



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudio de Postgrado
Maestría en Gestión Industrial

**ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE
REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VARILLA DE ACERO
CORRUGADO**

Ing. Jonatan Benjamín Solares Salazar

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto A. Aguilar Rivas

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE
REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VARILLA DE ACERO
CORRUGADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JONATAN BENJAMÍN SOLARES SALAZAR
ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO A. AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN GESTIÓN INDUSTRIAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdoba
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Miguel Agreda Girón
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VARILLA DE ACERO CORRUGADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudio de Postgrado, con fecha 30 de mayo de 2014.

Ing. Jonatan Benjamín Solares Salazar

ACTO QUE DEDICO A:

Al Padre Celestial

Por darme la vida y las oportunidades de crecer.

Mi esposa

Evelyn Azucena Chén Fuentes. Por darme el ánimo necesario para continuar.

Mi madre

Paula Salazar Vela de Solares. Por permanecer siempre junto a mí.

Mis hermanas y hermano

Astrid, Yesica y Dennis. Por apoyarme en todas las cosas.

AGRADECIMIENTOS A:

Al Padre Celestial

Por darme la vida y las oportunidades de crecer.

Mi esposa

Evelyn Azucena Chén Fuentes. Por darme el ánimo necesario para continuar.

Mi madre

Paula Salazar Vela de Solares. Por permanecer siempre junto a mí.

Mis hermanas y hermano

Astrid, Yesica y Dennis. Por apoyarme en todas las cosas.



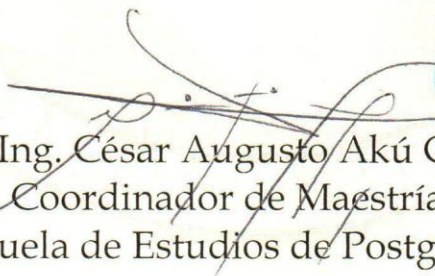
FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-050

Como Coordinador de la Maestría en Gestión Industrial y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VARILLA DE ACERO CORRUGADO "** presentado por el Ingeniero Mecánico **Jonatan Benjamin Solares Salazar**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Diciembre de 2015.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-050

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VARILLA DE ACERO CORRUGADO"** presentado por Ingeniero Mecánico **Jonatan Benjamín Solares Salazar**, correspondiente al programa de Maestría en Gestión Industrial; apruebo y autorizo el mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Diciembre de 2015.

Cc: archivo
/la



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2015-050

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Gestión Industrial titulado: **"ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS PARA EVALUAR LOS FACTORES QUE REGULAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAILLA DE ACERO CORRUGADO"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Jonatan Benjamín Solares Salazar**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO



Guatemala, Diciembre de 2015.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
ANTECEDENTES.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXIII
ALCANCES.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
RESUMEN.....	XXXI
INTRODUCCIÓN.....	XXXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Productividad.....	1
1.1.1. Eficiencia.....	2
1.1.2. Eficacia.....	3
1.2. Sistema de gestión de calidad.....	4
1.2.1. Mejora.....	6
1.2.1.1. Mejora continua.....	6
1.2.1.2. Acción correctiva.....	7
1.2.1.3. Acción preventiva.....	9
1.2.1.3.1. Análisis modal de fallas y efectos.....	10
1.2.2. Herramientas para el control de calidad.....	14
1.2.2.1. Estratificación.....	14
1.2.2.2. Diagrama de Pareto.....	15
1.3. Proceso de laminación.....	16
1.3.1. Materia prima.....	18
1.3.1.1. Características de los defectos.....	19

1.3.2.	Infraestructura (maquinaria y equipo).....	23
1.3.2.1.	Horno de recalentamiento.....	26
1.3.2.1.1.	Sistema de combustión.....	26
1.3.2.1.2.	Capacidad del horno.....	30
1.3.3.	Tren de laminación.....	33
1.3.3.1.	Castillos de laminación.....	34
1.3.3.2.	Rodillos de laminación.....	35
1.3.3.3.	Accesorios.....	37
1.3.4.	Cama de enfriamiento.....	39
1.3.4.1.	Corte en caliente.....	40
1.3.4.2.	Canaleta revolver.....	41
1.3.4.3.	Enfriamiento de la varilla.....	41
1.4.	Etapas del proceso de laminación.....	42
1.4.1.	Calentamiento.....	42
1.4.1.1.	Adición y distribución de calor.....	43
1.4.2.	Proceso de laminación.....	44
1.4.2.1.	Reducción de la palanquilla.....	46
1.4.2.2.	Figuras de laminación.....	46
1.4.3.	Varilla de acero corrugado.....	49
1.4.3.1.	Clasificación.....	49
1.4.3.2.	Características.....	50
1.4.4.	Enfriamiento, corte y empaque.....	51
1.4.4.1.	Distribución del proceso.....	51
1.5.	Métodos de control de los factores básicos del proceso de laminación.	52
1.5.1.	Método de control del horno de recalentamiento.....	52
1.5.1.1.	Control de la combustión.....	52
1.5.2.	Control del tren de laminación.....	53
1.5.2.1.	Secuencia de trabajo en el molino.....	54
1.5.3.	Defectos de la laminación.....	55
1.6.	Metodología de producción de varilla de acero corrugado.....	61
1.6.1.	Método de calibración del molino.....	61
1.6.1.1.	Principios de calibración.....	61

2. MARCO METODOLÓGICO.....	65
2.1. Hipótesis.....	65
2.2. Variables.....	65
2.3. Enfoque y tipo de investigación.....	67
2.4. Definición de población y muestra.....	68
2.5. Estadística.....	68
2.6. Técnica de recolección de datos.....	68
2.7. Validación.....	69
2.8. Fuentes de información.....	69
2.9. Tecnicas de analisis de información.....	70
3. RECURSOS NECESARIOS.....	71
4. RESULTADOS.....	81
4.1. Determinación de principales factores que regulan del proceso de producción de varillas de acero corrugado.....	81
4.1.1. Modos de fallo en las etapas del proceso de fabricación de acero corrugado en los trenes de laminación.....	81
4.1.2. Efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción.....	89
4.1.3. Relación existente de los modos de fallo, los paros de producción no programados, los factores y la eficiencia del proceso de producción.....	94
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	97
5.1. Determinación de principales factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado.....	97
5.1.1. Modos de fallo en las etapas del proceso de fabricación de acero corrugado en los trenes de laminación.....	98
5.1.2. Efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción.....	99

5.1.3. Relación existente entre los modos de fallos, los paros de producción no programados, los factores y la eficiencia del proceso de producción.....	101
CONCLUSIONES.....	103
RECOMENDACIONES.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXO.....	115
NOTAS DEL AUTOR.....	117
NORMA GUATEMALTECA COGUANOR NGO 36 011:2005.....	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema del proceso de laminación.....	17
2.	Grieta longitudinal de ángulo.....	20
3.	Grieta longitudinal facial.....	20
4.	Grieta transversal de ángulo.....	21
5.	Grieta transversal facial.....	21
6.	Rombosidad.....	22
7.	Hinchamiento.....	22
8.	Concavidad.....	23
9.	<i>Lay-out</i> de una planta de laminación.....	25
10.	Horno de empuje.....	26
11.	Partes de un quemador.....	28
12.	Ubicación de zonas de calentamiento.....	31
13.	Tiempo de calentamiento en hornos de empuje.....	33
14.	Castillo de laminación trío.....	34
15.	Castillo de laminación dúo.....	35
16.	Rodillos de laminación nuevos.....	36
17.	Rodillo de laminación calibrado.....	36
18.	Guías de entrada.....	37
19.	Guías de salida con torsión.....	38
20.	Sujeción a la barra de una guía de entrada.....	39
21.	Cama de enfriamiento.....	40
22.	Cizalla voladora.....	40
23.	Canaleta revolver.....	41

24.	Enfriamiento de varilla.....	42
25.	Salida del lingote del horno.....	44
26.	Secuencia de calibración para producción de varilla de acero corrugado en diferentes medidas.....	47
27.	Penúltimo pase para corrugado de 1/2”.....	48
28.	Acabador para corrugado de 1/2”.....	48
29.	Traslape.....	56
30.	Sobrellenado.....	57
31.	Superficie laminada con calibre o pase nuevo.....	58
32.	Superficie laminada con calibre o pase quemado.....	59
33.	Laminaciones.....	60
34.	Estratos.....	87
35.	Gráfico de Pareto.....	88

TABLAS

I.	Cuadro de clasificación según gravedad o severidad de fallo.....	11
II.	Cuadro de clasificación según la probabilidad de ocurrencia.....	11
III.	Cuadro de clasificación según la probabilidad de no detección.....	12
IV.	Diagrama de proceso AMFE.....	13
V.	Diagrama de proceso de laminación.....	24
VI.	Peso de una palanquilla.....	32
VII.	Formato de recopilación de paros de producción no programados.....	82
VIII.	Semanas analizadas y su tiempo de paros de producción no programados.....	83
IX.	Clasificación de estratos.....	85
X.	Cuadro de evaluación de análisis modal de fallos y efectos.....	90
XI.	Análisis modal de fallos y efectos, separación entre rodillos.....	91
XII.	Análisis modal de fallos y efectos, mantenimiento defectuoso.....	92

XIII.	Análisis modal de fallos y efectos, programación de parámetros.....	93
XIV.	Resultados de análisis modal de fallas y efectos, acciones implantadas.....	94
XV.	Resultados de análisis modal de fallas y efectos, factores.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

BTU	British Thermal Unit
cm	Centímetro
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
m	Metro
m³	Metro cubico
min	Minuto
rpm	Revoluciones por minuto

GLOSARIO

Alargamiento	Incremento longitudinal de la palanquilla al transformarla en productor terminado.
Atomización	Separar en pequeñas partículas un líquido.
Bunker	Combustible utilizado para la combustión en el horno también llamado <i>fuel oil</i> .
Calibre	Canal maquinado sobre la periferia de un rodillo de laminación, con el fin de dar la forma del canal al acero laminado.
Depresión	Ausencia de material que impide una pieza tenga todas las paredes de su perfil completamente llenos.
Ensanchamiento	Incremento del ancho del metal al ser deformado plásticamente por compresión.
Fisura	Discontinuidad formada en el metal durante la laminación.
Guía	Elemento mecánico de laminación que soporta y guía al acero a la entrada y salida de los rodillos de laminación.

Muñón	Parte cilíndrica de menor diámetro o dimensiones que el resto del cuerpo de la pieza, que se ubica en el extremo de la misma, y sobre el cual guía.
Parámetros programables	Parámetros que controla el PLC de un motor eléctrico.
Palanquilla	Pieza fundida en un molde metálico. Normalmente es de sección cuadrada. Se obtiene del proceso de fundición de chatarras de acero utilizando un horno de arco eléctrico.
Pliegue	Doblez que sufren los bordes del metal a ser laminado, en algún punto del tren, que aparentemente desaparece en las posteriores deformaciones que sufre el material.
Porosidad	Defecto de la palanquilla debido a la retención de gases u oxígeno durante la solidificación del metal.
Rechupe	Espacio u oquedad debida al fenómeno de la contracción durante la solidificación.
Recristalización	Formación de una estructura nueva, de grano libre de deformaciones, a partir de la cual se produce la nueva estructura del metal deformado plásticamente.

Rodillo de laminación	Fundición nodular con forma cilíndrica, en la cual se maquinan canales de diferentes tamaños y formas para laminar el acero.
Sobrellenado	Exceso de material en la varilla corrugada que normalmente se convierte en un bigote con dimensiones fuera de norma.
Sopladuras	Defectos de la palanquilla que se dan al solidificar el metal dentro del molde.
Tren	Conjunto de castillos laminadores, los cuales esta compuestos por dos o más rodillos.
Varilla corrugada	Barra de acero que tiene forma cilíndrica con corrugas en la superficie, obtenida por medio de la transformación del lingote en un tren de laminación.

ANTECEDENTES

Entre las investigaciones consultadas sobre el proceso de laminación para la fabricación de varilla de acero corrugado y el análisis de procesos, se presentan las que ayudan al desarrollo y comprensión del tema. En conjunto aportan los conocimientos clave para alcanzar un alto grado de entendimiento de cómo lograr los objetivos planteados.

Aguilar (1999), en su estudio “Características técnicas del acero para la construcción en el nuevo milenio” hace un análisis crítico de las características técnicas del acero de refuerzo para hormigón empleado en la región y de algunas normas internacionales que soportan la producción de los aceros asísmicos para la prevención de las fallas catastróficas. En las normas se establecen tanto las propiedades físicas que deben llenar los aceros, como las características químicas que coadyuvan al logro de tales propiedades. Uno de los aspectos más importantes que contribuye al logro de las características físicas señaladas, la constituye el proceso de laminación a que se somete el acero, para conseguir un producto final de óptimas condiciones.

Limón, A. (2004), brinda en su investigación de “Laminación de productos no-planos” una descripción muy amplia de los defectos producidos en la varilla de acero corrugado y las causas de ello, lo cual muestra la magnitud de porque al analizar los resultados del producto del proceso se obtiene un diagnóstico de las oportunidades de mejora del mismo. Las características del proceso son parte importante para mejorar la eficiencia de mismo. Debido a ello no es posible hablar del proceso de laminación sin hacer un profundo estudio del proceso en

sí, de sus etapas, maquinaria, características, principios que lo gobiernan, entre otros. La laminación debe ser conocida en detalle para determinar sus áreas de mejora.

Arenas, A. (2010), establece enfáticamente en su tesis “Diseño de sistema de control supervisorio en horno de calentamiento de lingotes de acero” que previo a introducir un sistema de automatización es de vital importancia conocer el proceso y hacer que el proceso de producción sea controlable con parámetros claros y puntuales y luego se puede introducir un sistema de automatización. Es aplicable a todo el proceso de laminación, aunque el autor se enfoca en la etapa de calentamiento del acero en el horno de laminación. En esta etapa del proceso no se puede implementar ninguna mejora tecnológica si no se conocen los principios que rigen una buena combustión y estos principios son el conocimiento base de los operadores de esta etapa.

El estudio previamente citado, resulta muy significativo al buscar medios para mejorar la eficiencia del proceso. Antes de orientarse al implementar tecnologías de punta es muy importante verificar que los procedimientos y controles establecidos sean comprendidos y ejecutados correctamente.

Por otra parte, el análisis del proceso debe enfocarse en aspectos significativos del mismo. Fernandez, J. (2013), en su investigación “Los sistemas de gestión de calidad” define que en una correcta ejecución de los sistemas de gestión de calidad, se deben realizar las siguientes actividades: determinar, analizar e implementar los procesos, procedimientos y actividades requeridas para la obtención del servicio o producto, y que a su vez estén en armonía con los objetivos planteados. Las actividades de control y seguimiento para la operación eficaz de los procesos deben de ser definidas.

El estudio afirma que los sistemas de gestión de calidad incluyen procedimientos y controles que facilitan la mejora del proceso y por lo tanto inciden en la eficiencia, incrementándola cuando se ejecutan correctamente y disminuyéndola al no hacerlo.

De las investigaciones que la hacen muy particular es “Calidad total y productividad” de Gutiérrez, H. (2010), en ella indica que las acciones preventivas se originan para prevenir fallas potenciales, atendiendo a sus causas. La categoría de una falla potencial se puede alcanzar debido a la experiencia y conocimiento de la gente, ya sea con el mismo proceso o producto, o con otros similares. Por lo tanto, es de mucha utilidad emplear las acciones preventivas en las fases de diseño del producto y del proceso, ya que si ahí se prevé una falla potencial se podrán tomar medidas para prevenirla. La metodología conocida como análisis modal de fallas y efectos es una buena herramienta para generar la base de acciones preventivas.

La investigación antes mencionada reúne las particularidades del proceso y un método para analizarlas y encontrar los resultados que indiquen como determinar los factores principales que reducen la eficiencia del proceso de producción.

El presente trabajo de graduación toma los estudios previos y define la manera de analizar el proceso de laminación para determinar los principales factores que inciden en la eficiencia del proceso. Se desarrolla un contenido general del proceso y se analiza paso a paso los resultados del mismo, buscando de así factores que afecten la eficiencia del proceso de fabricación de varilla de acero corrugado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La fabricación de varilla de acero corrugado ha adquirido una demanda mayor en los últimos años, ha obligado a los fabricantes a buscar optimizar los procesos de producción y como resultado se busca reducir los tiempos de paro de los procesos, encontrar las causas de los paros y erradicarlas.

Se delimita al área, trenes de laminación, al producir varilla de acero corrugado con la cual se satisface las demandas del mercado guatemalteco; la norma que rige el producto final es la COGUANOR NGO 36 011, la cual está basada en la norma ASTM 615. Debido al uso tan amplio de la varilla de acero corrugado en la construcción de todo tipo de estructuras a base de concreto reforzado los beneficios del estudio no se limitan a una área geográfica específica sino a aquella donde se utiliza el concreto reforzado y por el tiempo que el tipo de construcción continúe predominando el área de la industria guatemalteca. La planta de producción implicada en el análisis se ubica en la ciudad de Guatemala; el período en el cual se desarrolló la recopilación de datos fue en los meses de febrero a agosto del año 2012. El proceso conserva los mismos principios de operación a lo largo del tiempo por lo que el ojo crítico se debe orientar al objetivo del estudio. Debido a que es un proceso utilizado en muchas partes del mundo, los resultados obtenidos se aplican a cualquier otra planta con el mismo proceso de producción ya que es la manera en que se han propagado las mejoras en la rama de la industria.

El trabajo se enfoca en identificar causas específicas, mediante las cuales el proceso se ve afectado, es decir, factores que inciden en la eficiencia del

proceso de laminación. Para lograr la identificación es necesario conocer el proceso en detalle, por lo que se estudian las etapas del proceso que se relacionan directamente con los trenes de laminación. Se establece que la unidad básica de partida para determinar los factores serán los paros de producción, proporcionan información vital del proceso, tal como: tiempo, descripción de la situación, condiciones del proceso en el momento del paro, entre otros. Ello permite someter a análisis la información recopilada y determinar los factores que reducen la eficiencia ya que salen a luz los modos de fallo en el proceso.

Es así que se determinarán los principales factores que reducen la eficiencia el proceso de laminación para la fabricación de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación. De ello deriva la pregunta de investigación: ¿Cuáles son los principales factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación?

Las preguntas de investigación que también se plantean son:

- ¿Qué modos de fallo se encuentra en las etapas del proceso de producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación?
- ¿Qué efectos tienen los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado?
- ¿Qué relación existe entre los modos de fallo, los paros de producción no programados, los factores y la eficiencia del proceso?

- ¿Cuáles son las herramientas de gestión de calidad que se utilizan para analizar el proceso productivo?
- ¿Qué propuesta de mejora para el proceso se puede presentar?

JUSTIFICACIÓN

La rentabilidad de una empresa determina la sobrevivencia de ésta en el mercado industrial. Hay una cantidad muy amplia de empresas que fracasan porque sus procesos de producción no fueron analizados a profundidad y sus costos de operación se elevaron a tal grado que superaron sus ingresos o los costos de producción se hicieron efectivos a una escala no prevista por ineficiencias que no se contemplaron o que no se corrigieron en su debido tiempo.

La línea de investigación, sistemas de control de calidad, tiene como objetivo implementar sistemas de control de calidad que den beneficio en la operación de calidad; se involucra directamente con la eficiencia del proceso, ya que la eficiencia es consecuencia de la calidad. Los sistemas de control de calidad permiten reducir la probabilidad de fallos en el proceso que afecten el producto final, por lo que benefician la calidad del mismo y contribuyen a mejorar la operación de calidad de la industria. Esta línea de investigación permite determinar los principales factores que reducen la eficiencia del proceso de laminación.

La eficiencia de un proceso de producción está ligada al éxito del mismo, por lo que conocer que factores alteran la eficiencia es de suma importancia para alcanzar la eficiencia establecida. Debido al tipo de proceso productivo y los factores operativos implicados en el mismo, es necesario analizar los modos de fallo y las causas y efectos potenciales. Los paros de producción o los métodos de producción inadecuados en la laminación del acero son terriblemente

costosos, se pierden toneladas de materia prima, combustible, energía eléctrica y si eso fuera poco, debido a la potencia eléctrica empleada, cuando se originan desperfectos en el equipo de fabricación de la varilla de acero corrugado, éstos desencadenan daños a gran escala en la planta de producción. Al determinar los principales factores que reducen la eficiencia del proceso de laminación, se pueden focalizar los esfuerzos en erradicar problemas del proceso consiguiendo así disminuir los costos de producción, mejorar la calidad de los productos terminados, y aumentar la rentabilidad de la empresa, y por consiguiente el desarrollo tecnológico del país, coadyuvando a la prevención de las fallas catastróficas en las zonas de impacto sísmico.

Los factores que inciden en la eficiencia del proceso de laminación afectan etapas específicas del proceso productivo, las cuales son importantes de definir. Si algún factor incide en la eficiencia del proceso también entorpece el proceso de optimización y el riesgo de aumentar la frecuencia y prolongación de paros de producción se incrementa considerablemente. Además es de gran interés determinar si agentes externos al proceso como la tecnología actual se relacionan con la eficiencia del proceso o sino representan un porcentaje insignificante en la eficiencia del mismo.

