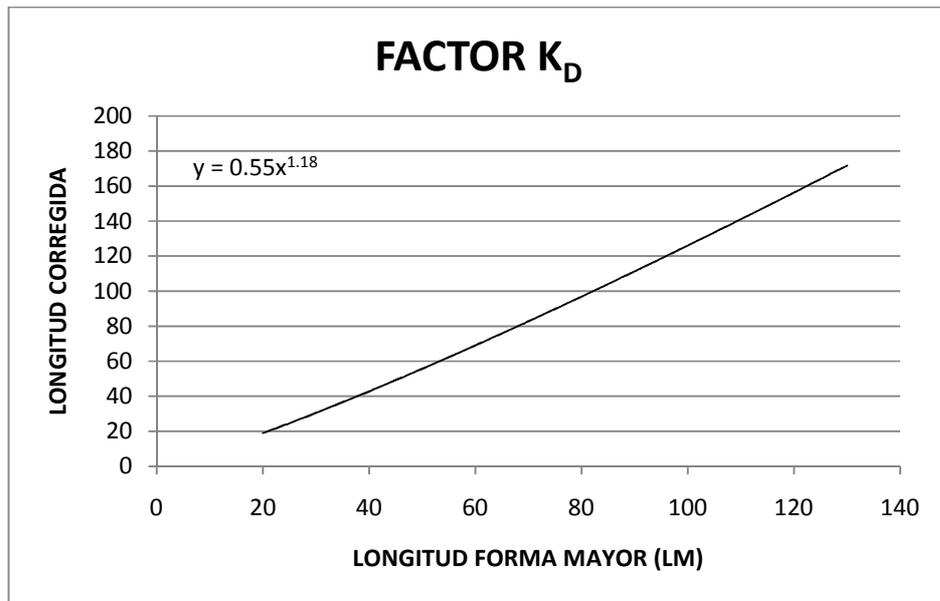
7. ATLAS DE TRABAJABILIDAD EN CALIENTE DE ACEROS

Instituto Argentino de Siderurgia – Comisión Nacional de Energía Atómica

Argentina – 1994

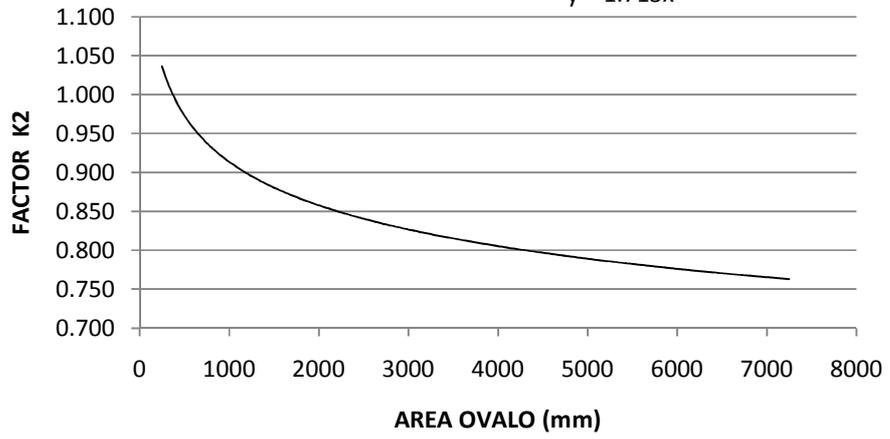
ANEXOS

ANEXO 1. DIAGRAMAS DE LENDL – PARA CÁLCULO DE MEDIDA DE ÓVALOS