Al identificar los principales factores que reducen la eficiencia del proceso se puede contribuir deliberadamente ya sea a reducir o aumentar la eficiencia del proceso, así es posible controlar los resultados en la producción y conocer los límites hasta donde se puede exigir que los resultados se den. Es viable proyectar mejoras o implementar controles que produzcan resultados positivos al proceso.

Aquellos que llevan las directrices de la planta de producción deben tomar en cuenta los factores para optimizar su trabajo y direccionar el trabajo de los

subalternos para alcanzar las metas programadas. También es importante que los colaboradores conozcan los principales factores que inciden en el proceso de laminación, para que desarrollen sus labores con mayor precisión teniendo en cuenta el alcance que puede tener su buen desempeño dentro de la planta de producción.

ALCANCES

El proceso de laminación para la producción de varilla de acero corrugado es un proceso que se ha ido mejorando a través de los años, a medida que la calidad del producto y los beneficios han ido en aumento, lo que ha permitido el desarrollo de una industria reconocida, con un desarrollo académico paralelo; sin embargo, en nuestro país ha sucedido solo dentro de las industrias, pero no a nivel académico. Existen en nuestro país algunos trabajos de investigación donde se expone el proceso de laminación o algunas partes del mismo. Los trabajos han sido desarrollados en su mayoría por futuros profesionales en la rama de la ingeniería; se orientan hacia problemas específicos que tienen que ver con aspectos técnicos del proceso más que con aspectos de calidad del mismo.

Las referencias previas al presente trabajo de investigación, brindan una base sobre la cual el análisis del proceso de laminación para determinar factores que reducen la eficiencia se puede realizar.

Mediante el alcance explicativo, que es considerado un método experimental, se pretende establecer las causas de la reducción de la eficiencia del proceso productivo. La investigación pretende responder las preguntas de investigación y verificar la veracidad de la hipótesis planteada. Debido a ello se desea llegar a analizar causas y efectos en los modos de fallo así como el porqué de ellos en relación con la eficiencia del proceso. Todo ello tiene implícito propósitos de exploración, descripción y correlación o asociación.

OBJETIVOS

General

Determinar los principales factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación.

Específicos

1. Describir los factores básicos que inciden en el proceso de laminación en caliente.
2. Determinar las etapas del proceso de laminación en caliente que son afectadas por las variables básicas que inciden en el proceso.
3. Identificar los métodos de control sobre los factores básicos que inciden en el proceso de laminación en caliente.
4. Encontrar la metodología de producción que optimiza el proceso de laminación en caliente.
5. Establecer la relación que existe entre los factores básicos que inciden en el proceso de laminación y la tecnología actual.
6. Determinar los modos de fallo en las etapas del proceso de laminación de acero corrugado en los trenes de laminación.

7. Definir los efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado.
8. Establecer la relación que existe entre los modos de fallo; los paros de producción no programados; los factores y la eficiencia del proceso por medio de herramientas de gestión de calidad utilizadas para analizar el proceso.
9. Presentar una propuesta de mejora para el proceso de laminación.

RESUMEN

Se define como factores a todas aquellas particularidades del proceso de laminación, sin los cuales el mismo no se podría llevar a cabo. Incluye características que van desde la materia prima y toda su transformación, hasta elementos de menor tamaño en las máquinas, equipos que inciden directamente en el proceso de laminación, así como los procedimientos y controles que se ejercen sobre el proceso y todo lo relacionado con ello.

El proceso de laminación para la fabricación de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación se ve afectado grandemente, por el factor humano. Los modos de fallo producen paros de producción, no programados que reducen el tiempo destinado a la producción los cuales implican una reducción en la eficiencia del proceso.

Se determina mediante un minucioso control en la gestión de calidad, que implica procesos estadísticos y análisis de procesos. Para ello, se emplearon métodos como la estratificación, diagrama de Pareto y el análisis modal de fallas y efectos. Los resultados obtenidos de los métodos proporcionaron acciones a realizar, las cuales ayudan directamente a evitar modos de fallo en el proceso de laminación. Las acciones recomendadas, aunque diferentes, poseen rasgos comunes y se pueden contener dentro de aspectos más generales que denominaré factores, los cuales son la razón de ser el estudio realizado.

La comprensión de los factores vendrá como consecuencia de entender el proceso de laminación, dicho proceso es muy particular y posee una gran

amplitud. Para ayudar en la tarea se describe el proceso de laminación de varias maneras; primero se hace una descripción de la materia prima, los equipos y máquinas implicadas; luego se dan a conocer las etapas del proceso, los métodos de control en cada etapa así como procedimientos destacados en la fabricación de varilla de acero corrugado.

Los principales factores que reducen la eficiencia del proceso de laminación en la producción de varilla de acero corrugado se dividen en dos: los cuales tiene que ver con la ejecución de los procedimientos establecidos y el control de las diferentes variantes dentro del proceso. Ambos factores indican que los procedimientos y controles que fallan, reducen significativamente la eficiencia del proceso ya que interrumpen el proceso productivo causando paros de producción no programados. Los fallos se encontraron en las diferentes etapas del proceso de laminación.

INTRODUCCIÓN

La maestría en gestión industrial ha permitido desarrollar una perspectiva más amplia de la gestión de calidad dentro del proceso de laminación, para la fabricación de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación. Los aportes significativos se han originado como parte de los sistemas de control de calidad los cuales fueron aprendidos en el curso de tecnologías de la calidad, donde se presentaron herramientas del control de calidad que permiten analizar problemas de gestión.

La maestría en gestión industrial facilita conocimientos de alto nivel académico y habilidades sólidas para analizar, entender y hacer propuestas que brinden opciones que generen cambios significativos en las empresas con enfoque industrial y permitan contribuir al desarrollo de procesos productivos como el existen en la industria de acero corrugado.

Teniendo las herramientas a la mano, se determinó analizar un proceso de producción, encontrar los problemas y dar una propuesta de mejora. Siendo el proceso a analizar, la producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación, se consideró como una excelente herramienta para aplicar el análisis modal de fallos y efectos.

Las herramientas antes mencionadas juntamente con el conocimiento obtenido en los sistemas de control de calidad y de las otras líneas de investigación que forman parte de la maestría, proporcionaron la base para el

planteamiento, investigación y obtención de resultados del trabajo de investigación presentado.

En Guatemala, el proceso de laminación en caliente para la fabricación de varilla de acero corrugado es parte vital de la construcción con concreto reforzado. El método de construcción es común en las regiones donde se encuentra concreto reforzado en estructuras sencillas como paredes, hasta estructuras complejas y grandes como puentes y edificios de gran envergadura. Las estructuras deben su estabilidad a pequeñas y grandes varillas de acero, comparándolas con el tamaño de la estructura, que dotan de características únicas al concreto.

Por otro lado, cabe señalar que la región centroamericana se caracteriza por una alta ocurrencia sísmica que la hace susceptible a fallas catastróficas de su infraestructura en general.

El proceso de laminación implica en gran manera conocer la materia prima. La cual trae desde su fabricación consecuencias sobre el proceso de laminación, ya sea para mantener los resultados esperados o reducir la eficiencia del proceso.

La planta de laminación comprende el horno de laminación, el molino donde se encuentran los trenes de laminación y la cama de enfriamiento. Todas las áreas provistas de equipos y maquinaria destinadas a contribuir al proceso de laminado. Las etapas dentro del proceso de laminación se agrupan respecto a la temperatura del acero; cuando se calienta, se mantiene y se enfría. Además es importante describir los controles aplicados a cada etapa. Para dimensionar todo lo que implica el proceso se citan a grandes exponentes del tema de talla

mundial, los cuales han demostrado la veracidad de sus planteamientos, poniéndose a prueba, una vez más, en el presente trabajo de graduación.

Una particularidad del proceso es que al detectarse una anomalía en algún elemento vital de la planta de producción, se hace imprescindible interrumpir la misma, perdiendo, en tan solo unos pocos segundos, hasta una tonelada métrica de materia prima. Tal circunstancia requiere un análisis paso a paso de subprocesos y elementos particulares de equipos, que al trabajar en sinergia dan lugar a un proceso en línea continuo y eficiente.

Se analizó el proceso mediante sistemas de control de calidad que permitieron reunir y clasificar la información mediante la estratificación de la información, dar prioridad a la información a analizar mediante el diagrama de Pareto, analizar a fondo cada problema presentado proponiendo acciones correctivas mediante un análisis del proceso llamado análisis modal de fallas y efectos. Las acciones correctivas dieron origen a los diferentes factores que reducen la eficiencia del proceso.

El desarrollo de la investigación permitió establecer que los controles llevados para garantizar un proceso de producción correcto son determinantes, para aumentar o reducir la eficiencia del proceso. Los controles permiten mantener el proceso productivo de tal manera que los modos de fallo se presenten con menor frecuencia.

Se determinó el efecto perjudicial que causa el no realizar los procedimientos establecidos para operar equipos o para realizar actividades dentro del proceso de laminación. La ejecución de los procedimientos es vital para no caer en errores cometidos en el pasado; además establece un estándar mínimo en el cumplimiento de actividades específicas, como la calibración de

equipos o máquinas y la secuencia correcta de pasos a seguir para realizar el proceso de producción, es muy significativo cuando se trata de alcanzar una mejora continua en el proceso.

Los factores descritos anteriormente pueden ser controlados y utilizados para beneficio del proceso, obteniendo un efecto contrario, aumentar la eficiencia del proceso de laminación. Los factores inciden en todas las etapas del proceso de producción y son causantes de paros de producción no programados que reducen el tiempo destinado a la producción.

Las particularidades de los factores sugieren que es necesario aumentar la supervisión sobre las actividades de control del proceso y ejecución de procedimientos establecidos; así también, mejorar la calidad de los controles y procedimientos del proceso como evaluar la funcionabilidad de los mismos.

La gestión de calidad puede contribuir significativamente al hacer un plan preventivo, basado en los resultados de la identificación de posibles fallas y erradicar las mismas antes de que puedan contribuir a la reducción de la eficiencia del proceso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Productividad

Tiene que ver con los resultados que se obtienen en un proceso o un sistema, por lo que incrementar la productividad es lograr mejores resultados considerando los recursos empleados para generarlos (Gutiérrez, 2010).

Según Chase y Jacobs (2009), la productividad es una medida relativa que suele emplearse para conocer que tan bien se están utilizando los recursos o los factores de producción en una unidad de negocios. Enfocándose en utilizar los recursos existentes de la mejor manera, por ello es primordial medir el desempeño de las operaciones para evaluar la productividad.

De acuerdo con García 2013, la productividad indica el mejor o peor uso que se hace de los factores de producción de una economía concreta, lo que teóricamente refleja su capacidad de competir con eficacia en el mercado. También la producción debe ser definida como el indicador de eficiencia que relaciona la cantidad de producto utilizado con la cantidad obtenida.

Puede definirse muy bien por la relación formada entre los resultados logrados y los recursos empleados.

1.1.1. Eficiencia

El término eficiencia tiene su origen en el latino *efficientia* y se relaciona a la habilidad de tomar en cuenta con algo o alguien para lograr un resultado. Es la capacidad de lograr un objetivo determinado cuanto antes utilizando el tiempo más corto posible y con utilizando la menor cantidad de recursos, lo que implica una optimización (www.definicion.de).

Según Hessong (2014), el cálculo de un valor numérico de la eficiencia ayuda a identificar si hay que hacer mejoras necesarias al proceso de producción. El cálculo se hace de la siguiente manera:

- Determinar el tiempo que tarda en completarse cada pieza, tomando en cuenta el tiempo desde el pedido hasta la entrega, el cual equivale al tiempo total de producción.
- Separar el tiempo utilizado para la fabricación del producto, el cual se conoce como tiempo de valor añadido.
- Calcular la eficiencia de fabricación utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de eficiencia en la fabricación} = \frac{\text{Tiempo total de fabricación}}{\text{Valor añadido de tiempo}} \times 100$$

El análisis para aumentar la eficiencia en un proceso productivo busca reducir o eliminar tiempo de programación, paros no programados, desbalanceo de capacidades, mantenimiento y reparaciones (Gutiérrez, 2010).

1.1.2. Eficacia

Mejía (1998), indica que la eficacia es el grado en que se logran los objetivos y metas de un plan, da a conocer cuántos de los resultados esperados se alcanzaron. Concentra los esfuerzos de una entidad en las actividades y procesos que realmente deben llevarse a cabo para el cumplimiento de los objetivos formulados. Generalmente se utiliza la siguiente fórmula para realizar el cálculo del mismo:

RA / RE

Donde R = Resultado, E = Esperado, A = Alcanzado.

El resultado expresa la comparación entre lo alcanzado y lo esperado. Un nivel superior de eficacia en una producción corresponde a un porcentaje de ejecución muy alto, cuya calificación es cada vez más difícil de obtener ya que los niveles superiores de cumplimiento exigen mayores esfuerzos e imponen mayores grados de dificultad.

Según Sacristán (1995), la máxima eficacia del sistema de producción se logra a través de la mejora de la eficacia del binomio hombre - máquina, de la siguiente forma:

- A través de la organización y gestión de la producción con el objetivo de establecer una gestión lo más simple y reactiva posible que permita la mejora permanente de los costes que corresponden con las expectativas y necesidades de los clientes.
- Optimizar diseños de los equipos de producción aplicando la ingeniería simultánea.

- Las implantaciones para lograr un ciclo pieza a pieza.
- El dominio de los procesos para lograr una máxima calidad del producto.
- La reducción de tiempo de fabricación.

1.2. Sistema de gestión de calidad

Un Sistema de Gestión de Calidad es una herramienta que le permite a cualquier organización planear, ejecutar y controlar las actividades necesarias para hacer cumplir los requisitos de calidad que una empresa requiere para satisfacer los requerimientos acordados con sus clientes, a través de una mejora continua, de una manera ordenada y sistemática (<http://www.sistemasycalidadtotal.com>).

Según Fernández, J. (2013), los sistemas de Gestión de Calidad se basan en los ocho principios de la calidad que son el enfoque al cliente, liderazgo, participación del personal, procesos, gestión basada en sistemas, mejoramiento continuo, decisiones basadas en hechos y relación mutuamente beneficiosa con el proveedor. El sistema permite considerar la forma en que cada proceso individual se vincula vertical y horizontalmente, sus relaciones y las interacciones dentro de la organización, pero sobre todo también con las partes interesadas fuera de la organización.

Se deben realizar las siguientes actividades, para una correcta ejecución de los sistemas de gestión de calidad: determinar, analizar e implementar los procesos, procedimientos y actividades requeridas para la obtención del servicio o producto, y que a su vez estén en armonía con los objetivos planteados. Las actividades de control y seguimiento para la operación eficaz de los procesos deben de ser definidas.

Existen varias normas que establecen requisitos para la implementación de los sistemas y que son emitidas por organismos normalizadores como la ISO (Organización Internacional de Normalización). Ejemplos de estas normativas están:

- ISO 9001 - Requisitos para un Sistema de Gestión de la Calidad
- ISO 10015 - Directrices para la Formación
- ISO 15189 - Requisitos para un Sistema de Gestión de la Calidad en Laboratorios Clínicos.
- ISO 17025 - Requisitos para un Sistema de Gestión de la Calidad en Laboratorios de Ensayos y Calibración.
- OHSAS 18001 - Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el trabajo.

Existen ocho principios de la gestión de calidad que puede utilizar la alta Dirección, con el fin de conducir a la organización hacia una mejora en el desempeño:

- Enfoque en el cliente
- Liderazgo
- Participación del personal
- Enfoque basado en procesos
- Enfoque de sistema para la gestión
- Mejora continua
- Enfoque basado en hechos
- Relaciones beneficiosas en doble vía con el proveedor

1.2.1. Mejora

"La mejora se plantea como un proceso inevitable si se busca lograr la excelencia. Es mínimo el porcentaje de personas que logran éxito al intentar por primera vez, sin embargo, la consecución de las metas planteadas, incluso la superación se puede lograr si se intenta dar solución a lo que lo necesita, hacer mejoras donde se puede y analizar los errores para no caer en ellos nuevamente" (<http://es.workmeter.com/>).

El éxito tiene como origen una cadena de fracasos de los que se puede tener un aprendizaje, pero para ello hay que tener en cuenta, no sólo los resultados, sino los hechos que nos conducen a ello. Ya que es posible tener un progreso significativo en lo que se puede medir, poniendo en ejecución los aspectos descritos a continuación:

1.2.1.1. Mejora continua

Summers, D. (2006), indica que una revisión de operaciones pondrá al descubierto muchas oportunidades de mejora. Cualquier fuente de desperdicio, como las reclamaciones de garantía, horas extra, recortes, repetición de procesos, retrasos de la producción o áreas que necesiten más capacidad, son proyectos potenciales. Incluso las mejoras pequeñas pueden dar como resultado un impacto significativo en las utilidades de la organización.

Actualmente, la globalización introduce automáticamente en un mundo sumamente competitivo, donde los clientes son más exigentes y las tecnologías están a la vanguardia. Las organizaciones deben trabajar arduamente para satisfacer las demandas de los clientes mediante la mejora continua y procurar la máxima calidad en sus productos o servicios.

Ventajas de la mejora continua, según Fernández, J. (2013):

- Consigue mejoras en corto plazo y resultados visibles.
- Se concentra en esfuerzos en ámbitos organizativos y de procedimientos puntuales.
- La reducción de productos defectuosos, trae como consecuencia una reducción en los costos, como resultado de un consumo menor de materias primas.
- Incrementa la productividad y dirige a la organización hacia la competitividad.
- Permite eliminar procesos repetitivos.

1.2.1.2. Acción correctiva

Ventajas de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 9000:2005, una acción correctiva es una acción que se toma para erradicar las causas de una no conformidad ubicada u otra condición no deseable. La acción correctiva se toma para prevenir que algo vuelva a producirse, buscando la eliminación de la no conformidad.

Indica Nuñez, P. (2012) que como parte de la gestión de la calidad, la acción correctiva puede incluir cambios en los procesos, procedimientos o sistemas para la mejora de la calidad en cualquier fase del ciclo de calidad. Se distingue de una simple corrección debido a estar relacionada con la eliminación de las causas de una no conformidad.

Cualquier acción correctiva debe ser apropiada a los efectos de las no conformidades detectadas. Para ello es necesario:

- El análisis crítico de las no conformidades, incluyendo las quejas de los clientes, *feedback* de los empleados, los defectos en los productos, análisis de mercado, entre otras.
- La determinación de las causas de las no conformidades; el punto central de la solución a un problema es identificar sus causas y las que tendrá que ser corregida.
- La evaluación de la necesidad de hechos para asegurar que las no conformidades no ocurran de nuevo (incluyendo la evaluación de los recursos necesarios, la identificación de las diversas alternativas y la definición del momento de su aplicación).
- La determinación e implementación de la acción necesaria; algunas soluciones pueden ser muy sencillas de implementar, pero pueden haber otras cuyo grado de complejidad, recursos y tiempo requerido obligan la realización de un planeamiento adecuado.
- El registro de los resultados de las acciones realizadas, con el fin de permitir una correcta evaluación de acciones correctivas.
- Un análisis crítico de las acciones correctivas tomadas.

Gutiérrez, H. (2010) es importante enfatizar que una acción correctiva es la corrección permanente del problema y/o de la no conformidad, para que ésta no se vuelva a presentar. En otras palabras, se trata de asegurar que, mediante la acción correctiva, el desempeño del progreso regrese a sus niveles planeados. Además, no se trata de arreglos temporales, sino acciones de fondo, por lo que normalmente es necesario seguir un procedimiento bien definido para generar acciones correctivas.

1.2.1.3. Acción preventiva

De acuerdo a la norma UNE-EN ISO 9000:2005, una acción preventiva es una acción tomada para eliminar la causa de una no conformidad potencial u otra situación potencialmente indeseable, para realizarla no es necesario que se haya presentado ninguna no conformidad.

Según Nuñez, P. (2012) la identificación de acciones preventivas es el análisis de la información, como los datos históricos anteriores sobre el tipo de actividades realizadas, instalaciones, condiciones ambientales, cualificación profesional, entre diversos otros. La organización debe puntualizar acciones para erradicar los orígenes de no conformidades potenciales para anticipar su ocurrencia. Las acciones de prevención deben ser las apropiadas para los efectos de los problemas de gran alcance identificados, lo que requerirá:

- Definir las no conformidades potenciales y sus causas.
- Evaluar la necesidad de acciones para prevenir la ocurrencia de no conformidades.
- Determinar e implementar las acciones necesarias.
- Registrar los resultados de las acciones tomadas.
- Analizar de manera crítica las acciones preventivas tomadas.

En un proceso de acción preventiva, también hay un conjunto de información fuera de la organización que se puede monitorear, tal como, por ejemplo, información sobre el comportamiento y las preferencias del consumidor, o incluso datos económicos, técnicos y conjeturales.

Gutiérrez, H. (2010) las acciones preventivas se originan para prevenir fallas potenciales, atendiendo a sus causas. La categoría de una falla potencial se puede alcanzar debido a la experiencia y conocimiento de la gente, ya sea con el mismo proceso o producto, o con otros similares. Por lo tanto, es de mucha utilidad emplear las acciones preventivas en las fases de diseño del producto y del proceso, ya que si ahí se prevé una falla potencial se podrán tomar medidas para prevenirla. La metodología conocida como análisis modal de fallas y efectos es una buena herramienta para generar la base de acciones preventivas.

1.2.1.3.1. Análisis modal de fallas y efectos

El Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) es una de las herramientas más utilizadas en la planificación de Calidad, ver III, los tipos que existen son: AMFE de Producto para evaluar su diseño y como herramienta de optimización del mismo, y AMFE de Proceso para evaluar las deficiencias que puede ocasionar un mal funcionamiento, como herramienta de optimización antes de su traspaso a operaciones (www.fundibeq.org).

El análisis modal de fallos y efectos establece un análisis detallado de cada posible fallo a través de la ponderación de criterios como: gravedad del fallo (S) ver tabla I, probabilidad de ocurrencia (O) ver tabla II y probabilidad de no detección (D) ver tabla IV.

Existen parámetros definidos para la ponderación de cada uno de los criterios anteriores, como se describen a continuación:

Tabla I. **Cuadro de clasificación según gravedad o severidad de fallo**

Criterio	Valor de S
Ínfima. El defecto sería imperceptible por el operador	1
Escasa. El operador puede notar un fallo menor, pero sólo provoca una ligera irregularidad.	2-3
Baja. El operador nota el fallo y le produce irregularidad en el proceso.	4-5
Moderada. El fallo produce problemas de operación	6-7
Elevada. El fallo es crítico, originando problemas de operación y paros.	8-9
Muy elevada. El fallo implica problemas de seguridad y paros considerables de producción	10

Fuente: elaboración propia, según adaptación de www.valoryempresa.com, 2013.

Tabla II. **Cuadro de clasificación según la probabilidad de ocurrencia**

Criterio	Valor de O
Muy escasa probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado	1
Escasa probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias pasadas similares	2-3
Moderada probabilidad de ocurrencia. Defecto aparecido ocasionalmente	4-5
Frecuente probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia	6-7
Elevada probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentado frecuentemente en el pasado	8-9
Muy elevada probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente	10

Fuente: www.valoryempresa.com, 2013.

Los diferentes criterios permiten la asignación correcta de una ponderación en la escala de 1 a 10, de acuerdo al suceso bajo análisis. Dicha ponderación

proporciona el número de prioridad de riesgo (NPR) o índice de prioridad de riesgo (IPR). Dicho número permite priorizar la causa potencial del fallo para posibles acciones correctoras.

Las acciones correctoras deben de llevar el siguiente orden de prioridad para su elección:

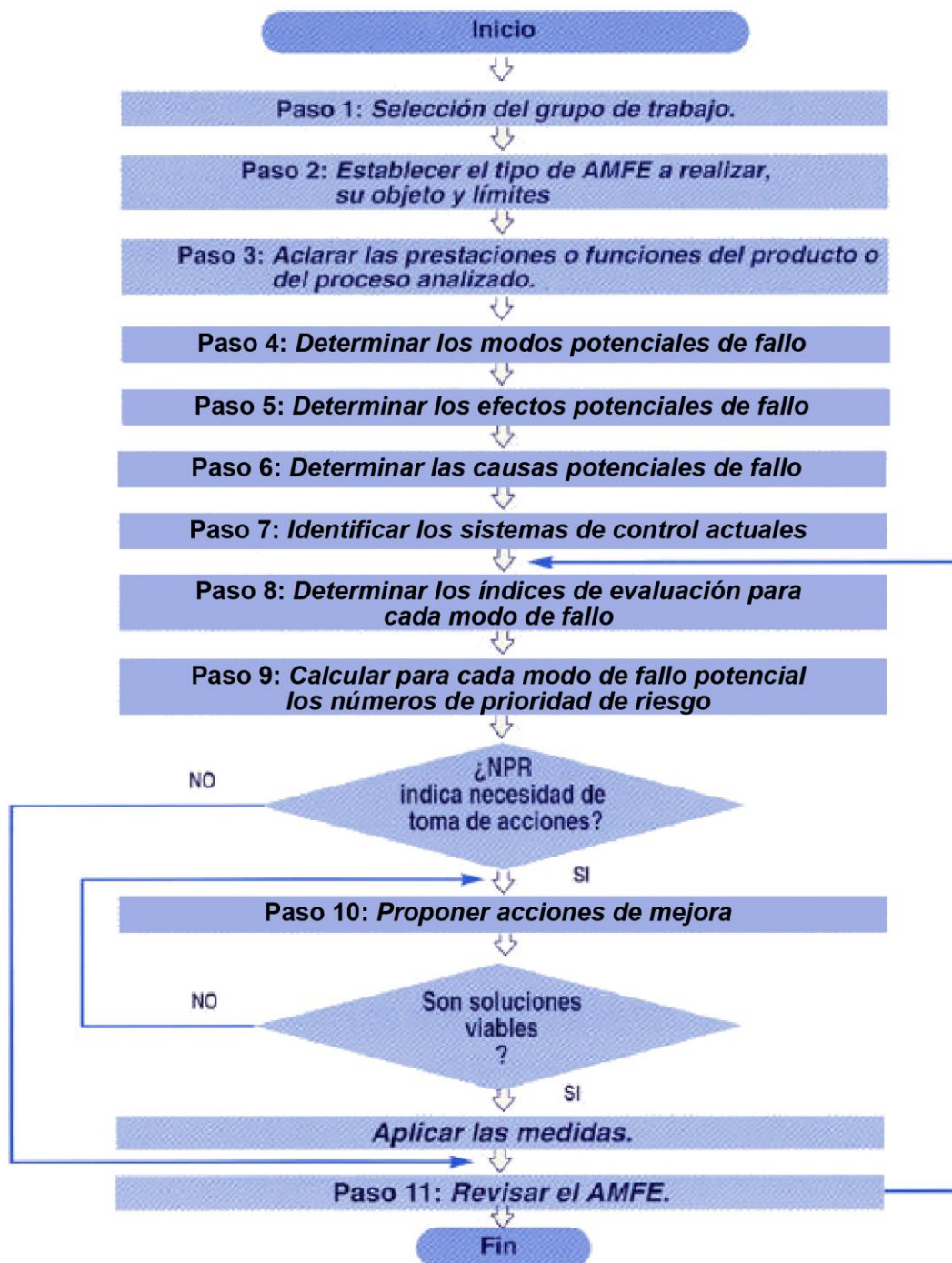
- Cambio en el proceso general
- Cambio en el proceso de fabricación
- Incremento de control o de la inspección

Tabla III. **Cuadro de clasificación, según la probabilidad de no detección**

Criterio	Valor de D
Muy escasa. El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
Escasa. El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado	2-3
Moderada. El defecto es una característica de bastante fácil detección	4-5
Frecuente. Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente	6-7
Elevada. El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo	8-9
Muy elevada. El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil detectable	10

Fuente: www.valoryempresa.com, 2013.

Tabla IV. **Diagrama de proceso AMFE**



Fuente: www.valoryempresa.com, 2013.

1.2.2. Herramientas para el control de calidad

1.2.2.1. Estratificación

La estratificación es un método estadístico utilizado para el control, análisis y mejora de la calidad y del tiempo utilizado al clasificar los datos disponibles por grupos con similares características en donde a cada grupo se le denomina estrato (<http://www.aiteco.com>).

Estratificar es analizar problemas, fallas, quejas o datos, clasificándolos o agrupándolos de acuerdo con los factores que, se cree, pueden influir en la magnitud de los mismos, a fin de localizar buenas pistas para mejorar un proceso (Gutiérrez, 2010).

Se definen estratos en función de la situación particular de que se trate y del proceso de producción que se esté analizando, pudiendo establecerse estratificaciones atendiendo a: personal, materiales, maquinaria y equipo, áreas de gestión, tiempo, entorno, localización geográfica, entre otros.

La estratificación tiene como objetivo aislar la causa de un problema, identificando el grado de influencia de ciertos factores en el resultado de un proceso y sirviendo como base en distintas herramientas de calidad.

La estratificación es una poderosa estrategia de búsqueda que facilita entender cómo influyen los diversos factores o variantes que intervienen en una situación problemática (Gutiérrez, 2010).

1.2.2.2. Diagrama de Pareto

Besterfield, D. (1995), explica que un Diagrama de Pareto es una herramienta que se utiliza para priorizar los problemas o las causas que los genera. Basándose en el principio de Pareto, ésta es una herramienta que ayuda a identificar lo poco vital dentro de lo mucho que podría ser trivial, es decir, si se tiene un problema con muchas causas, se puede decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

Gibler, N. (2003), indica que un diagrama de Pareto se expresa en forma de gráfica de barras con los elementos en orden descendente para que se pueda identificar los factores que más contribuyen a los problemas, identificando a cuáles puntos defectuosos debe dárseles prioridad para abordarlos.

También Gibler, N. (2003), indica algunos pasos a seguir para construir un diagrama de Pareto, que son los siguientes:

- Paso 1: Clarificar los objetivos de construir un diagrama de Pareto y seleccionar el problema que se desea solucionar.
- Paso 2: Clarificar los estratos relacionados con el problema e identificar los datos que se recopilarán.
- Paso 3: Diseñar una hoja de recopilación de datos que incluya los elementos y sus totales y llenarlas.
- Paso 4: Elaborar una hoja de datos para elaborar un diagrama de Pareto que muestre los elementos, sus totales individuales, los totales acumulativos, porcentajes relativos al total general y los porcentajes acumulados, de forma ordenada de acuerdo a su frecuencia.
- Paso 5: Ordenar los elementos con relación al número de veces que ocurrieron y obtener un porcentaje relativo de cada causa.

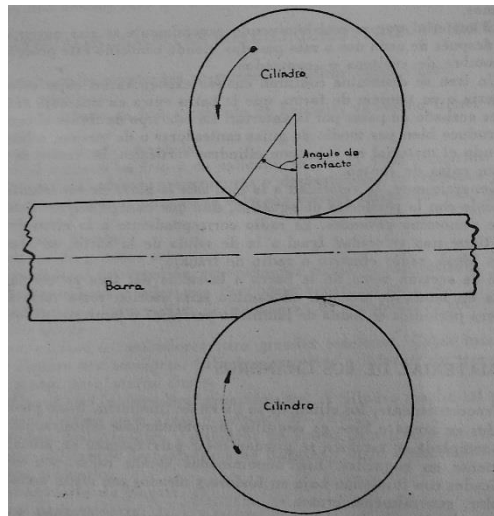
- Paso 6: Construir un diagrama de Pareto a partir de la hoja de datos y calcular los porcentajes acumulados.

Además de ayudar a seleccionar el problema que es más conveniente atacar, el diagrama de Pareto facilita la comunicación, motiva la cooperación y recuerda de manera permanente cuál es la falla principal. El análisis de Pareto es aplicable a todo tipo de problemas: calidad, eficiencia, conservación de materiales, ahorro de energía, seguridad y otros. Otra ventaja es que permite evaluar objetivamente, con el mismo diagrama, las mejoras logradas con el proyecto, para lo cual se observa en qué cantidad disminuye la altura de la barra correspondiente a la categoría seleccionada (Gutiérrez, 2010).

1.3. Proceso de laminación

El proceso de laminación consiste en la reducción de secciones de un material a volumen constante, por medio de la aplicación de presión aplicada sobre el mismo, a través de rodillos especiales, ver figura 1. En el caso particular, del acero, con el fin de producir barras, perfiles, chapas, alambrón y otros, a partir de lingotes, tochos o palanquillas. Se realiza en caliente o en frío. La laminación en caliente se efectúa calentando la materia prima a temperaturas mayores a las de recristalización del metal; en el acero a temperatura entre 1100°C y 1200°C (Aguilar, 2012). La laminación en frío se realiza muy por debajo de las temperaturas de recristalización, y se utiliza para lograr espesores más finos y homogéneos.

Figura 1. **Esquema del proceso de laminación**



Fuente: Wusatoski, 1969. p. 11

La materia prima para la laminación, como se dijo al principio, consiste en tochos, lingotes o planquillas (Aguilar, 1999). El factor más importante en la utilización de la materia prima, está constituido por una composición que satisfaga las demandas de la calidad de los productos terminados, ello es, las sollicitaciones mecánicas a que será sometida.

La planquilla de acero fue diseñada para satisfacer una variedad de condiciones de fabricación. La experiencia en investigación y fabricación, que se extiende a lo largo de un siglo, ha dado lugar a muchas formas y tamaños.

La sección transversal de la mayoría de los lingotes se aproxima a un cuadrado o un rectángulo con esquinas redondeadas. La altura o la longitud del lingote es siempre mayor que las dimensiones de la sección transversal. Las características geométricas del lingote o planquilla juegan un papel muy importante en el proceso, ya que de ello depende la aplicación de una buena secuencia de pases y, por consiguiente, la perfecta continuidad del proceso.

En la actualidad, la implementación de la colada continua produce materia prima de secciones homogéneas en su totalidad. Sin importar el tamaño o la forma de la palanquilla de acero, está sujeta a variaciones internas en la composición química y la homogeneidad de la misma, debido a fenómenos naturales que ocurren cuando el acero solidifica. El tamaño de la palanquilla influye en el carácter y la magnitud de las variaciones. El fenómeno de la congelación selectiva, que se asocia con la solidificación, resulta de la segregación y la falta de uniformidad en la composición química en la palanquilla. Teniendo en cuenta las porciones del metal solidificado, puede contener más o menos de los elementos del contenido original del acero líquido, fenómeno conocido como segregación (Aguilar, 2012).

La segregación en diversos grados se encuentra en todo tipo de lingotes de acero. Los principales factores que afectan la clasificación de la materia prima son: el tipo y la composición del acero, la temperatura de fusión, la forma de lingote o palanquilla y las características inherentes a la segregación de los elementos de que se trate (The Wire Association, Inc., 1965).

1.3.1. Materia Prima

Como ya se ha indicado, la materia prima para la laminación del acero la constituyen los tochos, lingotes, planchones y palanquilla, los cuales han sido procesados a través de cualquiera de los procesos de acero. En Guatemala una sola planta produce palanquilla para su propio abastecimiento y el resto se importa de otros países dentro y fuera del área continental.

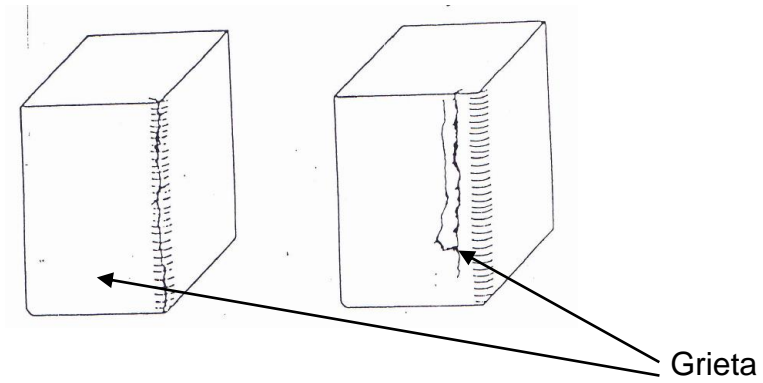
1.3.1.1. Características de los defectos

- Defectos de superficie
 - Grietas

Como sucede en la práctica convencional de colada, algunos tipos de acero están más sujetos a las grietas que otros, y en ello influyen grandemente la composición química. Se pueden obtener palanquillas sin grietas cuando la coquilla es geoméricamente en orden y cuando la temperatura, velocidad de colada, enfriamiento primario y secundario se pueden regular el uno con el otro, en dependencia de las calidades del acero en la justa cantidad, ver figuras 2, 3, 4 y 5. (Danieli, 2013)

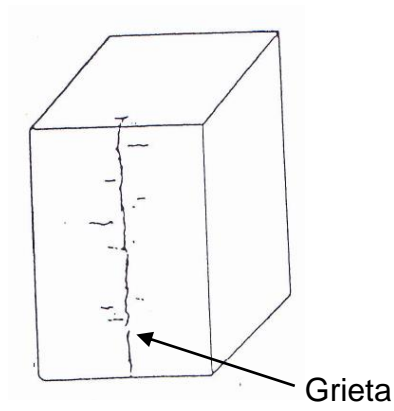
Las grietas “suelen ser debidas a la formación de una piel irregular o defectuosa en el curso de la solidificación. En muchos casos, las grietas se pueden evitar regulando cuidadosamente el enfriamiento de la lingotera o modificando la alimentación de acero líquido a la lingotera. Algunas grietas longitudinales aparecen en las esquinas cuando el redondeo de ellas es insuficiente o por enfriamiento demasiado rápido de las aristas. Los aceros de alto contenido de carbono son más susceptibles a agrietarse que los de bajo carbono. Altos contenidos de azufre, superiores por ejemplo a 0,030%, pueden ser causantes de grietas. En términos generales puede decirse que las grietas son mínimas y es fácil eliminarlas si: se emplean temperaturas correctas de colada, la lingotera se mantiene en buen estado, el enfriamiento es regulado convenientemente”. (Enríquez, Tremps, De Elío y Fernández, 2009)

Figura 2. **Grieta longitudinal de ángulo**



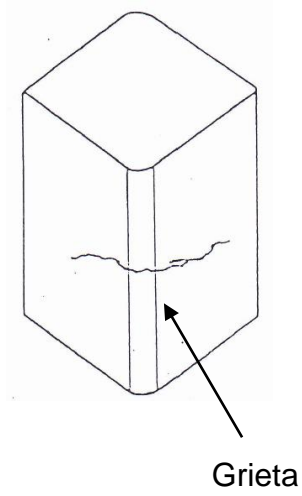
Fuente: Danieli, 2013. p. 8

Figura 3. **Grieta longitudinal facial**



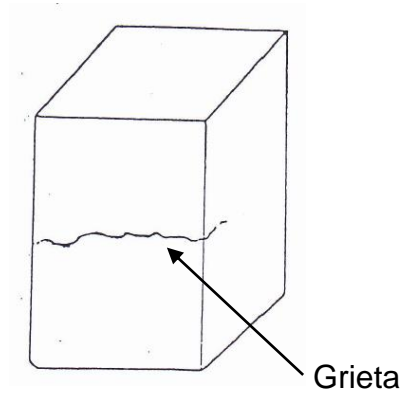
Fuente: Danieli, 2013. p. 8

Figura 4. **Grieta transversal de ángulo**



Fuente: Danieli, 2013. p. 9

Figura 5. **Grieta transversal facial**

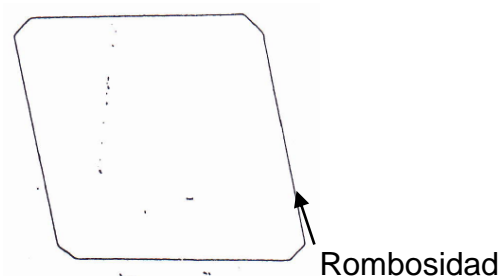


Fuente: Danieli, 2013. p. 10

- Defectos de perfil

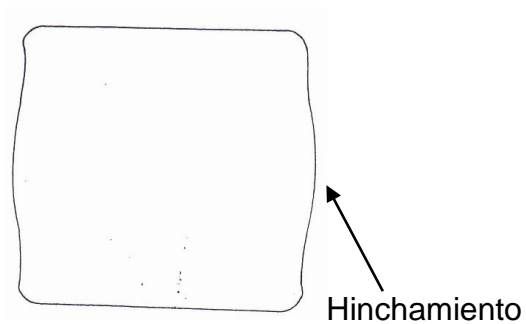
Se trata de defectos en donde la sección transversal del producto está deformada con respecto al perfil geométrico real, ver figuras 6, 7 y 8. Muy a menudo, junto con los defectos de perfil, se pueden formar también algunas grietas. Las causas pueden ser numerosas pero los defectos de perfil generalmente pueden tener conexión a la insuficiente o no uniformidad de enfriamiento, velocidad de extracción alta, temperatura de colada demasiado alta, especialmente cuando los factores mencionados no están unidos entre ellos. (Danieli, s. f.)