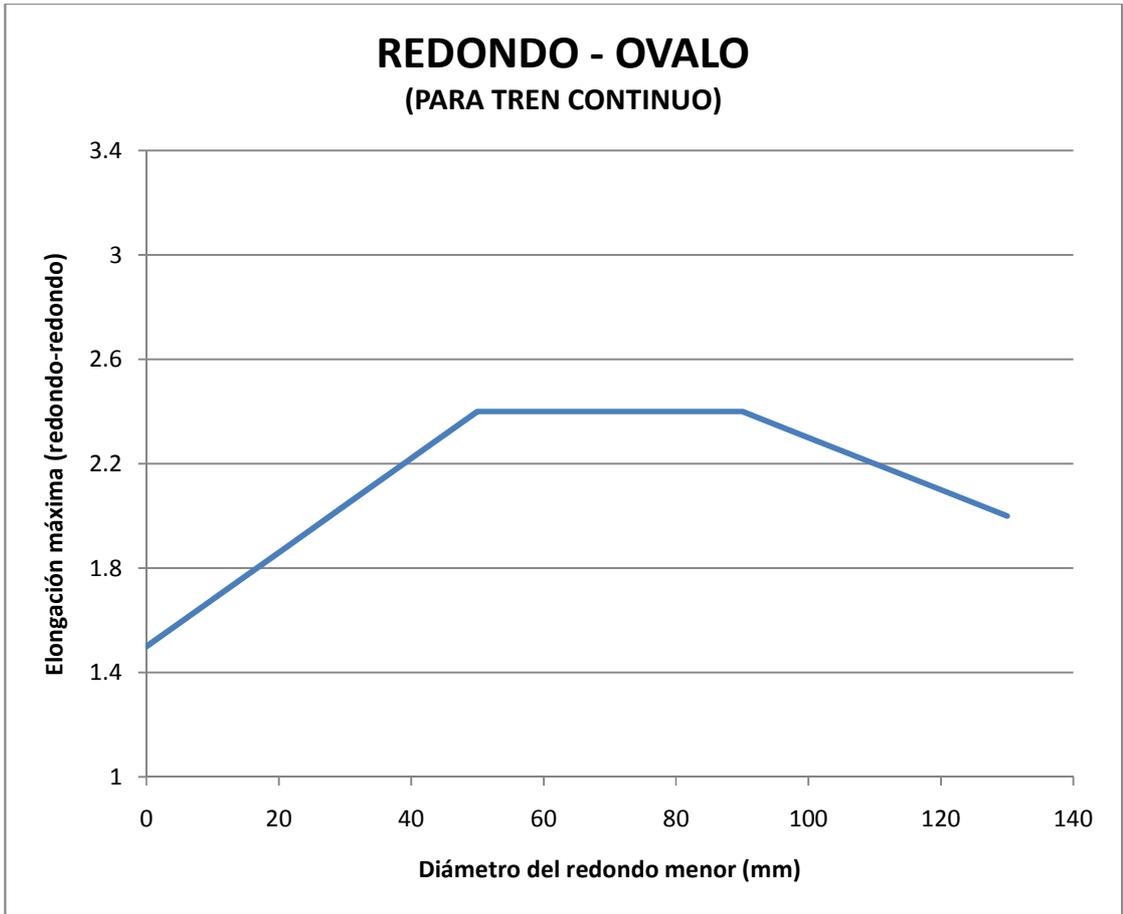


FACTOR K₂

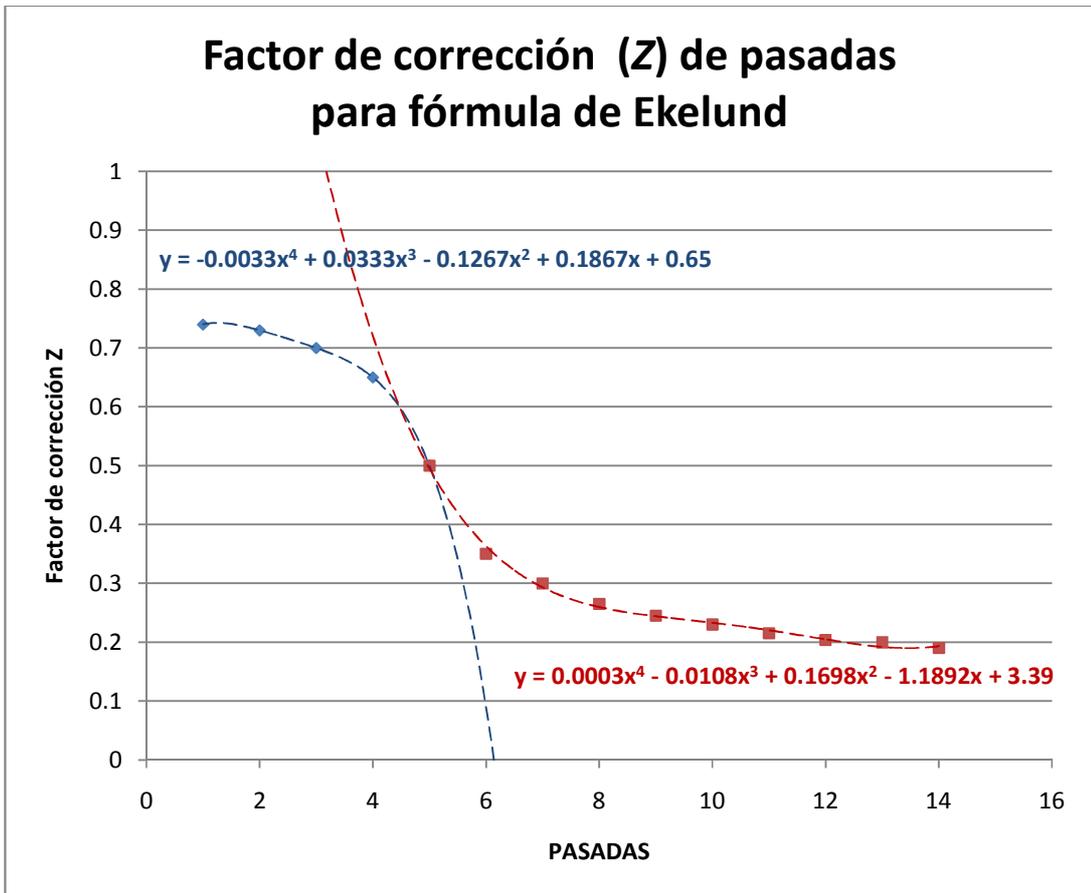
$$y = 1.713x^{-0.091}$$



ANEXO 2. CURVA DE CORRECCIÓN DE ELONGACIONES DE LENDL

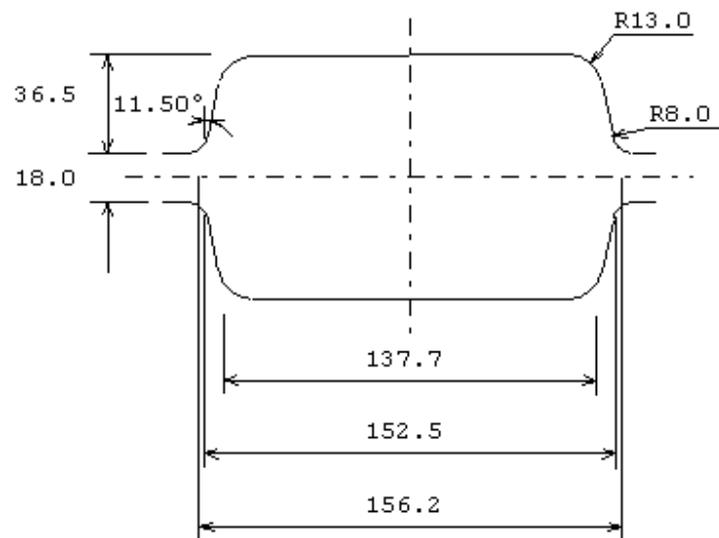


ANEXO 3. FACTOR DE CORRECCIÓN DE PASADAS PARA FÓRMULA DE EKELUND.