Figura 6. **Rombosidad**



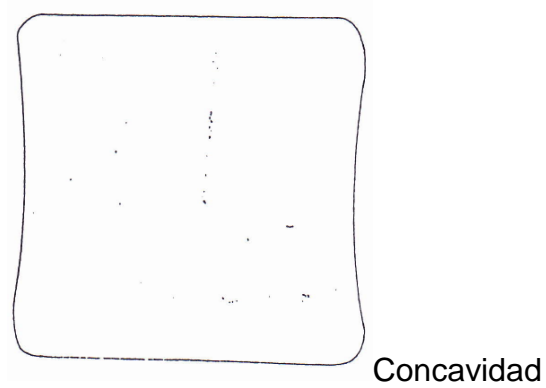
Fuente: Danieli, 2013. p. 11

Figura 7. **Hinchamiento**



Fuente: Danieli, 2013. p. 11

Figura 8. **Concavidad**

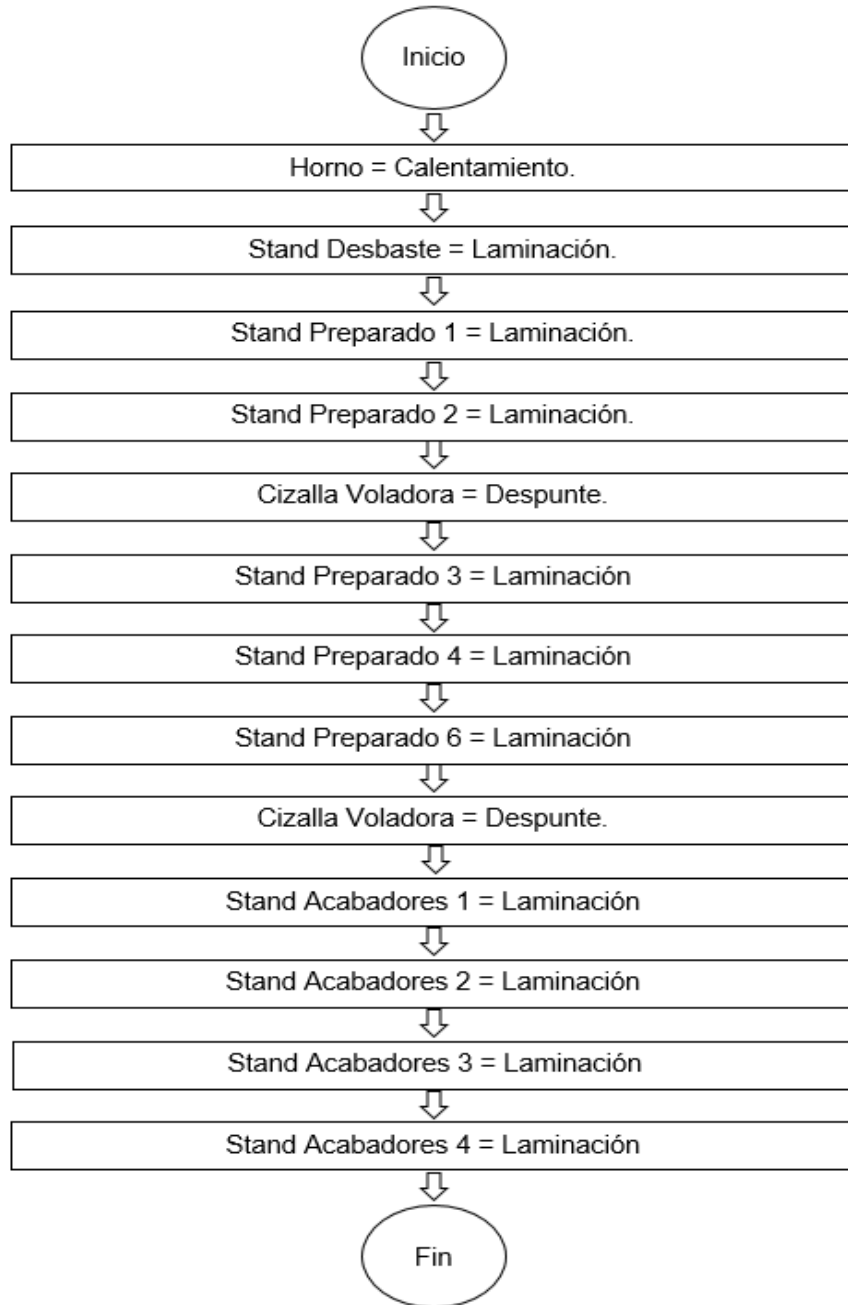


Fuente: Danieli, 2013. p. 13

1.3.2. Infraestructura (maquinaria y equipo)

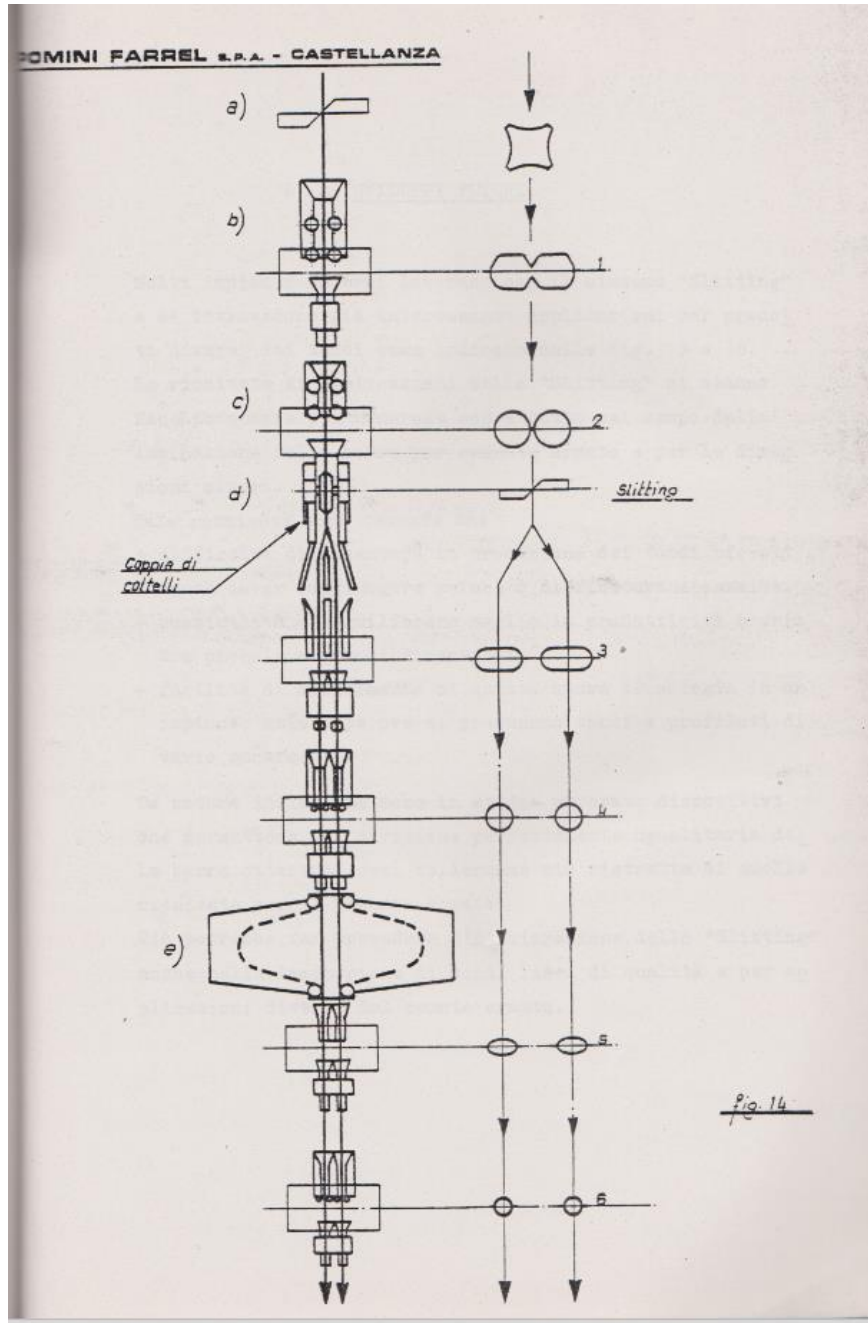
Una planta de laminación de acero, está constituida básicamente por un horno de recalentamiento, el molino de laminación propiamente dicho y la cama de enfriamiento, así como de los equipos complementarios auxiliares de la maquinaria citada y que complementan el proceso, ver tabla V y figura 9.

Tabla V. **Diagrama de proceso de laminación**



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Lay-out** de una planta de laminación



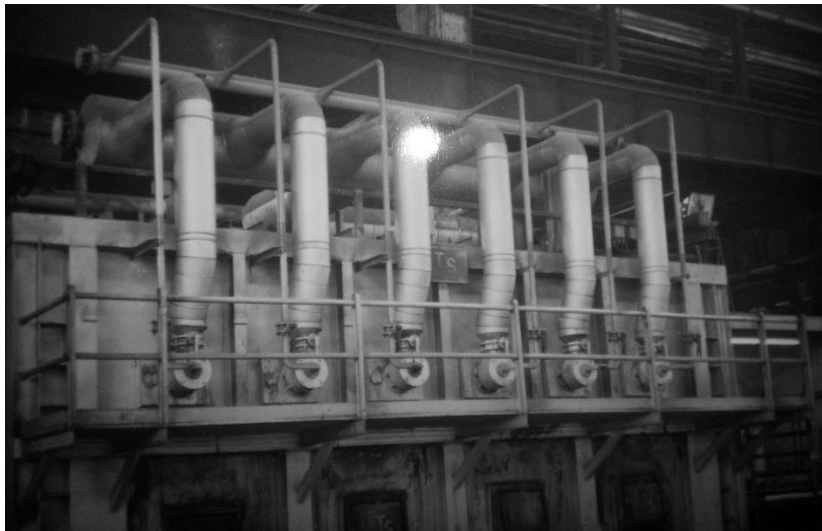
Fuente: Forni, 1981. p. 15

1.3.2.1. Horno de recalentamiento

- Defectos de superficie

Está integrado básicamente por la cámara de material refractario o bóveda. Los hay de empuje, galopantes y de fosa, ver figura 10.

Figura 10. **Horno de empuje**



Fuente: Indesa, 2014. p. 20

1.3.2.1.1. Sistema de combustión

(Arenas, 2010) el sistema se divide en:

- Sistema de alimentación de combustible a los quemadores
- Sistema de suministro de aire a los quemadores
- Alimentación y extracción de materia prima al horno
- Sistema de extracción de humos

Cada uno de los sistemas tendrá su accionamiento desde un PLC que es el que envía todas las señales a los contactores y recibe las señales de los sensores en el proceso.

- Sistema de alimentación de combustible

El combustible que utiliza el horno es el comúnmente conocido como *bunker* o *fuel oil*, se obtiene de la destilación y refinación de los hidrocarburos, su precio es bajo en comparación a otros combustibles, por ello se tiene mayor preferencia por el bunker en aplicaciones donde el consumo de energía es importante, como en hornos de precalentamiento de lingotes.

El poder calórico del bunker es una función directa del crudo de origen pero se puede establecer un promedio de 140,000 BTU/galón.

- Bombas de combustible

Las bombas de engranes son las más apropiadas para esta aplicación.

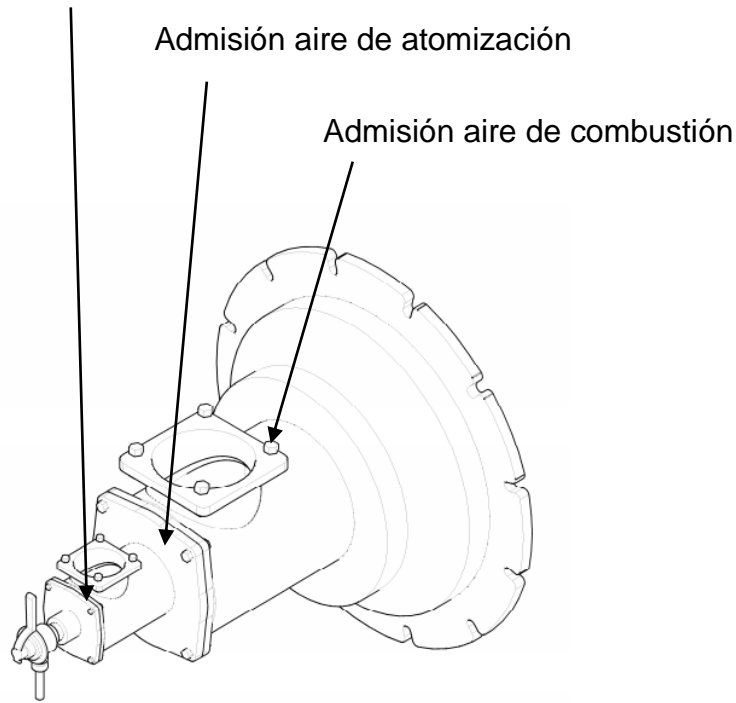
- Tuberías

Las tuberías que transportan el combustible son de tubo galvanizado ya sea que se utilicen para el combustible frío o caliente, la tubería llega hasta los quemadores, pero justo antes de ingresar al quemador cambia a tubería de cobre en un diámetro menor, ello permite regular el caudal de combustible y medirlo.

- Sistema de suministro de aire a quemadores

Figura 11. **Partes de un quemador**

Admisión de combustible



Fuente: Arenas, 2010. p. 33

En la mayoría de los casos, el aire de la combustión es proporcionado por un ventilador centrífugo de alta presión, su función es impulsar aire hacia los quemadores a través de tuberías. Las tuberías conducen el aire a través de los recuperadores de calor los cuales transfieren calor mediante los gases residuales.

Un quemador de bunker tiene dos orificios para la admisión de aire y uno para admisión de combustible. Para que exista una atomización uniforme del combustible se destina el aire de atomización, es así que se espera una combustión instantánea y eficiente para así evitar una mezcla incorrecta. El otro orificio se utiliza para el aire de combustión, ver figura 11.

- Aire de atomización

Para que el bunker pueda formar parte de la combustión es necesario dividirlo en partículas muy pequeñas, ello se logra conjuntamente con el aire de atomización.

- Aire de combustión

El aire de combustión es impulsado por ventiladores de gran caudal de aire, a alta presión y el caudal es regulado por una válvula motorizada, la cual es uno de los principales elementos en el control del horno al suministrar justo el aire necesario para acercarse a la combustión perfecta, por eso se necesita un control preciso sobre ella. (Arenas, 2010)

- Sistema de precalentamiento de aire de combustión

La eficiencia del sistema de combustión se incrementa cuando el aire que se dirige a los quemadores pasa a través del intercambiador de calor, quien transmite calor al aire debido a los gases residuales de la combustión de los cuales absorbe calor.

- Sistema de extracción de humos

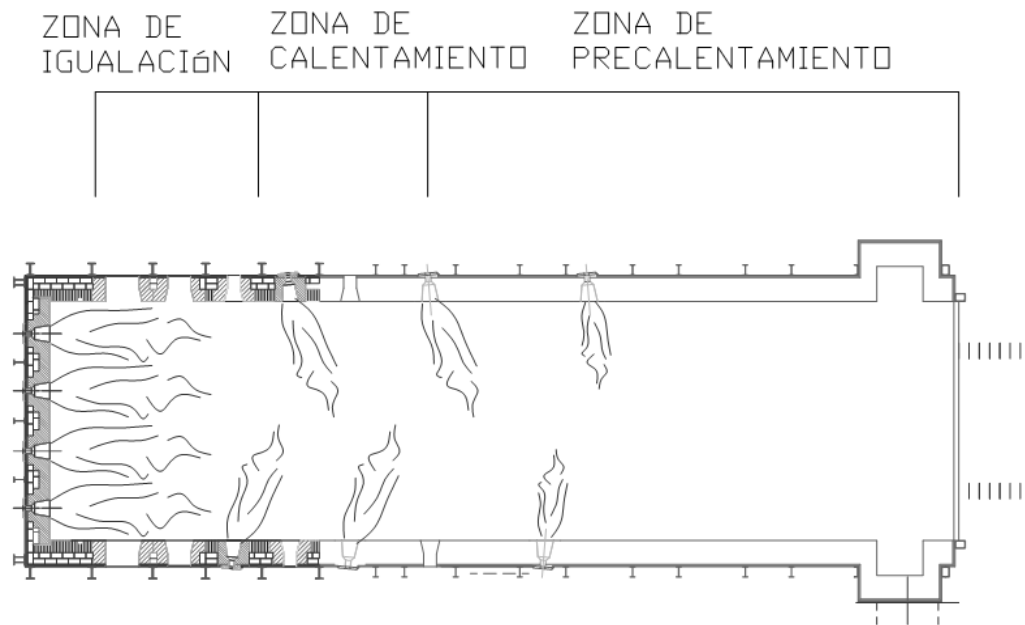
Los gases son extraídos del horno mediante un ventilador de tiro forzado que dirige los gases hacia la chimenea, gracias a una presión negativa que se crea dentro del horno. Sin embargo antes de desechar los gases por la chimenea pasan por un intercambiador de calor donde ceden calor al aire que está ingresando para la combustión.

1.3.2.1.2. Capacidad del horno

Limón (2004) demuestra que “en las plantas de laminación, para recalentar las palanquillas se utilizan básicamente tres tipos de hornos: de empuje, de vigas galopantes y de fosa. Los dos primeros tipos son continuos, es decir tanto la carga como la descarga se realizan sin interrupción durante la operación de la laminación, salvo que haya alguna demora, o cambio de medida. Los hornos de fosa cada día se emplean menos. Los hornos continuos disponen de tres zonas de aportación de calor: zona de precalentamiento, zona de calentamiento y zona de igualación u homogeneización”.

- Zona de precalentamiento, donde el material que entra es calentado hasta una temperatura de unos 1000 °C. El calentamiento se realiza básicamente por convección.
- Zona de calentamiento, aquí, la superficie de la palanquilla se lleva hasta una temperatura de unos 1250 °C, para el acero común.
- Zona de igualación o de empape, se alcanza, en la palanquilla, que la diferencia de temperatura del punto más caliente con respecto al punto más frío comprenda entre 20 y 50 °C de forma que no se presenten problemas en la calidad final del producto y en el tren de laminación. En las dos últimas zonas la transferencia de calor se realiza básicamente por radiación, ver figura 12.

Figura 12. **Ubicación de zonas de calentamiento**



Fuente: Arenas, 2010. p. 8

El horno de vigas galopantes presenta como ventaja importante que puede vaciarse al final de alguna jornada. Es aplicable cuando el tren no trabaja las 24 horas. Cuando el horno de empuje trabaja solo uno o dos turnos, el material permanece inactivo durante varias horas dentro del horno a alta temperatura, lo que repercute en una mayor oxidación, con la consiguiente pérdida de material y depósito de cascarilla y la descarburización del acero.

- Diseño de un horno, según la capacidad requerida:

Se necesitan calentar 30 toneladas/hora de acero

Equivalente a 66,138 libras/hora

Para calentar cada libra a 1200° C se necesitan 340 BTU

$66,128 \times 340 = 22,5 \text{ MBTU}$

Con una capacidad calorífica del Bunker de 140,000 BTU/galón.

Tomando en cuenta que la eficiencia del horno es de 50% se necesita el doble de calor dentro del horno

$$(22.487,000 \times 2)/140,000= 321.2 \text{ galones de combustible por hora.}$$

Esta es la cantidad de bunker estimada para el funcionamiento del horno a la capacidad requerida.

De los datos de las propiedades del acero se obtienen los siguientes datos, ver tabla VI:

Tabla VI. **Peso de una palanquilla**

Ancho palanquilla (m)	Volumen (m³)	Densidad del acero (kg/m³)	Peso por palanquilla (kg)
0.12	0.0576	7850	452.16

Fuente: elaboración propia.

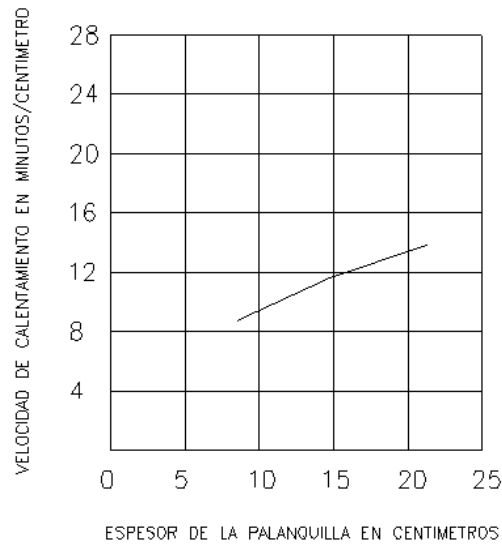
Las 30 toneladas/hora convertidas a palanquillas/hora

Cantidad de palanquillas/hora: 66

- Tiempo de la palanquilla dentro del horno:

Siguiendo la siguiente grafica se puede observar la velocidad de calentamiento que se necesita para calentar una palanquilla, ver figura 13.

Figura 13. **Tiempo de calentamiento en hornos de empuje**



Fuente: Limón, 2004. p. 8

Utilizando datos aproximados tomados de la gráfica se puede decir que:

Si el espesor de la palanquilla es de 12 cm la velocidad de calentamiento será de 10.7min/cm para un tiempo de calentamiento de 128.4min.

Tiempo de calentamiento en h será de 10.7min/cm para un tiempo de calentamiento de 128.4min.

1.3.3. Tren de laminación

(Limón, 2004) sostiene que “un castillo para laminar está compuesto de varios, o por lo menos dos, rodillos o cilindros, los cuales están apoyados en cojinetes o chumaceras en sus extremos. La parte del rodillo situada entre las chumaceras se denomina “tabla”, mientras que la parte que gira en las chumaceras se denomina “cuello”, el rodillo gira mediante un acoplamiento al

reductor. La distancia normal o media entre los centros de los rodillos determina el tamaño del castillo. Los trenes están formados por varios castillos y se clasifican de acuerdo con los productos que laminan, ver figura 14 y 15. Los tipos de trenes son: continuos, *cross – country*, de ondas, tríos y dúos reversibles”.

Figura 14. **Castillo de laminación trío**



Fuente: Indesa, 2014.

1.3.3.1 Castillos de laminación

(Limón, 2004) Un tren para laminar está compuesto de varios, o por lo menos dos, rodillos o cilindros, los cuales están apoyados en cojinetes o chumaceras en sus extremos. La parte del rodillo situada entre las chumaceras se denomina “tabla”, mientras que la parte que gira en las chumaceras se denomina “cuello”, el rodillo gira mediante un acoplamiento al reductor.

La distancia normal o media entre los centros de los rodillos determina el tamaño del tren. Así, un tren que tiene 305 milímetros entre centros de rodillos, es un tren de 305 milímetros. (Normalmente se le conoce como tren de 12 pulgadas) También el tamaño del tren se puede expresar en otras magnitudes tales como el diámetro de los piñones que conducen al tren. Así en el ejemplo mencionado el diámetro de los piñones que conducen al tren es de 305 milímetros.

Figura 15. **Castillo de laminación dúo**



Fuente: Germaksan, 2015.

1.3.3.2 Rodillos de laminación

Los rodillos de laminación son cuerpos cilíndricos de fundición nodular, a través de los cuales el acero es laminado, ver figura 16. Para ello deben de estar maquinados en su periferia con el perfil del producto que se desea laminar, dicho perfil es llamado calibre.

Figura 16. **Rodillos de laminación nuevos**



Fuente: www.tradekorea.com, 2015.

Los rodillos de laminación son el elemento final de laminado en el tren de laminación, ver figura 17, ya que reciben el esfuerzo de torsión a través de transmisiones, de cardan en muchos casos, las cuales a su vez están conectadas a una caja potencial y esta última es alimentada por una caja de engranajes reductora que recibe el movimiento de rotación de un motor eléctrico de gran capacidad.

Figura 17. **Rodillo de laminación calibrado**



Fuente: www.smroll.com, 2015.

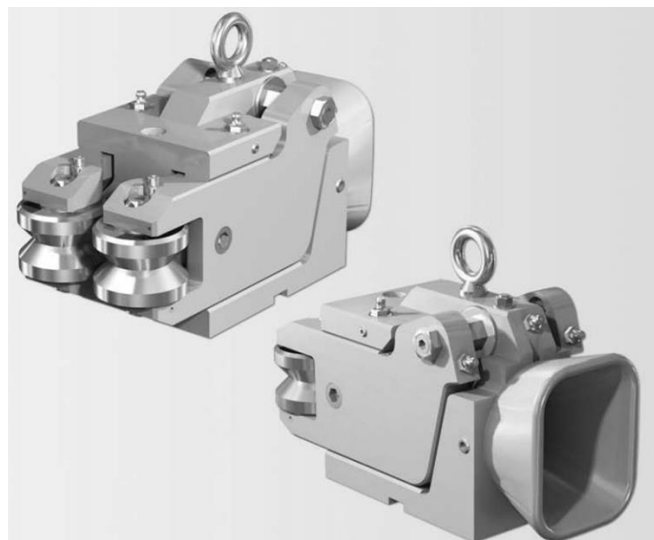
Durante el proceso de laminado el calibre en uso en el rodillo laminador sufre desgaste, además de un calentamiento excesivo. Ambas situaciones son controladas a través de un sistema de refrigeración. El sistema permite mantener

un caudal y presión de agua adecuado sobre el calibre. La presión y el caudal varían de acuerdo a la etapa del proceso, si los rodillos trabajan en el área de desbaste, preparadores o acabadores.

1.3.3.3. Accesorios

(Limón, 2004) sostiene que “la aplicación más común de las guías de rodajas es para guiar óvalos, aunque es importante saber qué es lo que se obtendrá como producto después de la caja de rodajas, de tal manera que para un redondo o cuadrado como pases intermedios se usa la rodaja tipo diábolo y para un redondo acabador o un cuadrado acabador se usan rodajas con la forma del calibre preparador. También se usan rodajas planas para guiar material que procede de pases caja, y se obtienen cuadrados o redondos con tolerancias muy grandes.

Figura 18. **Guías de entrada**

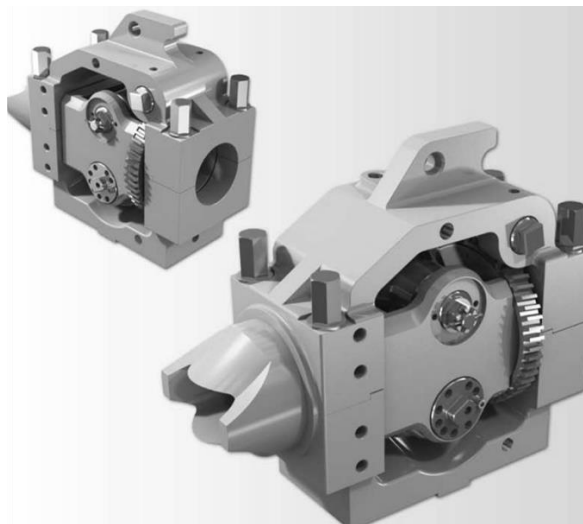


Fuente: Hollteck, 2013. p. 5

Las guías de entrada ayudan a que el perfil laminado de acero pueda ingresar al centro del calibre en la posición adecuada, ver figura 18. Se logra a través de un conjunto de rodos y fundiciones que posicionan el perfil de acero.

Se utilizan cajas de torsión, para girar una cantidad exacta de grados un perfil laminado, ver figura 19. Las cajas permiten girar la figura laminada una cantidad específica de grados a través de un sistema de torsión compuesto por rodos en el interior de la guía de torsión. Las guías se sujetan a la barra de entrada o salida del castillo, ver figura 20.

Figura 19. **Guías de salida con torsión**



Fuente: Hollteck, 2013. p. 29

Figura 20. **Sujeción a la barra de una guía de entrada**



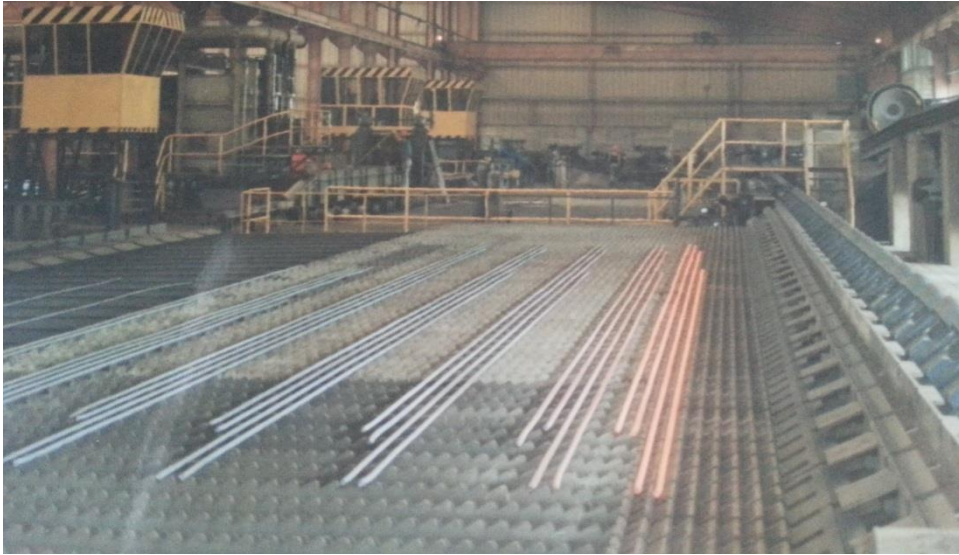
Fuente: elaboración propia.

1.3.4. Cama de enfriamiento

(ILAFA, 1983) El lecho de enfriamiento consta de una mesa transportadora de rodillos equipada con zapatas de freno, un sistema tipo parrilla excéntrico doble y un sistema de árbol de arrastre.

Las barras son tomadas desde la mesa de rodillos por las zapatas de freno donde su velocidad es desacelerada por fricción antes de ser transferidas al transportador tipo rejilla, el que opera con la modalidad partida – detención, ver figura 21.

Figura 21. **Cama de enfriamiento**

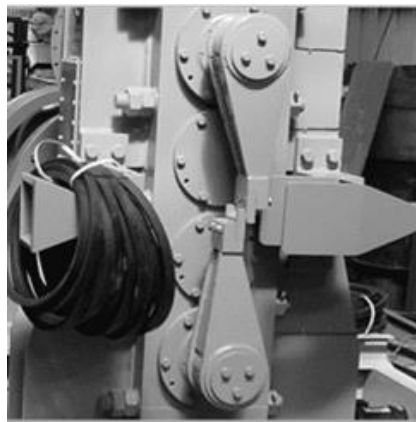


Fuente: Indesa, 2014.

1.3.4.1. Corte en caliente

(ILAFA, 1983) La barra que sale de la caja acabadora se corta con las cizallas rotatorias a largos adecuados al del lecho de enfriamiento, ver figura 22.

Figura 22. **Cizalla voladora**



Fuente: www.rolling-mill.co, 2013.

1.3.4.2. Canaleta revolver

Refrigerada en agua para evitar deformaciones durante la rodadura. Los canales de tipo C son suspendidos de una estructura longitudinal. Los canales cerrado tipo C aseguran que las barras no salgan y mantienen la seguridad del personal. La apertura y cierre de los canales es por medio de un eje – leva y rodillos seguidores. El mecanismo de canaleta revolver está provisto a lo largo de toda la longitud de la cama de enfriamiento. La siguiente ilustración ejemplifica la canaleta revolver, ver figura 23.

Figura 23. **Canaleta revolver**



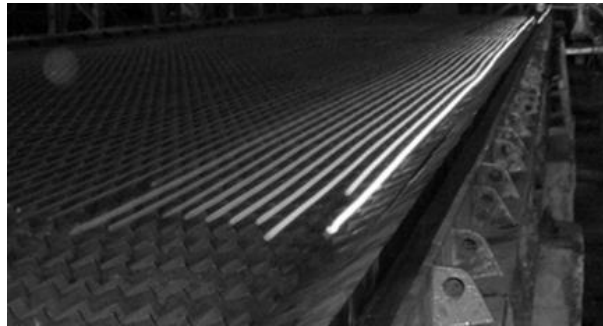
Fuente: www.pprollingmills.com, 2013.

1.3.4.3. Enfriamiento de la varilla

El objetivo de un diseño de la cama de enfriamiento es el de refrigerar por aire uniformemente las barras, y transportar las mismas en forma gradual desde la entrada de la cama de enfriamiento a la descarga lateral. El mecanismo garantiza que las barras están colocadas uniformemente sobre los peines dentados. La cama de enfriamiento se ha diseñado teniendo en cuenta el menor

y el mayor tamaño de las barras que están siendo laminadas y entregadas por parte del laminador de la planta y el tiempo de enfriamiento requerido para los diferentes tamaños de barra diseñados, ver figura 24.

Figura 24. **Enfriamiento de varilla**



Fuente: www.strabla.com, 2014.

1.4. Etapas del proceso de laminación

1.4.1. Calentamiento

(Limón, 2004) sostiene que “en las últimas décadas, los hornos de recalentamiento han experimentado un considerable avance tecnológico, encaminado, en gran parte, a hacer frente a las exigencias crecientes de los molinos de laminación. El avance ha sido posible por la aplicación de los resultados de investigaciones, ensayos y experiencia operativa, así como por el desarrollo de nuevos materiales y equipos”.

El horno de recalentamiento permite que las piezas de acero alcancen las temperaturas de laminación, de una forma segura, homogénea y económica. Sin embargo se busca la manera de llegar a un punto de equilibrio entre las variantes anteriormente mencionadas.

(Limón, 2004) sostiene que “a pesar de que el horno represente, en general, menos del 20 % del valor de una planta de laminación, de él pueden provenir una gran parte de los problemas de tren de laminación; pues muchas veces, una rotura del rodillo de laminación o una dificultad en el guiado puede deberse a una zona fría de la palanquilla. Todo ello ha hecho que el horno haya pasado, en el curso de las últimas décadas, de ser un elemento secundario en la laminación a ser una unidad de suma importancia en las instalaciones modernas.”

1.4.1.1. Adición y distribución de calor

La temperatura que se busca, es que lleve al acero arriba de su punto de recristalización, es el factor más importante en el sistema de control del horno, será el *set point* principal. Si se necesita mayor temperatura, requerirá al sistema mayor combustible lo cual hará trabajar a mayor velocidad la bomba de combustible aumentando el caudal, respondiendo al caudal las válvulas de aire se activan dejando pasar mayor flujo de aire hacia los quemadores para obtener una mezcla idónea de combustible – aire, ver figura 25. Para una combustión eficiente, la mezcla de oxígeno contenido en el aire y el carbono contenido en el combustible debe ser la ideal. (Arenas, 2010)

Figura 25. **Salida del lingote del horno**



Fuente: www.nps-tech.com, 2014.

1.4.2. Proceso de laminación

(Calderón, 2001) indica que “la laminación en caliente de aceros comerciales al carbono para la fabricación de redondos corrugados, es un proceso de conformación plástico, que sobre la base de las fuerzas aplicadas al acero cuando se le da la forma requerida, se clasifica como un proceso de compresión directa”.

(Enríquez et al, 2010) “La experiencia enseña que el ensanchamiento es mucho menor que el de aplastamiento. El ensanchamiento no pasa de un 0,3 0,4% del aplastamiento. Es de notar también que durante la laminación en caliente el lingote no se enfría, ya que el trabajo de deformación en la estructura cristalina se convierte en calor”.

La laminación busca producir una deformación perdurable en el material inicial, tomando ventaja de la ductilidad del acero, que en estado caliente es alto. Se consigue al pasar el acero a laminar entre dos rodillos que rotan a una velocidad igual y en sentido contrario, los cuales están separados una distancia menor que el espesor del acero de entrada. La presión que hacen los rodillos laminadores sobre el acero resulta en que el espesor disminuya aumentando proporcionalmente, en consecuencia, el largo total del lingote que sale de los rodillos laminadores. (Enríquez et al, 2010)

La temperatura de laminación en caliente de aceros comerciales para la fabricación de redondos corrugados bajo condiciones de constancia práctica es de 1150° C a 1220°C.

A una temperatura superior, constituyente un grave problema las relaciones del acero comercial con la atmósfera. Así, se pierde hasta un 5% en peso del acero por oxidación. En condiciones normales de temperatura, se pierde entre 1.5% y 3% en el peso del acero por oxidación.

Conforme el proceso de laminación en caliente de aceros comerciales para la fabricación de redondos corrugados avanza, la temperatura del mismo disminuye hasta alcanzar su valor más bajo en el último pase de laminación. El valor, en el acero comercial, no debe ser inferior a 850° C para que la recristalización sea rápida y pueda desaparecer el endurecimiento por deformación plástica durante el tiempo que se mantiene dicha temperatura.”

1.4.2.1. Reducción de la palanquilla

La palanquilla tiene un perfil cuadrado, con bordes redondeados. Es el punto de partida para su reducción transversal. Al inicio del proceso de laminación se encuentran el desbaste, consiste en reducir en porcentajes de hasta 35% el área transversal de cada figura. En esta área se encuentran los castillos más robustos, que en algunos casos se reducen a solo un castillo.

El área continua al desbaste es el área de preparadores. En esta área del proceso se alcanzan velocidades de hasta 3m/s y ya se han llevado a cabo hasta 6 pases de laminación. La palanquilla ha sido reducida hasta menos de un 25% de su área transversal original. Además debido a los defectos presentados en la punta de la palanquilla, se efectúan cortes de punta y cola en el lingote, repitiéndose el proceso de despunte cuantas veces sea necesario.

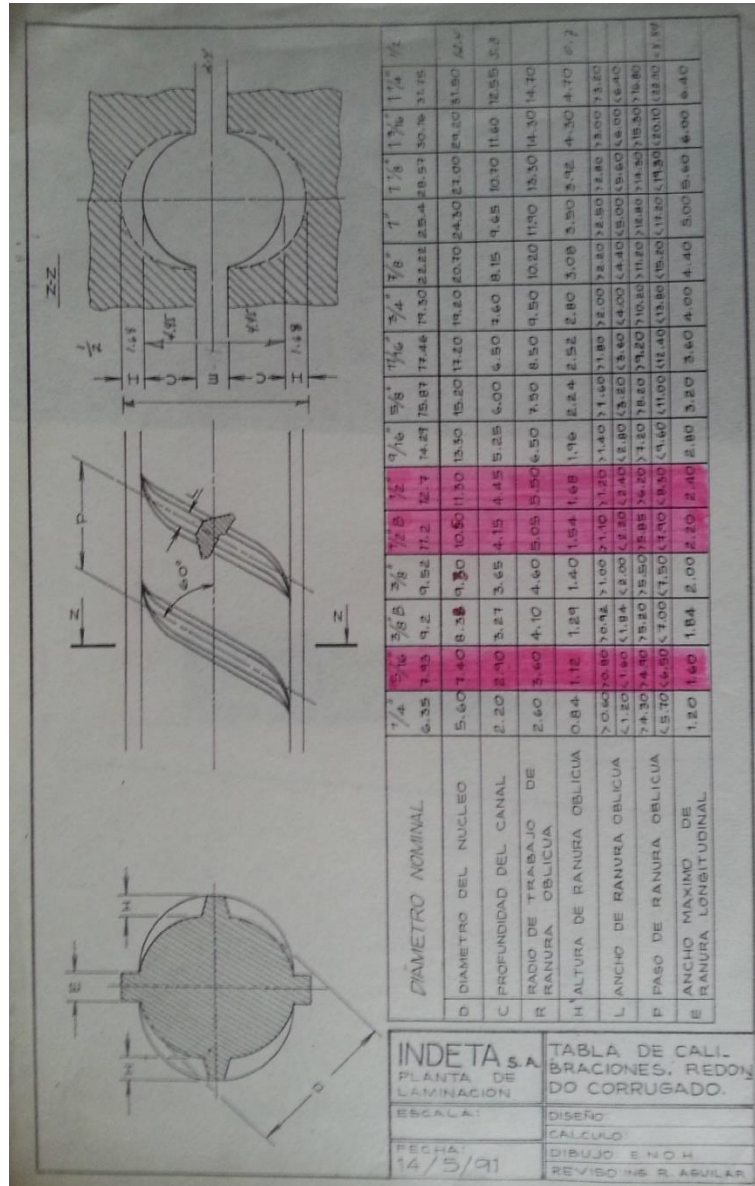
En la etapa final del proceso se encuentran los acabadores, los que dan la forma final al acero a una velocidad cada vez mayor.

1.4.2.2. Figuras de laminación

En la fabricación de varilla de acero corrugado, se emplea con frecuencia la secuencia de cuadro ovalo y ovalo cuadro. La frecuencia permite aumentar el porcentaje de reducción en cada pase con un menor esfuerzo de los equipos mecánicos y eléctricos.

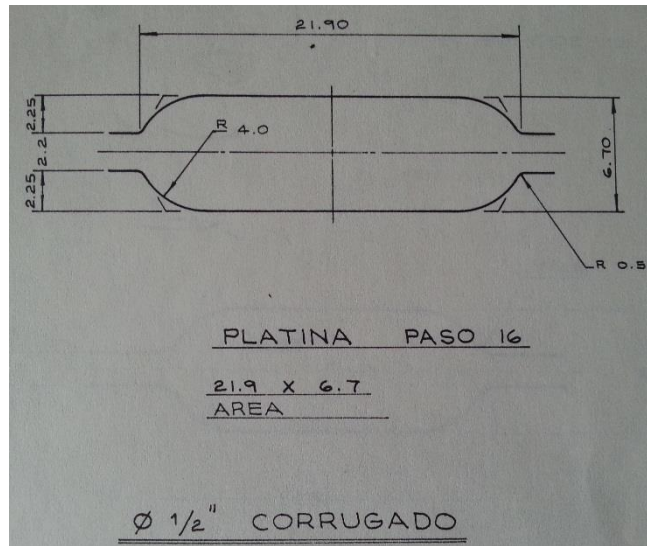
(Indesa, 2014) desarrollo varias secuencias del tipo ovalo-platina y ovalo-platina-redondo, obteniendo altos rendimientos en el proceso. En las figuras 26, 27 y 28 se presentan algunas de las secuencias.

Figura 26. Secuencia de calibración para producción de varilla de acero corrugado en diferentes medidas



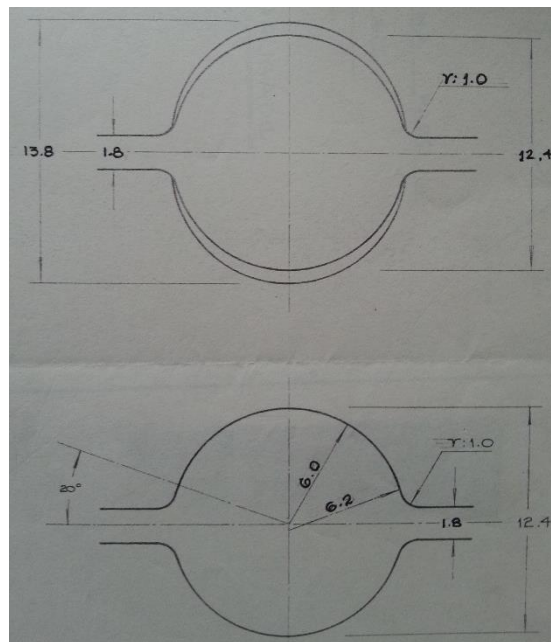
Fuente: Indesa, 2014

Figura 27. Penúltimo pase para corrugado de 1/2"



Fuente: Indesa, 2014.