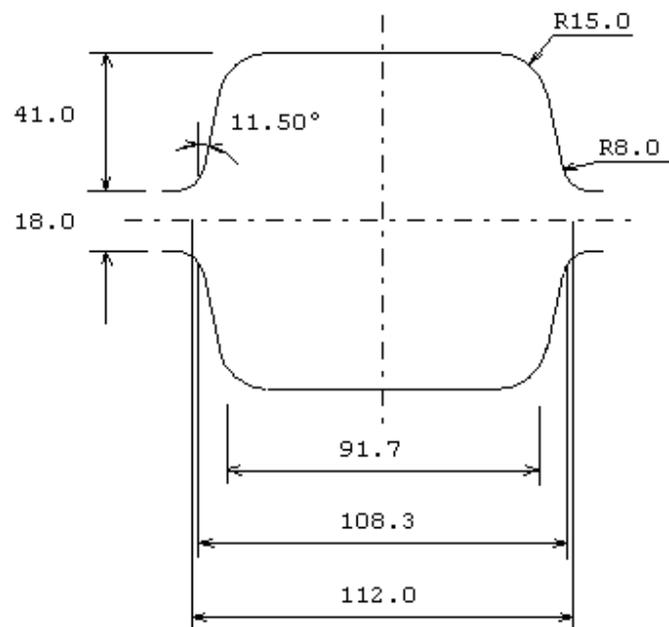


ANEXO 4. DIMENSIONES DE CANALES

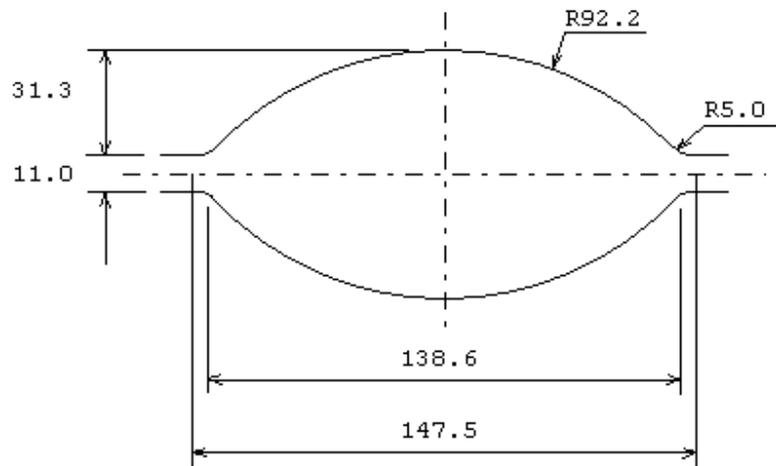
CAJA 1



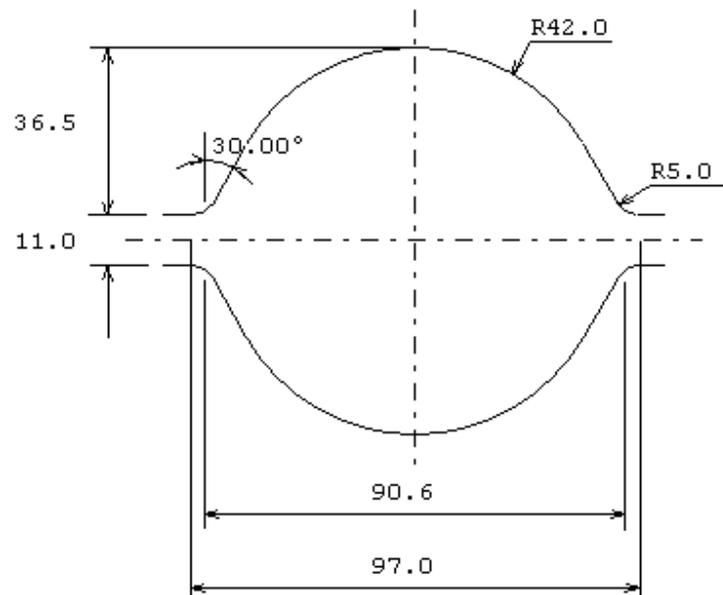
CAJA 2



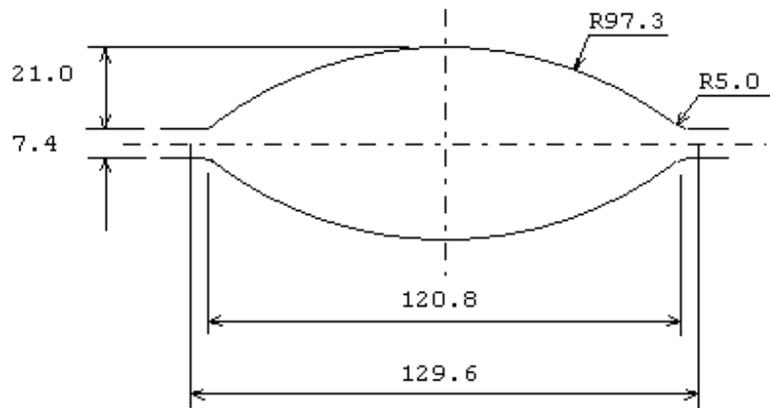
CAJA 3



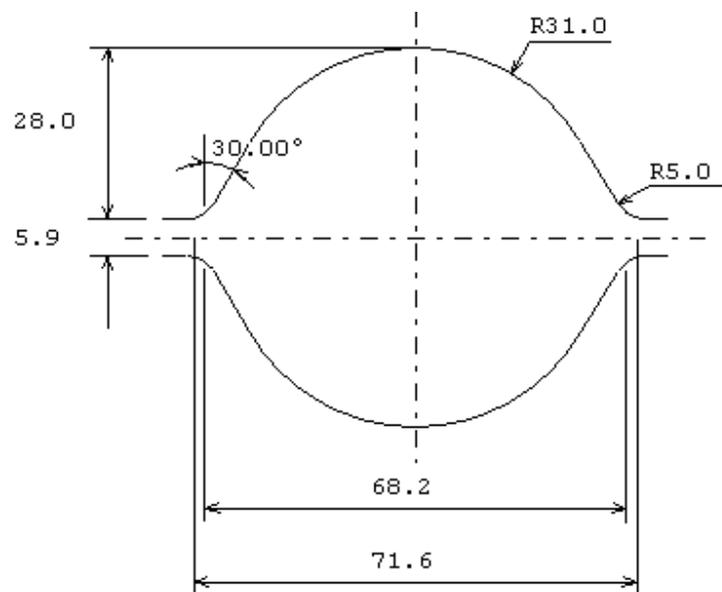
CAJA 4



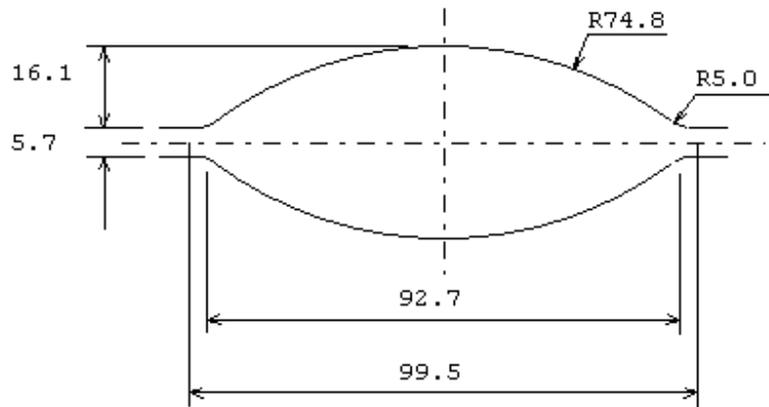
CAJA 5



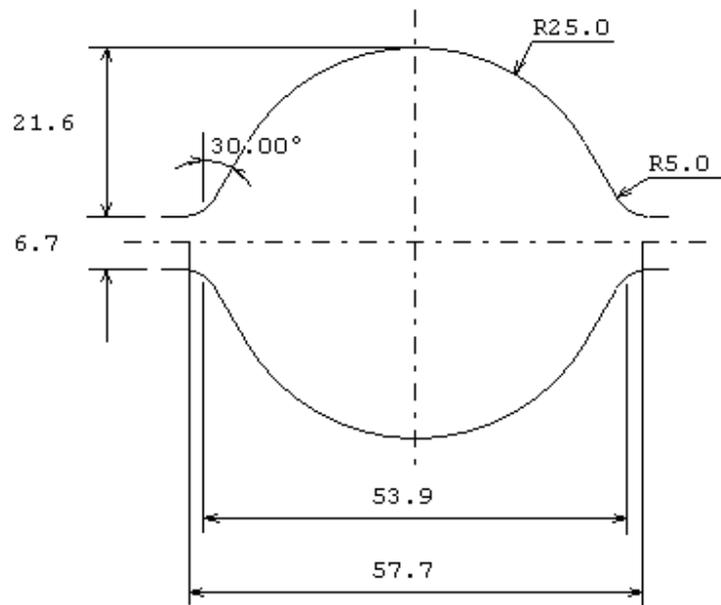
CAJA 6



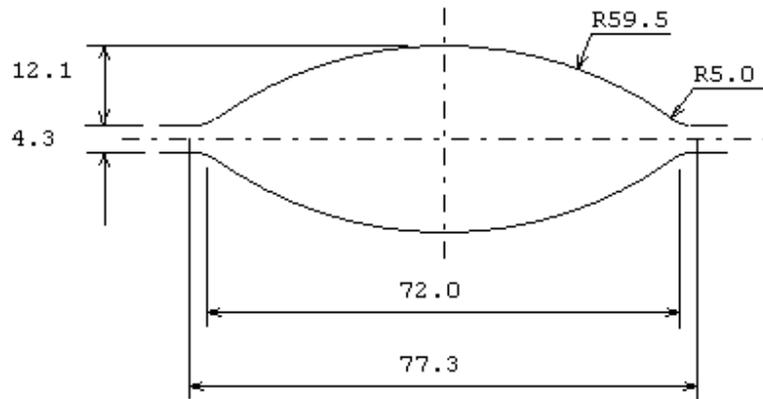