Figura 28. Acabador para corrugado de 1/2"



Fuente: Indesa, 2014.

1.4.3. Varilla de acero corrugado

Según la norma guatemalteca obligatoria (COGUANOR NGO 36 011, 2005), basada en la ASTM 615, establece que: “barra de acero corrugada: es la que tiene forma cilíndrica con corrugaciones en su superficie” En la norma se encuentran la definiciones de: corrugaciones, clasificación, tolerancias de fabricación, longitud de las barras, espaciamiento entre corrugaciones, longitud de cada corrugación, tolerancia permitida en la masa unitaria, límite de fluencia, resistencia a la tensión, elongación, prueba de doblado y, peso por unidad de longitud dependiendo de su diámetro.

Las definiciones son de vital importancia para determinar la calidad del producto final.

1.4.3.1. Clasificación

La clasificación de las varillas de acero corrugado puede estar dada por sus dimensiones o por su resistencia a la tensión.

De acuerdo a sus dimensiones las varillas se clasifican en varillas No. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14. La clasificación corresponde a la cantidad de 1/8” en su diámetro, por ejemplo la varilla No. 8 equivale a una varilla de 1” de diámetro.

La clasificación de acuerdo a su resistencia a la tensión, se establece en 3 rangos, grados: 40, 60 y 70; siendo más comunes los primeros dos. En la clasificación se estandariza que una varilla podrá soportar no menos de 40,000 psi para el grado 40 y 60,000 psi para el grado 60, según corresponda, en un

ensayo de tensión. Es una de las propiedades mecánicas que debe de tener muy bien definida una varilla de acero corrugado.

1.4.3.1. Características

Las varillas de acero corrugado tienen propiedades físicas y mecánicas, las propiedades físicas corresponden a factores como: forma, altura de corruga, separación de corruga, presentación, entre otros. Las propiedades mecánicas corresponden a: resistencia a la tensión, elongación, esfuerzo máximo, entre otros.

Existen límites para cada una de las propiedades físicas y mecánicas de una varilla de acero corrugado, para nuestro país la norma que contiene los límites es la norma COGUANOR NGO 36 011. La norma guatemalteca indica bajo qué condiciones una varilla es clasificada como de primera o segunda clase, de acuerdo a los resultados obtenidos por las diferentes pruebas de laboratorio. Debido a ello el proceso de laminación debe sujetarse a cumplir con las demandas de calidad establecidas para ser un producto de primera en el mercado.

(Aguilar, 1999) propone que debido a las características sísmicas de la región centroamericana debe de adoptarse la norma ASTM 706 o crear una equivalente, previendo en parte los efectos de la actividad sísmica.

1.4.4. Enfriamiento, corte y empaque

1.4.4.1. Distribución del proceso

- **Enfriamiento**

Después del último pase de laminación en caliente que se realiza a temperatura que garantiza la recristalización (Aguilar, 2012), la etapa del proceso, inicia en la cama de enfriamiento donde las varillas son depositadas como producto terminado y en longitudes menores al largo total de la cama. La cama de enfriamiento esta provista de un sistema electrónico que permite realizar el conteo de varillas que asegura la totalidad de unidades que conforman una agrupación. Luego, las varillas son transferidas mediante un transportador hacia otra tijera.

- **Empaque y amarre**

“La última cizalla se encarga de realizar el corte final de las varillas a la medida que necesita el cliente final y respetando las tolerancias establecidas para los cortes según las normas que regulan el producto.

Después de ser agrupado, el atado, es emparejado para evitar varillas salientes y a continuación se realiza el amarre.

Después de la revisión del Inspector de Control de Calidad, se le coloca una tarjeta de identificación, donde se describen las información básica el producto como: el diámetro, la especificación y grado del material, número de colada y turno en el cual fue laminado, longitud de las varillas y la cantidad de varillas que contiene” (Añez, De Orue, Kerdel, Lacoa y Valsecchi 2010).

1.5. Métodos de control de los factores básicos del proceso de laminación

1.5.1. Método de control del horno de recalentamiento

(Limón, 2004) “El tiempo de calentamiento de una palanquilla, es el tiempo en minutos en el que la palanquilla llega a su temperatura de laminación (1200 grados centígrados aproximadamente). El tiempo total de calentamiento depende del espesor y del número de caras a calentar. El tiempo específico de calentamiento o velocidad de calentamiento, en hornos de empuje y con aceros normales, se refiere al tiempo de avance de la temperatura por centímetro de espesor de la palanquilla a calentar.

Tiempo total de calentamiento = $V \times e$

V=Velocidad de calentamiento en minutos por centímetro

e= Espesor de la palanquilla en centímetros”

1.5.1.1. Control de la combustión

(Arenas, 2010) La implicación que se debe tomar en cuenta es la alta temperatura a la que trabaja el horno, llega a ser de 1450°C, la cual se mide con termopares.

Mediante la medición indirecta del combustible, contando las vueltas que da la bomba al suministrar hacia los quemadores, así el único sensor de presión que brinda retroalimentación de que el combustible está siendo suministrado de manera correcta hacia los quemadores. El aire de combustión tiene la característica de mantener una presión en el rango de las OSI (onzas por pulgada cuadrada), al salir de los intercambiadores de calor lleva una temperatura de los 400° centígrados. (Arenas, 2010)

1.5.2. Control del tren de laminación

(Limón, 2004) define que “la masa de la barra no cambia cuando se lamina, o sea que durante el proceso de laminación no se crea ni se destruye material. De lo anterior se deduce que: el volumen de la barra tampoco varía durante el proceso”.

$$\text{Volumen} = \text{área} \times \text{longitud}$$

En cualquier calibre, el GASTO o FLUJO de acero permanece constante durante el proceso de la laminación.

$$\text{Gasto} = \text{área} \times \text{velocidad}$$

- Principio de conservación de masa

Durante el proceso de laminado, en cualquier pase, la masa de la barra es igual antes y después de ser laminada.

Hay una porción muy pequeña de la superficie exterior del material que se transforma, convirtiéndose en una cascarilla, o sea una escoria fina. En la formación de la cascarilla también influye la salpicadura del agua de enfriamiento sobre la superficie del acero.

Las causas principales de pérdida de masa durante la laminación son:

- En el horno de recalentamiento la formación de escoria depende de los tiempos de calentamiento y de empapado; de la cantidad de oxígeno libre presente en la atmósfera del horno y de la destreza del hornero.

- Durante el laminado.
- Por la formación de “escoria secundaria” o “cascarilla” debido al contacto del oxígeno en el aire y en el agua de enfriamiento con la superficie caliente de la barra.
- Por los cortes de punta o cola de la barra.
- Por atorones.
- Por rechazos debido a productos fuera de especificaciones.
- Por tramos cortos y puntas de tijera de corte en frío.
- La relación existente entre la masa de la palanquilla antes de recalentarse y la masa del producto terminado se le denomina “rendimiento metálico”

1.5.2.1. Secuencia de trabajo en el molino

- Principio de conservación de volumen

En un pase dado, el volumen de la barra antes de ser laminada es igual al volumen de la barra después de ser laminada. Esto es teóricamente.

La conservación del volumen se expresa en la ecuación siguiente:

Volumen de entrada = Volumen de salida

O

Área de entrada X Largo de entrada = Área de salida x Largo de salida

Mediante la utilización de la ecuación, se puede conocer la longitud del acero en cualquier pase del molino, siempre que se conozca el área de dicho pase y el área de entrada.

- Principio de conservación del gasto.

En cualquier calibre, el volumen de acero laminado por unidad de tiempo, permanece constante durante el proceso.

El gasto es el volumen por unidad de tiempo, y puede expresarse como sigue:

$$\text{Gasto} = \text{Área} \times \text{Velocidad} \text{ (mm}^2 \times \text{mm/seg} = \text{mm}^3\text{/seg)}$$

1.5.3. Defectos de la laminación

(Limón, 2004) define varios de los defectos de laminación de la siguiente manera:

- Traslape.

El traslape es un defecto originado por un sobrellenado o “bigote” en algún paso del proceso, o por alguna raya o marca profunda, la cual al laminarse se dobla. Por lo cual puede ser sencillo, doble o múltiple, dependiendo de los problemas que se tengan durante el proceso. El defecto consiste en una rajadura o una línea que se observa en la periferia del material, y que vista transversalmente casi nunca llega al centro, sino más bien tiende a ser en forma de espiral.

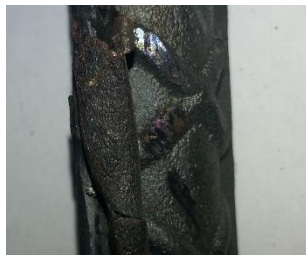
El traslape casi siempre se observa a simple vista, y su dimensión es uniforme. Siempre es longitudinal al laminado, ver figura 29.

El sobrellenado o “bigote” tiene su origen en malos ajustes de calibración en el tren, reducciones de área muy severas, pases vacíos a causa de un diseño de pases incorrectos, desgaste o montaje incorrecto de las guías, así como desgastes exagerados y heterogéneos en los calibres de los rodillos de laminación.

Algunas otras causas por las cuales es posible llegar a tener traslapes son: Notables diferencias de temperatura a lo largo de una misma barra que origina variaciones en el ensanchamiento, así como defectos en las palanquillas como rechupes, segregaciones, inclusiones de materiales extraños, etc.

Los traslapes son muy perjudiciales en los productos terminados, en ocasiones es difícil distinguir el traslape de otros defectos superficiales, pero generalmente ayuda tener en cuenta sus peculiaridades típicas que son su distribución uniforme en la periferia del material o líneas paralelas. La manera de detectar donde se está produciendo el traslape es revisando con madera el material durante el laminado para localizar los sobrellenados, y tomar las medidas necesarias ya sea recalibrar el molino, ajustar o cambiar las guías o corregir la temperatura de la palanquilla.

Figura 29. **Traslape**



Fuente: elaboración propia.

- Sobrellenado

Un sobrellenado puede ser laminado en las pasadas siguientes a aquella en que se ha originado sin daño para la barra, mientras que en el caso de una rebaba no sucede, ver figura 30.

El sobrellenado es aplastado dentro de la sección en el canal sin producir pliegues, mientras que las rebabas formarán pliegues. Las rebabas no soldarán al resto de la sección debido a la delgada película de óxido que las recubre y que impide el contacto directo del metal de las rebabas con el metal de la sección. (Calderón, 2001)

Figura 30. **Sobrellenado**



Fuente: elaboración propia.

- Pase quemado

Las marcas por pase quemado consisten en elevaciones transversales de apariencia similar a telarañas que se presentan simétricamente a lo largo de la barra, y se originan por grietas generalmente térmicas de los rodillos.

Las grietas en los rodillos se originan por enfriamientos defectuosos de los calibres, por falla del material de los rodillos, o por uso excesivo de los calibres. Comparar figuras 31 y 32.

Figura 31. **Superficie laminada con calibre o pase nuevo**



Fuente: elaboración propia.

En las barras acabadas se encuentran grietas longitudinales. Las grietas profundas provienen de pliegues producidos en las primeras pasadas o de acero ya agrietado superficialmente en su estado de lingote. Existe una gran tendencia de las paredes laterales a arrugarse, siendo la tendencia aún mayor si las esquinas del cuadrado son agudas. (Calderón, 2001)

Figura 32. **Superficie laminada con calibre o pase quemado**



Fuente: elaboración propia.

- Laminaciones

Cuando se lamina, se reduce el espesor de un lingote que tiene inclusiones no metálicas, las discontinuidades se van aplastando siguiendo la dirección del laminado. Lo mismo sucede con los poros y rechupes o defectos similares. El aplastamiento o adelgazamiento de las discontinuidades se le denomina laminaciones. (NDT elearning, 2013).

Es frecuente confundir las laminaciones con escama laminada cuando son muy pequeñas, o con traslapes cuando estas son grandes, ver figura 33.

Figura 33. **Laminaciones**



Fuente: elaboración propia.

- **Descarburación superficial**

La descarburación es una pérdida del carbono componente del acero, que se observa en la superficie del producto terminado, consiste en un decremento progresivo del contenido de carbono superficial.

Cuando el acero es calentado por periodos muy largos a alta temperatura, o si se tienen reacciones químicas entre la atmósfera del horno y el acero, es cuando se tienen pérdidas superficiales de carbono, que persisten hasta el producto terminado.

La pérdida de carbono está en función directa con el oxígeno de la atmósfera del horno, la temperatura y el tiempo de calentamiento.

Las características del defecto son únicas y pueden descubrirse a simple vista en una sección transversal del material. La profundidad de la descarburación superficial solo se puede determinar mediante el microscopio y/o análisis químicos. (Limón, 2004)

1.6. Metodología de producción de varilla de acero corrugado

1.6.1. Método de calibración del molino

(Calderón, 2001) indica que “el objeto fundamental del diseñador de una secuencia de laminación es trabajar con las mayores revoluciones posibles, ya que grandes reducciones implican pocas pasadas en laminación. Por ello se detallan los factores que determinan la reducción máxima posible en un pase de laminación”.

1.6.1.1 Principios de calibración

(Gomez y Soto, 1987) “se denomina calibración de un perfil al sistema de calibres colocados sucesivamente que garantiza la obtención de un producto terminado con las dimensiones dadas. El concepto calibración incluye el método, con la ayuda del cual se determinan la forma y dimensiones de las secciones del metal laminado. También se denomina calibración a las reglas de colocación de los calibres en los cilindros, de manera que garanticen la entrada y salida del metal y también la suficiente solidez de los cilindros. Una calibración correcta debe garantizar lo siguiente:

- Obtención del perfil con una superficie limpia, en correspondencia con las dimensiones dadas.
- Pérdidas mínimas de energías, desgastes mínimos de menor pérdida de cilindros y tiempo de laminación.
- Tensiones internas mínimas en el perfil determinado (cuando no se puedan eliminar del todo)

- Un trabajo más simple y cómodo en el laminador, que permita en gran medida, mecanizar y automatizar todo el proceso de laminación y eliminar la utilización del trabajo manual.
- La creación de un montaje más racional de los calibres en los cilindros, que garanticen la laminación de todo el surtido con el mínimo de pérdidas de tiempo en cambios de calibre y ajustes del tren”.

En un metal laminado de gran longitud, es imposible garantizar la constancia de las dimensiones a lo largo de todo su eje longitudinal. Es así que se ha establecido las tolerancias para las dimensiones de cada perfil que permita laminar con calidad en condiciones ininterrumpidamente variables. (Gomez y Soto, 1987)

La resistencia de un tren (resistencia ofrecida por el tren a la torsión) es de importancia para determinar la resistencia a la torsión de los cilindros, trefles, acoplamientos o mangas, arbolillos y piñones y para determinar la capacidad del motor que se necesita para laminar una sección dada en un tren determinado. Cuando se ha de laminar una sección nueva mayor, el diseñador de cilindros se encuentra con el problema de investigar la resistencia de las partes de la transmisión mencionadas anteriormente y decidir si el motor puede suministrar la suficiente potencia para laminar la nueva sección. Cuando surge el problema se presume que ya se ha investigado sobre la resistencia de los cilindros a la flexión. (Wusatowski, 1969)

El desgaste de los cilindros de laminación es un factor muy importante a considerar, ya que las grandes reducciones tienen grandes áreas de contacto, lo cual produce una mayor razón de desgaste a los cilindros de laminación. El efecto se acentúa en las canales preparadoras y en las acabadoras.

Un factor muy importante es la deformación del acero, la cual está ligada a la temperatura de laminación y a la composición química del acero.

Otro factor a cuidar, en la reducción excesiva, es el ensanchamiento excesivo.

Los factores señalados inciden en el diseño de la secuencia de pases y las características geométricas de los mismos, que deben ser tomadas en cuenta por el diseñador, en la ingeniería del proceso.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Hipótesis

- Si la falta de controles en el proceso de producción y la ausencia de aplicación de los procedimientos establecidos causan modos de fallo que implican paros de producción, entonces la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación será reducida.

2.2. Variables

- Variables independientes:
 - Controles en el proceso de producción.

Conceptual: medición, estandarización, evaluación y verificación del funcionamiento correcto de los equipos que forman parte del proceso de laminación.

Operacional: hoja de vida de equipo, manual del fabricante y listado de verificación de funcionamiento.
 - Procedimientos establecidos.

Conceptual: medición, estandarización, evaluación y verificación de cada etapa a la que es sometida el acero al ser laminado hasta convertirse en varilla de acero corrugado.

Operacional: muestreo del proceso en sus diferentes etapas. Comparación de resultados con estándares. Listado de verificación de propiedades físicas, mecánicas y químicas del producto final. Norma COGUANOR NGO 36 011.

- Variables dependientes:

- Eficiencia.

Conceptual: la capacidad de alcanzar un objetivo fijado con anterioridad en el menor tiempo posible y con el mínimo uso posible de recursos.

Operacional: control de resultados de producción. Tiempo de paro total de producción donde había una meta establecida y por cumplir en un lapso de tiempo específico.

- Variables intervinientes:

- Paro de producción no programado.

Conceptual: se refiere a la paralización total del proceso de producción. Cuando es detenida la fabricación del producto final en la cual se pierden recursos destinados a obtener un producto específico.

Operacional: ausencia de fabricación de productos finales durante un tiempo de producción.

2.3. Enfoque y tipo de investigación

La investigación tiene un enfoque no experimental ya que se analizan las variables sin manipulación alguna con la finalidad de responder las preguntas de investigación y verificar la veracidad de la hipótesis planteada; dicha hipótesis es de enfoque causal ya que las variables independientes están relacionadas de tal manera con la variable dependiente que la afecta considerablemente.

La investigación tiene un diseño longitudinal de tendencia. Los diseños longitudinales analizan los cambios en el tiempo de las variables o las relaciones entre sí. Para la investigación es necesario analizar los cambios en el tiempo de los diferentes modos de fallo que causan paros de producción. Los diseños de tendencia además de analizar los cambios en el tiempo de las variables, también lo hacen dentro de una población en general.

El estudio de investigación incluye características cualitativas y cuantitativas, ya que la obtención de información proporciona datos contables que son la base para la estratificación de los mismos para luego analizar a profundidad cualitativamente, por lo que se presenta el método mixto como método de investigación en el desarrollo de la investigación.

Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos (Hernández, 2008).

2.4. Definición de población y muestra

La principal causa de reducción de eficiencia en un proceso de laminación es consecuencia del tiempo destinado a la producción en el que no se produce, paros no programados; la cual viene a ser la población de estudio.

Para la investigación toda la población debe ser analizada mediante agrupaciones, estratificación, que permita someter la población a otro análisis que identifique problemas de fondo. Las causas de los problemas vitales determinaran los factores que reducen la eficiencia del proceso.

2.5. Estadística

Como medio estadístico de análisis, mejora y control de calidad se utilizó la estratificación, con ello se clasifico los datos disponibles en grupos de acuerdo a características similares entre ellos llamados estratos. Cada estrato se defino en relación la ubicación del problema y las causas que ocasionaron el mismo. La herramienta permitió comparar las características de cada estrato y fue la base para otra herramienta de control de calidad, el análisis de Pareto.

2.6. Técnica de recolección de datos

Se registró mediante formatos, los paros de producción, se identificaron diferentes variables del paro de producción como: fecha, hora, turno, ubicación, problema, tiempo de prolongación del paro. Dicha información fue tabulada en una hoja de Excel para poder ser agrupada en estratos posteriormente.

2.7. Validación

La validación de la información debe hacerse para corroborar que los resultados obtenidos reflejan la realidad de la investigación y mostrar la veracidad de la misma.

Se empleó validación interna y externa. La validación interna buscaba comprobar que los factores del proceso tienen incidencia en el producto final y que los mismos determinan en gran manera los resultados obtenidos. La validación externa estableció el correlativo entre la información bibliográfica y la práctica de la misma.

2.8. Fuentes de información

Las fuentes de información que fueron utilizadas se debieron al análisis de la literatura existente en nuestra universidad, como revistas profesionales, manuales, libros de texto proporcionados por el asesor, documentos de internet así como material documentado por profesionales sobre el proceso bajo estudio.

Las fuentes de información fueron determinantes, ya que existe información del proceso de laminación que queda solo a disposición de los fabricantes de máquinas por lo que el análisis detallado de cada una de las fuentes proporciona una cantidad y calidad de información suficiente para desarrollar el trabajo de graduación.

2.9. Técnicas de análisis de información

Mediante el diseño no experimental se analizaron factores dentro del proceso de laminación que produjeron modos de fallo que implican paros no programados de producción, los paros no programados redujeron el tiempo destinado a la producción lo cual redujo directamente la eficiencia del proceso productivo, dicho análisis se realizó durante un determinado periodo de tiempo, 6 meses, durante los cuales se relacionaron las variables independientes (factores) y las variables intervinientes (paros de producción no programados), que afectan directamente la variable dependiente, eficiencia.