CAJA 7



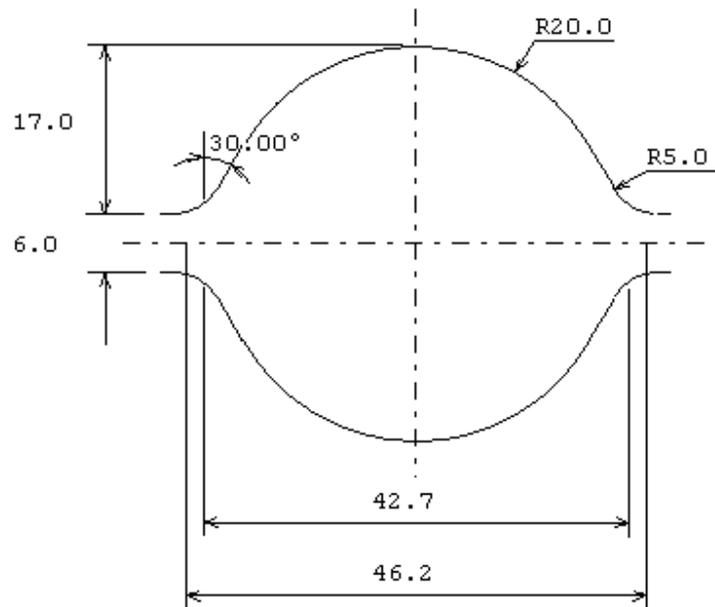
CAJA 8



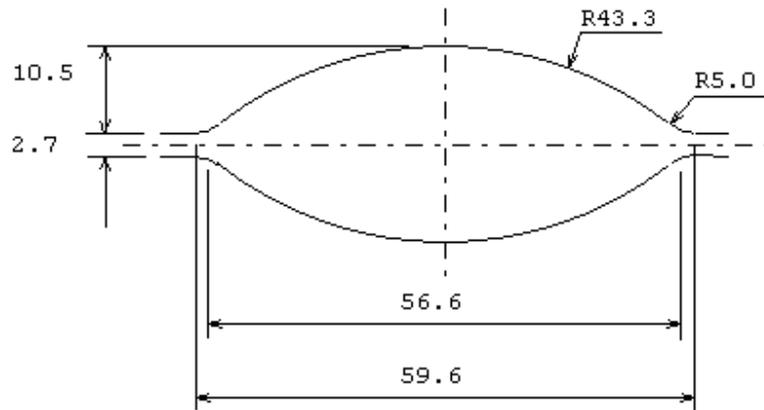
CAJA 9



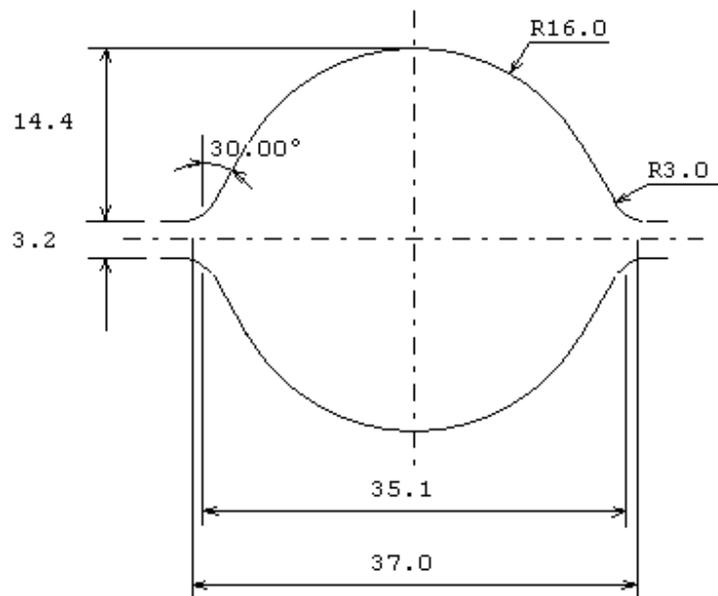
CAJA 10



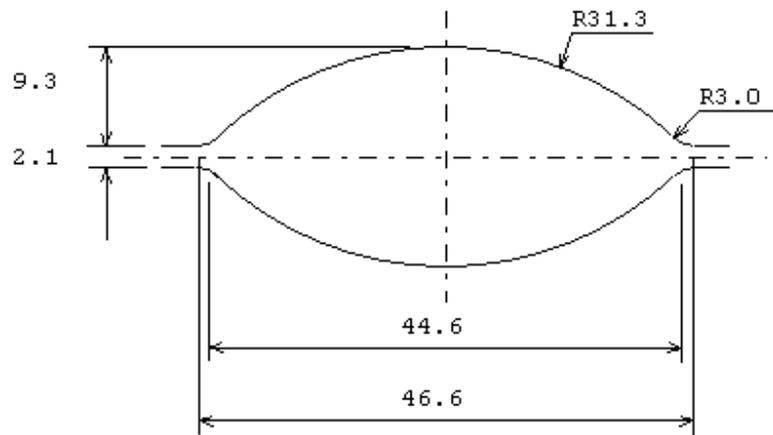
CAJA 11



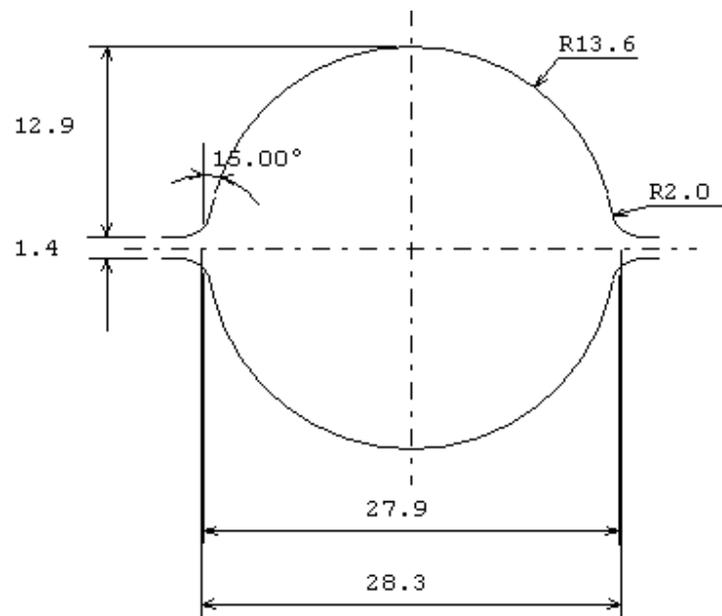
CAJA 12



CAJA 13



CAJA 14



ANEXO 5. EJEMPLO DE DESARROLLO DE FORMULA DE EKELUND

Para ensanchamiento - fórmula de Ekelund (ver página 46):

$$b_1^2 - b_0^2 - 8 \times m \times Z \times ld \times \Delta h + 4 \times m \times Z \times (h_0 + h_1) \times ld \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) = 0 \quad (2.2)$$

Donde: m es factor de forma

$$m = \frac{1.6 \times \mu \times ld - 1.2 \times \Delta h}{h_1 + h_0} \quad (2.3)$$

PASADA 1 - Datos:

Sección de palanquilla: 130mm x130mm

Temperatura inicial: 1150°C

Diámetro del cilindro: 650mm

Pasada	h_0	b_0	h_1	Luz S	T	ld	Diam. trabajo	Z
1	130mm	130mm	85mm	11.3mm	1116°C	114.1mm	578.9mm	0.74
N° Ecuac.					(2.19)	(2.12)	(2.7)	Anexo 3

Coeficiente de fricción: $\mu = 0.9 \times (1.05 - 0.0005 \times 1150) = 0.428$

Factor de corrección (m): $m = \frac{1.6 \times 0.428 \times 114.1 - 1.2 \times (130 - 85)}{(130 + 85)} = 0.1119$

Entonces reemplazando en la ecuación (2.2) y mediante la opción solver de Excel, se tiene el

ancho de la pasada 1 (b_1):

$$b_1 = 142.5 \text{ mm}$$

Este ancho calculado se convierte en la altura de entrada para la siguiente pasada ya que los cilindros en la pasada 2 realizará la compresión por la parte ensanchada. De igual forma, la altura de h_1 se convierte en el ancho de entrada para la pasada 2.

PASADA 2 - Datos:

Temperatura de entrada: 1116°C

Diámetro del cilindro: 650mm

Pasada	h_0	b_0	h_1	Luz S	T	ld	Diam. trabajo	Z
2	142.5mm	85mm	101mm	18mm	1095°C	108.7mm	570mm	0.73
N° Ecuac.					(2.19)	(2.12)	(2.7)	Anexo 3

Coefficiente de fricción: $\mu = 0.9 \times (1.05 - 0.0005 \times 1116) = 0.443$

Factor de corrección (m): $m = \frac{1.6 \times 0.443 \times 108.7 - 1.2 \times (142.5 - 101)}{(142.5 + 101)} = 0.1118$

Entonces reemplazando en la ecuación (2.2) y mediante la opción solver de Excel, se tiene el ancho de la pasada 2 (b_1):

$$b_1 = 100.8 \text{ mm}$$

Con estos pasos, se realiza los mismos cálculos para todas las pasadas hasta la posición 14, el cual los resultados se aprecian en la **tabla 10**.

ANEXO 6. EJEMPLO DE CALCULOS DE FUERZAS, VELOCIDADES Y POTENCIAS

Considerando los datos iniciales:

Composición del acero - calidad 1045: % C = 0.45, %Mn = 0.8, %Cr = 0.1

Capacidad del horno: 70 T/h

Densidad del acero: 0.00785 gr/mm³

Temperatura de Inicio: 1,150°C

Torque en vacio de las cajas: 100 N.m.

PASADA 1

Fuerzas:

Propiedad	Ecuación	Cálculo	Resultado	unidad
Tenacidad	(2.8)	$0.01 \times (14 - 0.01 \times 1,150)$	0.025	kgf.s/mm ²
Resistencia a la deformación	(2.8)	$100 \times 0.025 \times (1.4 + 0.45 + 0.8 + 0.3 \times 0.1)$	6.7	Kgf/mm ²
Fuerza de Laminación	(2.9), (2.10)	$(6.7 + 0.027) \times (136.1 \times 130) \times 0.9721 \times (9.8)$	996,073	N
Torque de Laminación	(2.11)	$\frac{2 \times 996,073 \times 0.455 \times 114.1}{1000}$	103,444.4	N.m
Torque de Fricción	(2.13)	$\frac{0.428 \times 578.9 \times 103.444}{1000}$	246.5	N.m
Torque total	(2.13)	$(103444.4 + 246.5 + 100.0)$	103,790.9	N.m

Velocidad:

Siendo la capacidad del horno 70 t/h, el flujo de material es:

$$70 \times \frac{1000}{3600} \times \frac{1}{0.00785} = 2,477 \text{ mm}^2 \cdot \text{m/s}$$

Área de la pasada 1 (calculado con el ensanchamiento y forma de canal): **11,746mm²**

Propiedad	Ecuación	Cálculo	Resultado	unidad
velocidad	(2.6)	$\frac{2,477}{11,746}$	0.210	m/s
RPM cilindro	(2.6)	$\frac{0.210 \times 60,000}{\pi \times 578.9} \times 1.01$	6.92	RPM
RPM motor	(2.37)	(6.92×60)	996,073	N

Siendo la relación de transmisión del motor de la caja 1: $i = 60$

Potencia:

Siendo la capacidad máxima del motor de la caja 500kW

Propiedad	Ecuación	Cálculo	Resultado	unidad
Potencia de Laminación	(2.14)	$\frac{103,444.4 \times 6.92}{9,550}$	75	KW
Potencia total	(2.15)	$\frac{103,790.9 \times 6.92}{9,550 \times 0.945}$	79.2	KW
Carga	(2.15)	$\frac{79.2}{500} \times 100\%$	16	%

Bajo esta misma secuencia de cálculos se desarrolló para las demás pasadas hasta posición 14, el cual los resultados se aprecian en la **tabla 10**. Para cada pasada a desarrollar se debe considerar los cálculos obtenidos de la pasada anterior tanto de calibrado como fuerzas, velocidades y potencia.