Mediante un análisis de estratificación se analizan los modos de fallo que ocasionaron los paros de producción agrupándolos de acuerdo a los equipos o maquinas donde sucedió la falla y la posible causa que originó el problema. Con la agrupación de cada una las fallas se introduce un análisis grafico de Pareto el cual permite “escoger un proyecto que pueda alcanzar la mejora más grande con el menor esfuerzo” (Gutiérrez, 2010).

Se aprovechará una de las particularidades del análisis modal de fallas y efectos, AMFE, la cual consiste en focalizar esfuerzos de mejora para erradicar las causa con mayor probabilidad de gravedad de fallo, ocurrencia y no detección. A través de la herramienta se analizarán los problemas vitales encontrados en el diagrama de Pareto ya que no es posible solucionar todos los problemas al mismo tiempo. Es así que se determinan los factores principales que reducen la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado en los trenes de laminación.

3. RECURSOS NECESARIOS

Los medios para la ejecución del trabajo de graduación permiten al investigador alcanzar sus objetivos y comprobar la hipótesis planteada. Dentro de los recursos necesarios es imprescindible el factor humano, los recursos físicos y los financieros, todos en conjunto permiten obtener información certera para concluir la investigación de una manera coherente y concisa.

Es necesario contar con una planta de laminación, dicha planta debe procesar palanquilla o lingote. La planta de laminación debe contar con un área de almacenamiento de palanquilla y corte de lingote.

Una parte esencial es el horno de laminación, debe tener como mínimo la capacidad de contener dentro de sacar lingote a 1150°C de temperatura, trabajando a un ritmo constante o en otras palabras brindado la misma temperatura a lo largo de todo el turno de producción.

El horno debe contar con un equipo de alimentación de combustible, a su vez debe estar provisto de un sistema de calentamiento del combustible. Son indispensables para la operación correcta de la combustión dentro del horno de laminación.

El transporte dentro de la planta de laminación para el acero juega un papel crítico, el cual debe ajustarse al tamaño y características del acero en cada etapa. En la salida del horno de laminación el transporte del acero hacia el molino de laminación y hacia el primer tren de laminación es crucial, debe de contar con un sistema de rodillos que tengan en la superficie formas que aumenten la fricción lo cual es normalmente cubierto con cordones de soldadura. El transporte

seguro hacia el tren de laminación contribuye en la conservación de la temperatura del acero.

Un tren de laminación debe estar formado por un motor eléctrico, una caja reductora, una caja potencial, transmisiones cardánicas, castillo de laminación, rodillos laminadores y cajas o tubos guías en la entrada o salida de los rodillos.

Un tren de laminación permite laminar el acero, lo realiza gracias a los canales o calibres maquinados en los rodillos laminadores y la secuencia establecida entre un tren de laminación y otro.

La capacidad del tren de laminación debe regirse con base a la velocidad y el tamaño de la figura de acero que se laminará. El aumento o disminución de velocidad en el proceso del acero esta limitado primeramente por el sistema eléctrico, el mismo implica la capacidad del motor eléctrico y de los equipos auxiliares que permitan el control.

Las cajas reductoras deben ser capaces de estar a la altura de transmitir la fuerza necesaria hacia la caja potencial reduciendo, normalmente, la velocidad tangencial entregada por el motor eléctrico. La particularidad de la caja de engranajes potencial radica en que solo entra un eje pero proporciona al proceso dos o tres ejes en la salida, es así como se transmite el movimiento a los rodillos laminadores.

Los sistemas de engranajes dentro de las cajas reductoras y potenciales cuentan con un sistema de lubricación para aceite. El sistema debe operar todo el tiempo que las cajas operen, para disminuir la fricción que suscita entre el

contacto de los dientes de un engranaje y otro, previniendo de así el desgaste de los dientes.

El castillo laminador debe ser robusto, capaz de mantener en su posición los rodillos laminadores a pesar de las fuerza a las que están sometidos. Necesitan estar provistos de un sistema de sujeción para los rodillos, un sistema que permita la graduación de la separación entre un rodillo y otro así como la manera de fijar de aditamentos en la salida o entrada del castillo para colocar guías para el acero.

Los rodillos laminadores son los últimos en recibir el movimiento giratorio, para ello los rodillos están fabricados de fundición nodular, la cual es una fundición con mejores propiedades que el hierro fundido. Los rodillos deben tener una dureza determinada, la dureza ayuda a reducir el desgaste que sufren en los canales ya que el contacto es acero con acero y la fricción propicia el desgaste. La dureza va en función de la velocidad de trabajo del rodillo laminador, por lo regular los primeros pases en los trenes de laminación son con velocidad y dureza bajas y aumentan a medida que se llega a los rodillos acabadores.

Los rodillos laminadores deben estar girando gracias al trabajo realizado por los cojinetes que se colocan en los muñones de los rodillos, los cuales permiten soportar las cargas axiales y radiales a las que se somete el rodillo laminador. Los cojinetes más apropiados son los de doble hilera, con valeros de tambor, canasta de bronce y sin sellos.

Los muñones de los rodillos laminadores deben traer consigo un sistema que ayuda a mantener la posición de los cojinetes y asegurar que no sufrirán daño alguno por algún objeto o sustancia extraña, como el agua de la

refrigeración. Los sistemas de sujeción se conocen como cajas chumaceras y deben garantizar una correcta sujeción del rodillo laminador ya sea que sean en la parte inferior o superior del castillo laminador.

Los aditamentos que guían el acero en la entrada o salida del acero de los rodillos laminadores deben contribuir a posicionar correctamente el acero para que sea laminado correctamente, implica colocarlo centrado antes de ingresar al canal laminador y guiarlo hacia el siguiente castillo laminador en la posición adecuada. La sujeción de las guías debe ser fuerte y segura, de lo contrario ocasiona muchos atorones en el proceso de producción.

Existen muchos proveedores de maquinaria y equipos para los trenes de laminación, especialmente para castillos laminadores, rodillos y cajas guías. La mayoría de ellos tienen origen estadounidense, europeo o chino; entre las marcas pueden estar Morgan, Danielli, Pomini, Simac, Ashlow, entre otras. La capacidad de cada equipo viene limitada por su construcción mas que por su fabricante de origen ya que es posible colocar equipos de diferentes proveedores en una misma planta para que trabajen en armonía unos con otros.

El anclaje de los equipos es crucial para la correcta conservación y prolongación de vida útil. El anclaje debe evitar rotundamente cualquier vibración y debe permitir la estabilidad entre la operación de un equipo y otro.

La correlación entre un tren de laminación y otro siguiente o anterior es de vital importancia para transformar el acero de su estado original a su estado final como producto terminado. Algunos factores son importantes para ello, como la velocidad tangencial en los rodillos laminadores, el tipo de figura a laminar, el porcentaje de reducción entre uno y otro castillo y el área que tiene cada figura. Las variables en conjunto hacen del proceso de laminación un proceso continuo

y estable por lo que es de suma importancia atender al calculo de ellos de manera minuciosa.

Es necesario contar con un equipo eléctrico y electrónico capaz de controlar los motores eléctricos y evaluar las condiciones de trabajo para hacer del proceso de laminación un proceso eficiente. Cada motor eléctrico de cada tren de laminación debe tener un driver que debe estar conectado a un plc para monitorear el comportamiento del motor y llevar registro histórico del mismo.

El molino debe contar después de cierto numero de trenes de laminación con cizalla para el despunte, se debe a la deformación de la punta del lingote durante el proceso de laminación, la cual no puede llegar en tales condiciones ya que al ser una reducción muy pequeña se forman pliegues que se convierten en una discontinuidad del material y un paro de producción. Las cizallas deben ser voladoras dimensionadas de acuerdo a la cantidad de acero que cortaran.

El molino debe contar con mecanismos para la acumulación de acero en proceso, llamados formadores de bucles, debido a la continuidad del proceso de producción y la disposición continua entre un tren de laminación y otro laminando al mismo tiempo diferentes cantidades de acero con diferentes velocidades y reducciones.

Es necesario contar con dispositivos de emergencia en el recorrido del acero por el molino. Significa que en caso de que el proceso sea interrumpido el acero deje de ser procesado y no se desperdicie todo en la discontinuidad del proceso. El cometido de ello es aprovechar la propiedad del acero de poder ser reprocesado nuevamente al ser llevado a la temperatura de laminación.

El control de la temperatura dentro del proceso es necesario para tener un proceso estable, la perdida de temperatura en el acero implica un esfuerzo

innecesario en los equipos que puede resultar en el daño parcial o total. El control de la temperatura debe registrar como el acero de un lingote va perdiendo temperatura.

El laminado de acero para varilla de acero corrugado cuenta en el último pase con el rodillo acabador que tiene corrugas que dan la forma final al producto, además tiene la marca de la varilla que incluye la descripción de la medida de varilla producida, la marca de la fabrica y el grado del acero.

El corte de la varilla de acero luego de pasar por el par de rodillos acabadores es una etapa importante y necesaria del proceso. El corte se realiza a la velocidad de trabajo, por lo que la cizalla voladora debe ser de alta velocidad. El corte se realiza a la longitud que puede almacenar la cama de enfriamiento.

La introducción del acero para el proceso de enfriamiento debe incluir un equipo que disminuya la velocidad del acero laminado, el equipo se conoce como frena colas.

Consta de un pequeño tren que varía su velocidad de acuerdo al estado de la varilla. Si la varilla está ingresando a los frena colas tiene la misma velocidad o ligeramente más rápido y disminuye a medida que la varilla termina de salir para estar a velocidad cero y luego ser depositada en la cama de enfriamiento.

Durante el desarrollo del proceso de producción es necesario refrigerar los rodillos laminadores, lo que implica el contacto con agua durante todo el laminado. En cambio durante el enfriamiento el agua no debe hacer contacto con el acero, el contacto con agua durante el enfriamiento cambia las propiedades mecánicas del acero que es algo perjudicial en la etapa en consideración.

La cama de enfriamiento en una estructura con peines fijos y móviles de una longitud considerable, en ella se deposita las varillas terminadas pero a 900°C, el enfriamiento se produce al aire libre. El acero permanece en la cama el tiempo que tarde en transportarla desde la entrada a la salida. El tiempo depende de la velocidad de producción.

El corte a la longitud de venta se realiza en una cizalla mecánica, la cizalla corta un grupo de varillas las cuales quedan a 6m, 9m o 12m, respectivamente. Es una maquina robusta con gran capacidad de corte.

El proceso de producción debe tener un control de calidad muy preciso por lo que se necesita la extracción de muestras continuamente. La extracción de muestras permite controlar el peso del producto final además de verificar las propiedades mecánicas del producto.

Uno de los controles imprescindibles del proceso resulta del desgaste de los rodillos laminadores. El desgaste origina que las áreas de las figuras que se laminan estén variando durante todo el proceso en un periodo de tiempo determinado, es implica que es necesario ajustar las áreas de las figuras que se laminan ajustando la separación entre los rodillos laminadores.

Se necesita un control periódico de las áreas de cada pase en cada tren de laminación, lo cual permite evaluar las áreas y cambiar los calibres o canales de laminación que ya no sean aptos para mantener la continuidad del proceso de producción.

Son necesarios los sistemas neumáticos en el molino de laminación, los sistemas deben estar bien distribuidos en toda la planta y son vitales para el funcionamiento de cilindros neumático, engrasado de cojinetes y funcionamiento

de cizallas voladoras. La generación de aire comprimido se debe a compresores instalados para tal fin, el aire generado debe cuidarse y utilizarse correctamente evitando fugas innecesarias en el proceso.

Los sistemas hidráulicos son parte de la planta de laminación, son requeridos cuando en el movimiento a realizar es más importante la fuerza que la velocidad. Se habilitan sistemas hidráulicos que tienen sus propios depósitos de aceite y que están centralizado en el área donde se utilizan.

El recurso humano necesario para la elaboración de la investigación ha requerido tiempo para el análisis de los datos obtenidos en la planta, así como para la estructuración de la presentación de los resultados y conclusiones.

El recurso financiero no ha sido indispensable, ya que el tiempo invertido en el trabajo de campo para la obtención de datos como el necesario para el análisis y la presentación de resultados se ha tomado de tiempo extraordinario del autor.

Es importante mencionar dentro del factor humano necesario para la investigación el personal que colabora en la toma de la información del proceso son colaboradores que están en una cabina destinada para ello. Los colaboradores llevan un control detallado de los acontecimientos del turno de producción, dejando registro de los problemas ocurridos, el tiempo que se prolongó el problema, el origen del problema y la solución dada a la falla.

Dentro del control es necesario contar con una herramienta estadística que contribuya a estratificar las fallas del proceso, la herramienta o programa es alimentado con la información que toman los operadores.

Otro de los recursos humanos indispensable es la figura del supervisor de producción, analiza las fallas y verifica que la información sea válida y que la solución sea real. Además posee un conocimiento amplio del proceso de producción lo que le permite ampliar la información descrita por los operadores.

El tiempo tomado para elaboración del trabajo de campo en la presente investigación, requiere de varias horas hombre durante la jornada laboral dentro del turno de producción. El tiempo tomado es una inversión en el proceso porque permite poner los cimientos que luego darán los lineamientos para plantear una mejora continua.

Los recursos mencionados anteriormente han dado la oportunidad de formular los cuestionamientos necesarios para investigar en cuanto al proceso de producción, dichos recursos son parte de la planta de laminación, con excepción del tiempo invertido por el autor. Se devuelve luego de la utilización de los recursos un trabajo de graduación que proporciona una propuesta de mejora al proceso de producción.

4. RESULTADOS

4.1. Determinación de principales factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varillas de acero corrugado

El proceso de laminación de varilla de acero corrugado se ve limitado como todo proceso por las discontinuidades, las cuales comprenden situaciones que interrumpen el proceso de producción directamente o contribuyen a tener un producto final que no es de primera calidad. Mediante los métodos de estratificación, gráfico de Pareto y análisis modal de fallos y efectos se traza una línea de análisis que permite tomar las situaciones a granel que perjudican el proceso de producción y enfocar los esfuerzos en encontrar los factores que regulan la eficiencia del proceso productivo.

4.1.1. Modos de fallo en las etapas del proceso de fabricación de acero corrugado en los trenes de laminación

Dentro de la planta de laminación, durante cada semana existen varios turnos de producción, en los cuales se llevó un control detallado de cada problema que causó un paro de producción o producto final que no fue de primera calidad. Se tomó nota del área involucrada, del tiempo total para reiniciar la producción, causa principal que ocasionó el problema y la descripción minuciosa del mismo, ver tabla VII como un ejemplo.

Tabla VII. **Formato de recopilación de paros de producción no programados**

INSTRUCCIONES: LLENAR LA INFORMACIÓN SOLICITADA CUANDO SE PRESENTE CADA PARO DE PRODUCCIÓN NO PROGRAMADO, SEA ESPECIFICO Y OBJETIVO RESPECTO A LO QUE VE.				
HORA INICIO	TIEMPO	AREA	PROBLEMA	DESCRIPCION
6:02	29	PREPARADOR 1	CONTROL EN LA CALIBRACIÓN	UN CUADRO DE RELAMINABLE QUEDO PATINANDO EN EL P-1. SE APAGO PREPARADOR 1 Y 2, YA QUE QUEDARON CON HIERRO PASADO. CALIBRES NUEVOS.

6:34	7	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	TRABON EL LA CV-20, SE AMONTONO EL HIERRO EN LA CANALETA DIVISORA. SE MODIFICO LA VELOCIDAD DE LOS FRENACOLAS.
6:31	3	MOLINO	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESO UN CUADRO DE RELAMINABLE
6:43	5	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	TRABON EN LA CIZALLA, SE LE HACIA COMBA AL HIERRO CUANDO EL DESVIADOR HACIA EL CAMBIO,
6:55	3	MOLINO	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESO SOLO UN CUADRO RELAMINABLE PARA PROBAR LA CIZALLA
7:00	16	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESO UN LINGOTE Y PASO SIN PROBLEMAS, LUEGO SE PROCESO UN CUADRO RELAMINABLE Y SE TRABO EN LA CIZALLA, SE MODIFICO LA VELOCIDAD DE LOS FRENACOLAS
7:16	9	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESO UN LINGOTE Y SE TRABO EN LA CANALETA DIVISORA, SE MODIFICÓ EL PARÁMETRO DE MOTOR ELÉCTRICO.
7:27	34	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESO UN LINGOTE PERO SE AMONTONÓ EN LA CIZALLA,SE PROCEDIO A REVISAR CUCHILLAS Y BOQUILLA DEL DESVIADOR Y SE ENCONTRÓ MUY BAJA, EN LA PARTE SUPERIOR DE ENTRADA E INFERIOR DE SALIDA Y SE PROCEDIÓ A COLOCARLE ALZAS SE PROCESÓ UN CUADRO DE RELAMINABLE Y SE TRABÓ EN EL DESVIADOR PORQUE AGARRO HACIA ARRIBA Y SE PROCEDIÓ A QUITAR EL ALZA INFERIOR DE SALIDA
8:04	4	MOLINO	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	SE PROCESÓ SOLO UN CUADRO RELAMINABLE PARA PROBAR LA CIZALLA Y PASO BIEN.
8:17	8	PREPARADOR 5	CALIBRACIÓN INCORRECTA DE CAJA	UNA MUESTRA QUE SE ESTABA SACANDO DEL P-5 PASÓ TIRANDO LA CAJA DE SALIDA. SE PROCEDIO A REUBICAR Y CENTRAR DICHA CAJA
9:14	11	CIZALLA	DESALINEACIÓN DE EQUIPOS	LA PUNTA DE UN HIERRO TOPÓ EN EL CENTRO DE LA CANALETA DIVISORA, NO SE MODIFICÓ NINGUN PARÁMETRO. SOLO SE ESTUVO MONITOREANDO
9:30	7	PREPARADOR 6	CALIBRACIÓN DE CAJA INCORRECTA	UN HIERRO NO ENTRÓ AL P-6, SE MODIFICÓ PARÁMETRO DE APERTURA DE REPETIDOR. Y SE LE ABRIÓ A LA CAJA DE ENTRADA DEL P-6
9:42	8	PREPARADOR 5	AJUSTE DE PARAMETROS PROGRAMABLES	UN HIERRO PASO DE LARGO EN EL REPETIDOR 2, PORQUE IBA MUY PEGADO AL HIERRO ANTERIOR, EL CUAL NO HABIA TERMINADO DE SALIR DEL P-6. ANTERIORMENTE SE HABÍA MODIFICADO ESTE PARÁMETRO CON EL ELECTRICO DE TURNO Y A LA HORA DE AUMENTAR DICHO PARAMETRO EL TIEMPO ENTRE HIERROS BAJABA, EL ELÉCTRICO DECIDIO BAJARLO POR ESO QUEDÓ A 5.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla describe los tiempos de paro de producción por cada una de las semanas evaluadas, tabla VIII.

Tabla VIII. Semanas analizadas y su tiempo de paros de producción no programados

Semana	Tiempo de paro
1	231min
2	316min
3	395min
4	313min
5	258min
6	560min
7	175min
8	274min
9	113min
10	364min
11	331min
12	360min
13	337min
14	236min
15	218min
16	197min
17	181min
18	122min
19	133min
20	202min
21	274min
22	231min
23	141min
24	201min
Total	6163min

Fuente: elaboración propia.

Se tomaron los tiempos de paro de producción de 6 meses, seguidos, analizándose los mismos en forma semanal tomando en cuenta la continuidad de producción del proceso de fabricación de varillas de acero corrugado, ver tabla VIII. En la tabla se detallan los tiempos de paro por semana, corresponden a todos los paros de producción del área de los trenes de laminación.

Se recopilaron 696 paros de producción no programados, durante 24 semanas, con un total de 6,163 minutos.

En la tabla VII se puede observar un ejemplo de la manera que se llevó el formato para el registro de la información generada por cada paro de producción no programado. Dejando registro de la hora, tiempo, el área, el problema y la descripción. Se consideró además que los paros registrados se hubiesen ubicado en el área de los trenes de laminación.

Previo a la estratificación se eliminaron los paros que tenían menos de 20 minutos de incidencia en el tiempo, debido objetivo de determinar factores que regulan la eficiencia del proceso, lo cual redujo la cantidad de paros a considerar dejando un total de tiempo de 4,175 minutos de paro.

La estratificación se inició al agrupar cada uno de los paros de producción de acuerdo a los siguientes estratos, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a la frecuencia que presentan en los paros de producción, ver tabla IX. De acuerdo al marco teórico el proceso de laminación es muy amplio por lo que encontrar las causas que originan los problemas requiere mucha atención y conocimiento del proceso. Los estratos propuestos se encontraron con una alta frecuencia en aparición o con un impacto en el tiempo de paro muy alto. Se desecharon los estratos por ubicación, debido a que la ubicación donde se presentaron las fallas no estaba relacionada con la raíz del problema en muchos de los casos.