ANEXO 7. RESULTADOS DE CALCULOS SECUNDARIOS

SOLVER = 0	CAJA	FACTORES										Area Salida						Datos para cálculo de temperatura					
		de corrección ángulo contacto		de geometría para velocidad 1		de corrección altura		de sigare (ϵ_{sigare})		CUADRADO/ CALOY/USG mm ²	ÓVALO/CALÓN mm ²	DIAMANTE mm ²	OVALO mm ²	REDONDO mm ²	$J/kg \cdot ^\circ C$	cator específico kcal/kg $^\circ C$	A superficial mm ²	Q kCal	por conformado + $^\circ C$	por condizción - $^\circ C$	por radiación - $^\circ C$		
		PALANQUILLA																					
0.00	1	0.1119	0.9721	1.4288	0.027	0.74	0.419	11746	10414	6024	9278	9511	1730	0.448	7298200	8395.12	0.0365	24	10				
0.00	2	0.1119	0.9923	1.4252	0.032	0.73	0.404	9874	8754	5064	7799	7994	1692	0.438	9122387	7159.16	0.0261	12	9				
0.00	3	0.1867	1.0539	1.4168	0.051	0.70	0.312	8068	7154	4138	6373	6533	1668	0.431	9621979	4003.13	0.0225	7	50				
0.00	4	0.1353	1.0214	1.4080	0.083	0.65	0.379	5841	6066	3509	5404	5539	1604	0.414	12265532	1903.90	0.0162	3	2				
0.00	5	0.2073	0.9978	1.3858	0.220	0.50	0.429	4465	3959	2290	3527	3616	1598	0.412	14260057	3809.10	0.0267	3	5				
0.00	6	0.1639	0.9962	1.3747	0.215	0.35	0.436	3676	3259	1885	2903	2976	1588	0.410	19467673	2723.32	0.0156	2	4				
0.00	7	0.2865	1.1111	1.3507	0.311	0.30	0.290	2811	2492	1442	2220	2276	1583	0.409	19443013	1997.08	0.0101	1	3				
0.00	8	0.2474	1.0939	1.3366	0.318	0.27	0.296	2382	2112	1222	1881	1929	1579	0.408	23467851	2072.36	0.0071	0	3				
0.00	9	0.3576	1.1545	1.3002	0.545	0.25	0.267	1813	1608	930	1432	1468	1575	0.407	24148313	2777.81	0.0073	0	4				
0.00	10	0.2616	1.0972	1.2770	0.611	0.23	0.302	1515	1344	777	1197	1227	1571	0.405	29364455	2073.93	0.0048	0	3				
0.00	11	0.4374	1.1928	1.2166	1.074	0.22	0.264	1119	992	574	884	906	1567	0.404	30272870	4002.91	0.0053	0	5				
0.00	12	0.3488	1.1558	1.2032	0.914	0.20	0.262	1026	910	526	811	831	1561	0.403	38052115	1772.77	0.0034	0	2				
0.00	13	0.4542	1.2407	1.1462	1.246	0.20	0.204	832	788	427	657	674	1558	0.402	36783127	1344.78	0.0027	0	2				
0.00	14	0.3356	1.1640	1.1133	1.367	0.19	0.235	720	699	369	569	583	1556	0.402	42977429	1386.39	0.0016	0	2				

ANEXO 8. NORMAS TÉCNICAS

COMPOSICIÓN QUÍMICA: SAE J403 JUN00

CHEMICAL COMPOSITIONS OF SAE CARBON STEELS—SAE J403 JUN00

SAE Standard

Report of the Iron and Steel Division approved June 1911. Revised by the Iron and Steel Technical Committee December 1988, and completely revised February 1991. Revised by the SAE Iron and Steel Division 1—Carbon and Alloy Steels, May 1992, May 1994, August 1995, and June 2000. Rationale statement available.

1. Scope—In 1941, the SAE Iron and Steel Division, in collaboration with the American Iron and Steel Institute (AISI), made a major change in the method of expressing composition ranges for the SAE steels. The plan, as now applied, is based in general on narrower cast or heat analysis ranges plus certain product analysis allowances on individual samples, in place of the fixed ranges and limits without tolerances formerly provided for carbon and other elements in SAE steels.

For years the variety of chemical compositions of steel has been a matter of concern in the steel industry. It was recognized that production of fewer grades of steel could result in improved deliveries and provide a better opportunity to achieve advances in technology, manufacturing practices, and quality, and thus develop more fully the possibilities of application inherent in those grades.

Comprehensive and impartial studies were directed toward determining which of the many grades being specified were the ones in most common demand, and the feasibility of combining compositions having like requirements. From these studies, the most common grades of steel have been selected and kept in the current revision. The cast or heat chemical composition limits or ranges of these grades are given in Tables 1, 2, 3A, and 3B. These cast or heat limits or ranges are subject to standard variations for product analysis as given in SAE J409. Since AISI is no longer issuing steel grade designations, grades listed in this document are SAE grades.

It is recognized that chemical compositions other than those listed in the previously mentioned tables will at times be needed for specialized applications or processing. When such a steel is required, the elements comprising the desired chemical composition are specified in one of three ways: (a) by a minimum limit, (b) by a maximum limit, or (c) by minimum and maximum limits, termed a range.

Standard cast or heat analysis limits and ranges for the various elements of carbon steels are given in Table 4. In this table, range is the arithmetical difference between the minimum and maximum limits (that is, 0.19 to 0.25 is a 0.06 range). These cast or heat limits and ranges are also subject to standard variations for product analysis as given in SAE J409.

ISTC Division 1 has developed a procedure which allows for the maintenance of the grade lists in this document. This will involve conducting an industry-wide survey to solicit input. This survey will be conducted at a frequency deemed necessary by the technical committee.

Criteria have been established for the addition to or the deletion of grades from the grade lists. New grades will be considered based on the grade meeting a SAE grade designation and chemistry, having a minimum production or consumption of 225 tonnes/year (250 tons/year) and has the sponsorship of at least two individual users or producers. New steel compositions will be considered as Potential

Standard (PS) steels, based on the guidelines in SAE J1081, until such time as production of the new steel achieves a level of production or usage qualifying it for consideration as a standard steel.

Deletion of grades will be by consensus based on the grade survey. Deleted grades will be archived in SAE J1249.

When the cast or heat analysis is requested to be reported to demonstrate conformance to the chemical limits shown in Tables 1, 2, 3A, or 3B, in addition to the quantities of carbon, manganese, phosphorus, and sulfur, the following elements and their quantities shall also be reported: copper, chromium, nickel, molybdenum, and silicon. When the amount of any one of these last five elements is less than 0.02% that analysis may be reported as "<0.02%."

Based on a survey question in the 1998 Grade Survey, the grade lists have been revised such that chemistries of all product forms are now consolidated into single tables. The chemistry ranges listed will be the narrowest range for the various product forms with the exception of S content. It is acknowledged however that due to differences in the section size of the various product forms, chemical composition demands for the product forms should be different to allow for adequate flexibility of steel application. These differences are reflected in Tables 4 and 5.

2. References

2.1 Applicable Publications—The following publications form a part of this specification to the extent specified herein. Unless otherwise indicated, the latest issue of SAE publications shall apply.

2.1.1 SAE PUBLICATIONS—Available from SAE, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001.

SAE J409—Product Analysis—Permissible Variations from Specified Chemical Analysis of a Heat or Cast of Steel

SAE J411—Carbon and Alloy Steel

SAE J1081—Potential Standard Steels

SAE J1249—Former SAE Standard and Former SAE Ex-Steels

SAE J1268—Hardenability Bands for Carbon and Alloy H Steels

SAE J1868—Restricted Hardenability Bands for Selected Alloy Steels

2.1.2 ISS PUBLICATION—Available from ISS, 410 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15086.

ISS Carbon and Alloy Steel Bar and Semi-Finished Products Manual

3. Chemical Reporting Requirements

3.1 When the cast or heat analysis is requested to be reported to demonstrate conformance to the chemical limits shown in Tables 1, 2, 3A, and 3B, in addition to the quantities of carbon, manganese, phosphorus, and sulfur, the elements and their quantities, as shown in Table 6, shall also be reported.

TABLE 1—NONRESULFURIZED CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, TO HOT-ROLLED AND COLD-FINISHED BARS, TO WIRE RODS, PLATES, STRIP, SHEETS, WELDED TUBING, AND TO SEAMLESS TUBING CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS

UNS No.	SAE No.	Chemical Composition Limits, % ⁽¹⁾⁽²⁾ C	Chemical Composition Limits, % ⁽¹⁾ Mn	Chemical Composition Limits, % ⁽¹⁾ P, Max	Chemical Composition Limits, % ⁽¹⁾ S, Max
G10050	1005	0.06 Max	0.35 Max	0.030	0.050
G10060	1006	0.08 Max	0.25–0.40	0.030	0.050
G10080	1008	0.10 Max	0.30–0.50	0.030	0.050
G10090	1009	0.15 Max	0.60 Max	0.030	0.050
G10100	1010	0.08–0.13	0.30–0.60	0.030	0.050
G10120	1012	0.10–0.15	0.30–0.60	0.030	0.050
G10130	1013	0.11–0.16	0.30–0.60	0.030	0.050
G10150	1015	0.13–0.18	0.30–0.60	0.030	0.050
G10160	1016	0.13–0.18	0.60–0.90	0.030	0.050
G10170	1017	0.15–0.20	0.30–0.60	0.030	0.050
G10180	1018	0.15–0.20	0.60–0.90	0.030	0.050
G10190	1019	0.15–0.20	0.30–0.60	0.030	0.050
G10200	1020	0.18–0.23	0.30–0.60	0.030	0.050
G10210	1021	0.18–0.23	0.60–0.90	0.030	0.050
G10220	1022	0.18–0.23	0.70–1.00	0.030	0.050
G10230	1023	0.20–0.25	0.30–0.60	0.030	0.050
G10250	1025	0.22–0.28	0.30–0.60	0.030	0.050
G10260	1026	0.22–0.28	0.60–0.90	0.030	0.050
G10290	1029	0.25–0.31	0.60–0.90	0.030	0.050
G10300	1030	0.28–0.34	0.60–0.90	0.030	0.050
G10330	1033	0.30–0.36	0.60–0.90	0.030	0.050
G10350	1035	0.32–0.38	0.60–0.90	0.030	0.050
G10370	1037	0.32–0.38	0.60–0.90	0.030	0.050
G10380	1038	0.35–0.42	0.60–0.90	0.030	0.050
G10390	1039	0.39–0.44	0.70–1.00	0.030	0.050
G10400	1040	0.37–0.44	0.60–0.90	0.030	0.050
G10420	1042	0.40–0.47	0.60–0.90	0.030	0.050
G10430	1043	0.40–0.47	0.70–1.00	0.030	0.050
G10440	1044	0.43–0.50	0.30–0.60	0.030	0.050
G10450	1045	0.43–0.50	0.60–0.90	0.030	0.050
G10460	1046	0.43–0.50	0.70–1.00	0.030	0.050
G10490	1049	0.46–0.53	0.60–0.90	0.030	0.050
G10500	1050	0.48–0.55	0.60–0.90	0.030	0.050
G10530	1053	0.48–0.55	0.70–1.00	0.030	0.050
G10550	1055	0.50–0.60	0.60–0.90	0.030	0.050
G10600	1060	0.55–0.65	0.60–0.90	0.030	0.050
G10650	1065	0.60–0.70	0.60–0.90	0.030	0.050
G10700	1070	0.65–0.75	0.60–0.90	0.030	0.050
G10740	1074	0.70–0.80	0.50–0.70	0.030	0.050
G10750	1075	0.70–0.80	0.40–0.70	0.030	0.050
G10780	1078	0.72–0.85	0.30–0.60	0.030	0.050
G10800	1080	0.75–0.88	0.60–0.90	0.030	0.050
G10840	1084	0.80–0.93	0.60–0.90	0.030	0.050
G10850	1085	0.80–0.93	0.70–1.00	0.030	0.050
G10860	1086	0.80–0.93	0.30–0.50	0.030	0.050
G10900	1090	0.85–0.98	0.60–0.90	0.030	0.050
G10950	1095	0.90–1.03	0.30–0.50	0.030	0.050

1. Certain qualities and commodities are customarily produced to lower limits of phosphorus and sulfur. (See SAE J411, Table 1.)

2. NOTES

Lead—Standard carbon steels can be produced with a lead range of 0.15 to 0.35% to improve machinability. Such steels are identified by inserting the letter "L" between the second and third numerals of the grade number, for example, 10L45. The UNS designation is also modified by changing the last digit to "4" to indicate lead, for example, G10454.

BORON—Standard killed carbon steels, which are fine grain, may be produced with a boron addition to improve hardenability. Such steels are produced to a range of 0.0005 to 0.003% boron. These steels are identified by inserting the letter "B" between the second and third numerals of the grade number, for example, 10B46. The UNS designation is also modified by changing the last digit to "1" to indicate boron, for example, G10461.

COPPER—When copper is required, 0.20% minimum is generally specified.

SILICON—BARS AND SEMIFINISHED—When silicon ranges or limits are required, the following ranges are commonly used: 0.10% max; 0.10 to 0.20%; 0.15 to 0.35%; 0.20 to 0.40%; or 0.30 to 0.60%.

RODS—When silicon is required, the following ranges and limits are commonly used for nonresulfurized steels: 0.10% max; 0.07 to 0.15%; 0.10 to 0.20%; 0.15 to 0.35%; 0.20 to 0.40%; 0.30 to 0.60%.

ADDITIONAL ELEMENTS—See 3.1 for additional elements to be reports

TOLERANCIAS DIMENSIONALES: ASTM A29 / A 29M – 05



TABLE S1.1 Thickness and Width Tolerances for Hot-Wrought Square-Edge and Round-Edge Flat Bars Ordered to 0.3 mm Under Tolerance^A

NOTE—Tolerance under specified thickness 0.3 mm.

Specified Width, mm	Tolerances over Specified Thickness for Thickness Given, mm					Tolerance from Specified Width, mm	
	Over 6 to 12, incl	Over 12 to 25, incl	Over 25 to 50, incl	Over 50 to 75, incl	Over 75	Over	Under
To 25, incl	...	...	...	...	...	0.5	0.5
Over 25 to 50, incl	...	0.5	1.3	...	...	1.0	1.0
Over 50 to 100, incl	0.5	0.7	1.3	2.1	2.1	1.5	1.0
Over 100 to 150, incl	0.5	0.7	1.3	2.1	2.1	2.5	1.5
Over 150 to 200, incl	0.5	1.0	1.3	2.1	2.9	3.0	2.5

^A When a square is held against a face and an edge of a square-edge flat bar, the edge shall not deviate by more than 3° or 5% of the thickness.

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. PERMISSIBLE VARIATIONS IN DIMENSIONS, ETC.—INCH-POUND UNITS

A1.1 Listed below are permissible variations in dimensions expressed in inch-pound units of measurement.

TABLE A1.1 Permissible Variations in Cross Section for Hot-Wrought Round, Square, and Round-Cornered Square Bars of Steel

Specified Size, in.	Permissible Variation from Specified Size, in. ^A		Out-of-Round or Out-of-Square, in. ^B
	Over	Under	
To 3/16, incl	0.005	0.005	0.008
Over 3/16 to 7/16, incl	0.006	0.006	0.009
Over 7/16 to 5/8, incl	0.007	0.007	0.010
Over 5/8 to 7/8, incl	0.008	0.008	0.012
Over 7/8 to 1, incl	0.009	0.009	0.013
Over 1 to 1 1/8, incl	0.010	0.010	0.015
Over 1 1/8 to 1 1/4, incl	0.011	0.011	0.016
Over 1 1/4 to 1 3/8, incl	0.012	0.012	0.018
Over 1 3/8 to 1 1/2, incl	0.014	0.014	0.021
Over 1 1/2 to 2, incl	1/64	1/64	0.023
Over 2 to 2 1/2, incl	1/32	0	0.023
Over 2 1/2 to 3 1/2, incl	3/64	0	0.035
Over 3 1/2 to 4 1/2, incl	1/16	0	0.046
Over 4 1/2 to 5 1/2, incl	3/64	0	0.058
Over 5 1/2 to 6 1/2, incl	1/8	0	0.070
Over 6 1/2 to 8 1/4, incl	3/32	0	0.085
Over 8 1/4 to 9 1/2, incl	3/16	0	0.100
Over 9 1/2 to 10, incl	1/4	0	0.120

^A Steel bars are regularly cut to length by shearing or hot sawing, which can cause end distortion resulting in those portions of the bar being outside the applicable size tolerance. When this end condition is objectionable, a machine cut end should be considered.

^B Out-of-round is the difference between the maximum and minimum diameters of the bar, measured at the same cross section. Out-of-square is the difference in the two dimensions at the same cross section of a square bar between opposite faces.

 **A 29/A 29M – 05**

TABLE A1.6 Permissible Variations in Dimensions for Hot-Wrought Bar Size Tees of Carbon Steel

Specified Size of Tee, in. ^A	Permissible Variations in Size, in.						Stem out-of-Square ^C
	Width or Depth ^B		Thickness of Flange		Thickness of Stem		
	Over	Under	Over	Under	Over	Under	
To 1¼, incl	¾/64	¾/64	0.010	0.010	0.005	0.020	¼/32
Over 1¼ to 2, incl	¼/16	¼/16	0.012	0.012	0.010	0.020	¼/16
Over 2 to 3, excl	¾/32	¾/32	0.015	0.015	0.015	0.020	¾/32

^A The longer member of the unequal tee determines the size for tolerances.

^B Measurements for both width and depth are overall.

^C Stem out-of-square is the variation from its true position of the center line of the stem measured at the point.

TABLE A1.7 Permissible Variations in Dimensions for Half-Rounds, Ovals, Half-Ovals, and Other Special Bar Size Sections

Due to mill facilities, tolerances on half-rounds, ovals, half-ovals, and other special bar size sections vary among the manufacturers and such tolerances should be negotiated between the manufacturer and the purchaser.

TABLE A1.8 Permissible Variations in Length for Hot-Wrought Rounds, Squares, Hexagons, Flats, and Bar Size Sections of Steel

Specified Size of Rounds, Squares, and Hexagons, in.	Specified Size of Flats, in.		Permissible Variations Over Specified Length, in. ^A				
	Thickness	Width	Length				
			5 to 10 ft, excl	10 to 20 ft, excl	20 to 30 ft, excl	30 to 40 ft, excl	40 to 60 ft, excl
Mill Shearing							
To 1, incl	to 1, incl	to 3, incl	½	¾	1¼	1¾	2¼
Over 1 to 2, incl	over 1 to 1, incl	to 3, incl	¾	1	1½	2	2½
Over 2 to 5, incl	over 1 to 1, incl	over 3 to 6, incl	¾	1	1½	2	2½
Over 5 to 10, incl	over 1 to 1, incl	over 3 to 6, incl	1	1½	1¾	2¼	2¾
	...	...	2	2½	2¾	3	3¼
	0.230 to 1, incl	over 6 to 8, incl	¾	1¼	1¾	2½	3
	over 1 to 3, incl	over 6 to 8, incl	1¼	1¾	2	3	4
Bar Size Sections	...	...	¾	1	1½	2	2½
Hot Sawing							
2 to 3½, incl	1 and over	3 and over	^B	1½	1¾	2¼	2¾
Over 3½ to 5, incl	...	...	^B	2	2¼	2¾	3
Over 5 to 10, incl	...	...	^B	2½	2¾	3	3¼

^A No permissible variations under.

^B Smaller sizes and shorter lengths are not hot sawed.

TABLE A1.9 Permissible Variations in Length for Recutting of Bars Meeting Special Straightness Tolerances

Sizes of Rounds, Squares, Hexagons, Width of Flats and Maximum Dimension of Other Sections, in. ^A	Tolerances Over Specified Length, in. ^A	
	Length	
	To 12 ft, incl	Over 12 ft
To 3, incl	¼	¾/16
Over 3 to 6, incl	¾/16	7/16
Over 6 to 8, incl	7/16	¾/8
Rounds over 8 to 10, incl.	¾/8	1¼/8

^A No tolerance under.

TABLE A1.10 Permissible Variations in Straightness for Hot-Wrought Bars and Bar Size Sections of Steel^A

Standard tolerances	¼ in. in any 5 ft and (¼ in. × length in ft)/5
Special tolerances	⅛ in. in any 5 ft and (⅛ in. × length in ft)/5

^A Because of warpage, straightness tolerances do not apply to bars if any subsequent heating operation or controlled cooling has been performed.