Tabla IX. **Clasificación de estratos**

Estratos
Caída de tensión
Caja guía de entrada en mal estado
Caja guía de entrada mal calibrada

Caja guía de salida mal alineada
Calibración de cuchillas de cizalla voladora
Calibración de rodillos mal hecha
Calibración de rpm incorrecta
Cambio de calibre fuera de calibración normal
Cambio de cuchillas en cizalla voladora
Cambio de topes para corte de varilla en frío
Cojinetes de muñones de rodillos dañados
Descontrol en la temperatura del horno
Descontrol en programación de parámetros
Descontrol en rpm del motor eléctrico
Descuido de personal durante el proceso
Driver en mal estado
Hierro malo
Mantenimiento deficiente
Operación incorrecta de equipos
Proceso de relaminable
Separación entre rodillos incorrecta
Tubo de salida en mal estado
Tubos mal alineados
Varilla picada

Fuente: elaboración propia.

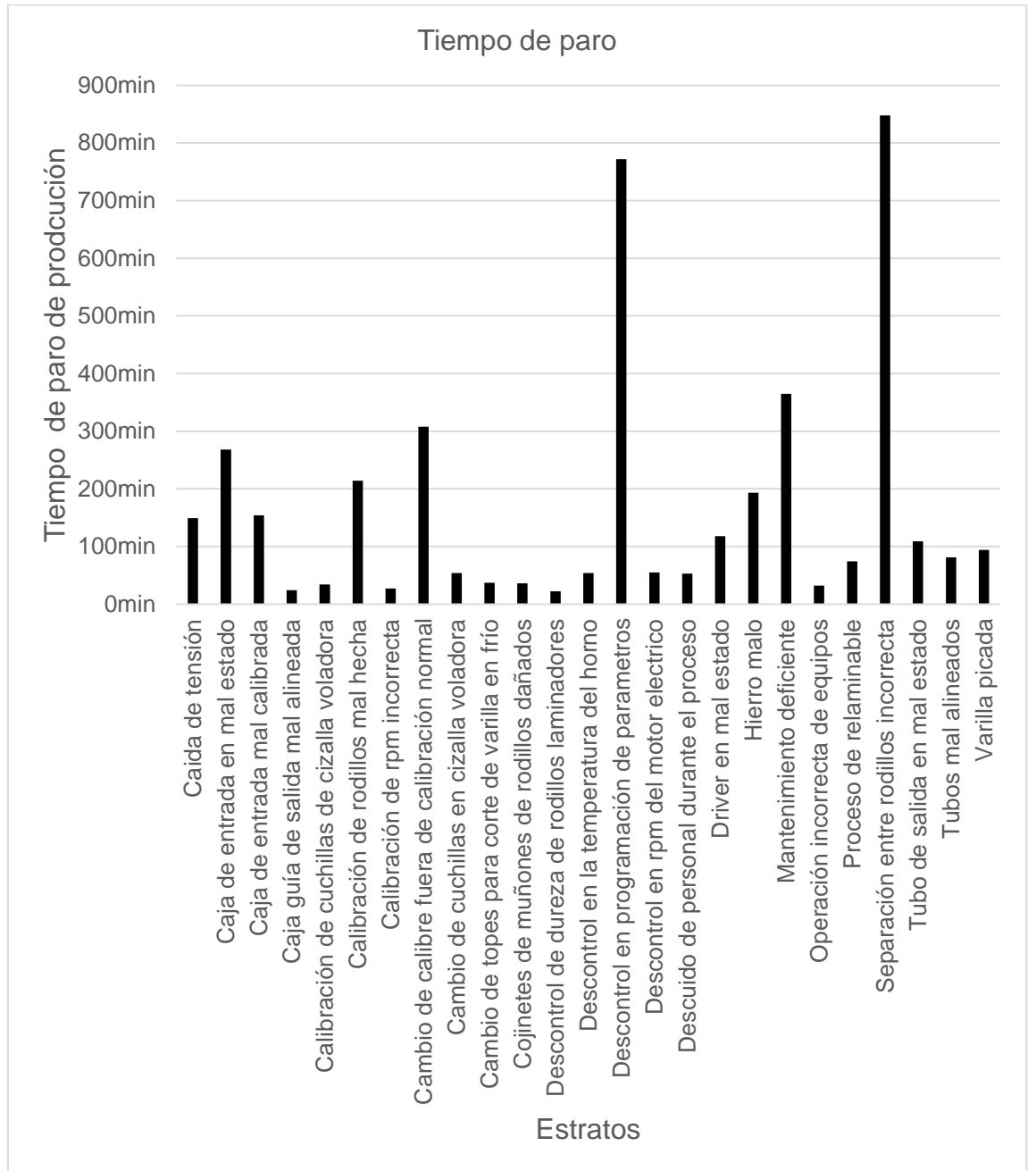
La agrupación de los paros de producción originó una lista de procesos o funciones que debían de ser evaluados a detalle para ser mejorados y así reducir su participación en paros de producción que afecten directamente el proceso de laminación, ver figura 34.

El análisis de Pareto permite tener una vista más clara sobre lo que es importante tratar para llegar a una conclusión. Dicho análisis marca que el 80% de los tiempos de paro comprende el 36% de los problemas, con el siguiente orden de prioridad:

- Separación entre rodillos incorrecta
- Descontrol en programación de parámetros
- Mantenimiento deficiente
- Cambio de calibre fuera de calibración normal
- Caja de entrada en mal estado
- Calibración de rodillos mal hecha
- Hierro malo
- Caja de entrada mal calibrada
- Caída de tensión

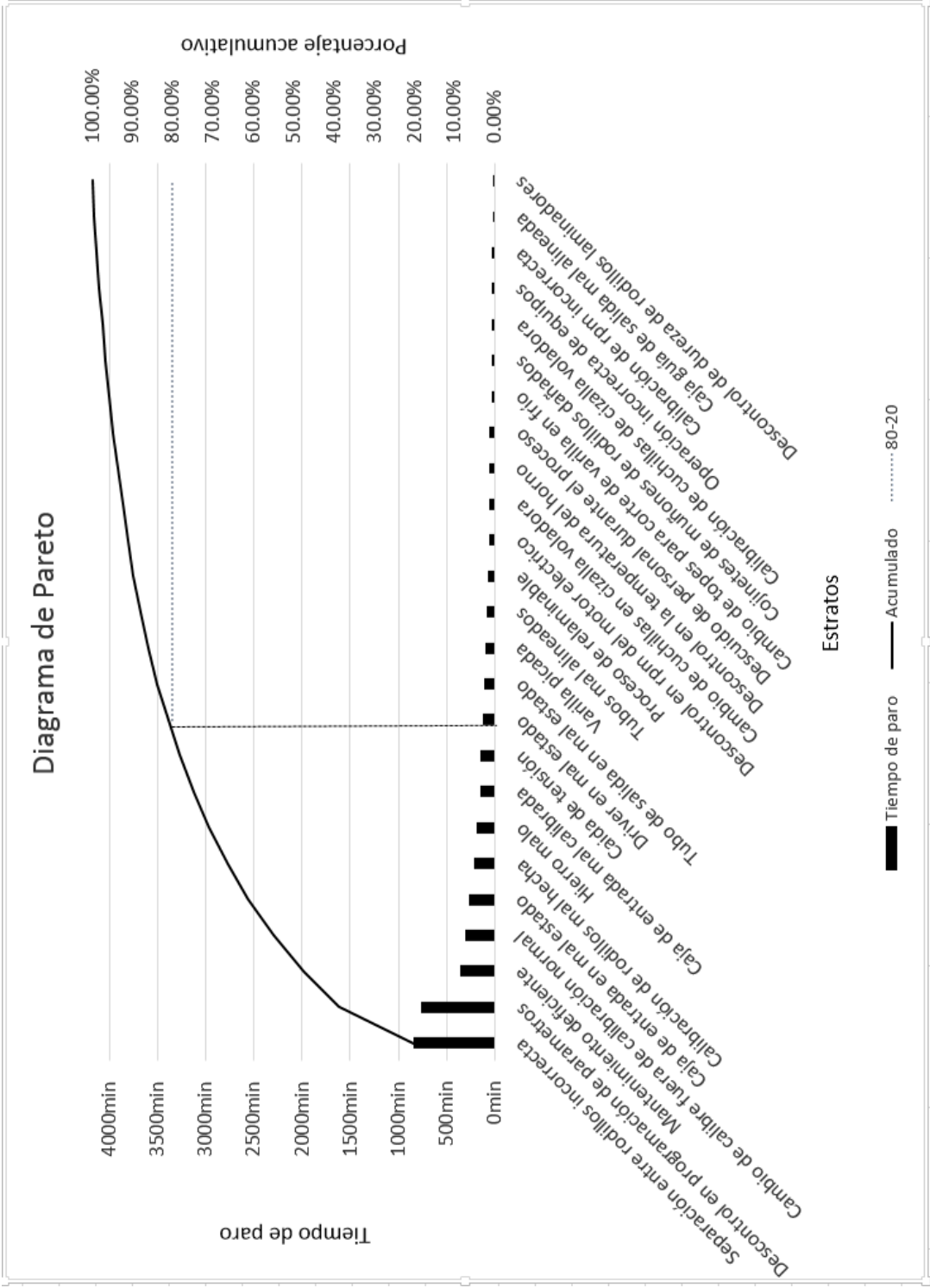
El análisis de Pareto sugiere que el 80% del tiempo de paro no programado en el área de los trenes de laminación, radica en el 20% de los diferentes tipos de estratos encontrados. Por lo que al dirigir los esfuerzos en mejorar en esos estratos, el proceso de producción tendrá una mejora del 80% en el tiempo de paro no programado, ver figura 35. Las soluciones a los problemas deben de plantearse de acuerdo a un análisis más profundo, donde se determinen las circunstancias que rodean cada una de las situaciones.

Figura 34. **Estratos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Gráfico de Pareto



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción

El análisis de cada estrato o problema por separado se lleva a cabo recurriendo al análisis modal de fallas y efectos.

El análisis permite encontrar de manera muy objetiva las causas que originan dicho problema. Para ello el problema debe ser analizado como un universo. Se procedió al análisis de cada problema, con la ayuda de formatos estandarizados que permitieron controlar de manera ordenada la secuencia de análisis.

El formato utilizado indica qué es un análisis de proceso, contiene las especificaciones del caso bajo análisis, en este caso un problema que causó un paro de producción, además de descripciones de la fecha y de ejecución del análisis. El formato tiene como objetivo mostrar de manera explícita cada uno de los factores analizados, su efecto en el problema y su prioridad ante el mismo. Además de lograr identificar acciones correctivas, para cada situación. Ello permitió realizar una confirmación de la calidad y efectividad del análisis realizado.

Los modos de fallo consisten en un elemento o sistema que no cumple con las especificaciones requeridas. Ello es un defecto de una función, por lo tanto limita la calidad del producto final al grado de ponerla en riesgo; el proceso debe ser interrumpido, corregir la falla y garantizar el trabajo correctivo o preventivo para luego reanudar la producción.

Los modos de fallo son la principal razón de las interrupciones del proceso de producción. Además la productividad del proceso se reduce con el desaprovechamiento de la materia prima, lo cual va ligado a los paros de producción no programados.

El formato utilizado para el análisis se desarrolló de la siguiente manera, ver tabla X:

Tabla X. **Cuadro de evaluación de análisis modal de fallos y efectos**

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS											HOJA	REVISIÓN NO.	FECHA	POR	
DE PROCESO <input type="checkbox"/>				DE DISEÑO <input type="checkbox"/>				RESPONSABLE:			de				
PRODUCTO:				PROCESO:				FECHA:							
ESPECIFICACIÓN:				OPERACIÓN:				REVISADO:							
FECHA DE EDICIÓN:				ACTUAR SOBRE NPR - QUE:				Acción implantada			S	O	D	NPR final	
Operación o función	Modo de Fallo	Efecto de fallo	S	G	Causas de fallo	O	Controles actuales	D	NPR inicial	Acción correctora	Responsable	S	O	D	NPR final
									0						0
									0						0
									0						0
									0						0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Análisis modal de fallos y efectos, separación entre rodillos**

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS											HOJA REVISIÓN FECHA POR					
DE POCESO = X					DE DISEÑO =					de		1	16/04/2013	Sobres		
PRODUCTO: Rodillos de laminación					PROCESO: Laminación					RESPONSABLE: Jefe de Laminación		2	30/04/2013	Sobres		
ESPECIFICACIÓN: A1-00-01-04-13					OPERACIÓN: Separación entre rodillos de laminación					FECHA: 15-04-13						
FECHA DE EDICIÓN: 13-02-13					ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 200					REVISADO: 29-04-13						
Operación o función	Modo de Fallo	Efecto de fallo	S	G	Causas de fallo	O	Controles actuales	D	MPR inicial	Acción correctora	Responsable	Acción implantada	\$	O	D	NPR final
Separación entre rodillos de laminación	Figura de laminación de tamaño incorrecto	Figura no entra al siguiente pase	8	6	Diseño de calibración incorrecto	4	Muestreo	10	320	Calibración inicial de acuerdo a estándar	Supervisor	Muestreo de figuras del proceso luego de la calibración inicial	6	4	10	240
	Daños a motor eléctrico	Interrupción en la continuidad del proceso	10	6	Descontrol en el desgaste del calibre	3	Muestreo	1	30	Refrigeración adecuada	Operador	Limpieza y mantenimiento continuo de sistema de refrigeración.	8	3	1	24
	Producto final de segunda	Baja productividad	10	6	Calibración inicial incorrecta	2	Muestreo	1	20	Revisión de alturas de figuras durante la calibración inicial del molino	Supervisor	Control de separación entre rodillos durante el proceso.	7	1	1	7
	Desprendimiento de material	Daños a caja guía	8	6	Descuido del operador	6	Muestreo	6	288	Revisión minúscula del área de cada caja guía durante el proceso.	Operador	Revisión del área de cada caja guía durante el cambio de calibre.	7	5	6	210
Daños a caja de entrada	Figura no entra al siguiente pase	8	6	Descontrol en el peso final de la varilla	6	Muestreo	1	48	Graduación correcta en apertura entre rodillos de caja guía	Operador	Calibrar cajas guías con muestras estandarizadas por cada medida de producción.	7	5	1	35	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Análisis modal de fallos y efectos, mantenimiento defectuoso

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS																
Operación o función	Modo de Fallo	Efecto de fallo	S	G	Causas de fallo	O	Controles actuales	D	NPR inicial	Acción correctora	Responsable	Acción implantada	S	O	D	NPR final
PRODUCTO: Parámetros programables de la planta																
ESPECIFICACIÓN: A1-00-01-04-14																
FECHA DE EDICIÓN: 13-02-13																
OPERACIÓN: Programación de parámetros																
ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 200																
Mantenimiento defectuoso	Acumulación de escoria en las máquinas	Obstrucción de visión de fotocelda o rotonda.	7	6	Limpieza sin realizar.	4	Revisión por parte del operador	7	196	Asignación y control de áreas específicas en la planta por el personal	Supervisor	Monitoreo definido en horarios y lugares bajo responsabilidad de operadores.	4	5	4	80
	Desalineación de equipos	El acero no ingresa en el siguiente pase.	8	6	Alineación defectuosa.	3	Revisión por parte del supervisor	9	216	Asignación y control de áreas específicas en la planta por el personal.	Operador	Monitoreo definido en horarios y lugares bajo responsabilidad de operadores.	10	2	4	80
	Calibre en rodillos de castillos con desgaste severo	Figura de laminación deformada.	10	6	Revisión mal realizada en rodillos de laminación.	6	Revisión por parte del supervisor	10	600	Control de dureza de rodillos y control de tiempo de vida de calibre según dureza	Supervisor	Control visual de los calibres	8	4	3	96
	Soldadura quebrada	Deficiencias serias en funcionamiento de equipos.	6	6	Programa de mantenimiento defectuoso.	7	Revisión por parte del operador	8	336	Monitoreo programado de revisión de soldaduras por área o equipo.	Supervisor	Revisión de parámetros programables previo al arranque.	8	1	8	64
Cajas guías de entrada o salida sin sujeción.	Posición incorrecto del acero para ingresar al siguiente	9	6	Apriete incorrecto de tornillos de sujeción.	2	Revisión por parte del operador	6	108	Estandarizar parámetros programables según la medida a producir.	Supervisor	Estandarización parcial de parámetros	8	3	7	168	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Análisis modal de fallos y efectos, programación de parámetros

ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS																
DE POCESO <input type="checkbox"/> X		DE DISEÑO <input type="checkbox"/>														
PRODUCTO: Parámetros programables de la planta		PROCESO: Laminación														
ESPECIFICACIÓN: A1-00-01-04-15		OPERACIÓN: Programación de parámetros														
FECHA DE EDICIÓN: 13-02-13		ACTUAR SOBRE NPR > QUE: 150														
HOJA		REVISIÓN		FECHA		POR										
		1		16/04/2013		Solares										
		2		30/04/2013		Solares										
		RESPONSABLE: Jefe de Laminación														
		FECHA: 15-04-13														
		REVISADO: 29-04-13														
Operación o función	Modo de Fallo	Efecto de fallo	S	G	Causas de fallo	O	Controles actuales	D	NPR inicial	Acción correctora	Responsable	Acción implantada	S	O	D	NPR final
Programación de parámetros	Acumulación de varilla en el corte en caliente	Disminución de la productividad	4	6	Velocidad tangencial de la cizalla voladora incorrecta	8	Revisión por parte del supervisor	4	128	Calcular porcentaje de tensión previo al arranque de la planta	Supervisor	Calculo de porcentaje de tensión antes del arranque	4	5	4	80
	Longitud incorrecta de varilla de acero corrugado en la cama de enfriamiento	Aumento de mermas en el proceso	10	6	Descontrol del operador	4	Revisión por parte del operador	4	160	Revisión de la longitud de la varilla al concluir el arranque	Operador	Revisión de la longitud de la varilla por el operador	10	2	4	80
	Descarga parcial de la varilla de acero corrugado por la canaleta revolver	Interrupción definitiva del proceso de laminación	Falta de estandarización de parámetros por medida de producción	8	6	Falta de estandarización de parámetros por medida de producción	6	Revisión por parte del supervisor	3	144	Estandarizar parámetros según la medida a producir.	Supervisor	Estandarización parcial de parámetros	8	4	3
Programación de parámetros	Tensión innecesaria en el material entre un pase y otro previo o siguiente.	Deformación de la figura a laminar	8	6	Calculo de velocidad incorrecto por mal ingreso de diametro de rodillo.	3	Revisión por parte del supervisor	8	192	Revisión de parámetros previo al arranque	Supervisor	Revisión de parámetros programables previo al arranque	8	1	8	64
	Descarga incorrecta de la última o penultima varilla del inoote en	Interrupción definitiva del proceso de laminación	8	6	Programación de parámetros deficiente	7	Revisión por parte del supervisor	7	392	Estandarizar parámetros según la medida a producir.	Supervisor	Estandarización parcial de parámetros	8	3	7	168

Fuente: elaboración propia.

El análisis modal de fallos y efectos proporciona un NRP que representa el producto de los valores de: gravedad de fallo, probabilidad de ocurrencia y probabilidad de no detección. Cada posible modo de fallo de la operación o problema evaluado genera una acción correctora, la cual es un factor deficiente que debe ser fortalecido y por ende, un factor que afecta la eficiencia del proceso de laminación, ver tablas XI, XII y XIII.

4.1.3. Relación existente entre los modos de fallo, los paros de producción no programados, los factores y la eficiencia del proceso de producción

La propuesta para corregir el modo de fallo se llama acción implantada. Por cada operación evaluada se toman los dos modos de fallo con el NRP más alto y luego la acción implantada de cada uno de ellos, es así que se concluyó cada análisis con los siguientes resultados, ver tabla XIV:

Tabla XIV. Resultados de análisis modal de fallas y efectos, acciones implantadas

Operación o función (problema)	Acciones implantadas
Separación entre rodillos incorrecta	Extraer muestras de las figuras del proceso luego de la calibración inicial
	Revisar el área de cada caja guía durante el cambio de calibre.
Descontrol en programación de parametros	Estandarizar parcialmente los parametros
	Revisar los de parametros programables previo al arranque
Mantenimiento deficiente	Revisar la longitud de la varilla por parte del operador
	Supervisar de manera programada y eficiente
Cambio de calibre fuera de calibración normal	Aumentar de compromiso de los colaboradores hacia sus responsabilidad
	Proponer la programación de producción para 3 meses
Caja de entrada en mal estado	Controlar la dureza superficial de rodillos previo a su ingreso a producción
	Asegurar un sistema de lubricación continuo y eficiente
Calibración de rodillos mal hecha	Calibrar la de separación entre rodillos de cajas guías con muestras estandarizadas
	Calibrar con una varilla corrugada los rodillos bajo la supervisión del operador.
Punta o cola de lingote con deformaciones	Alinear tubos de entrada y salida, así como equipos periféricos
	Clasificar la materia prima previa a su ingreso al horno de laminación
Caja de entrada mal calibrada	Cortar homogéneamente en cizallas voladoras de despunte
	Calibrar la de separación entre rodillos de cajas guías con muestras estandarizadas
Tubo de salida en mal estado	Revisar detalladamente cada parte de la caja en paros de producción y mantenimiento
	Estandarizar y controlar dimensiones de tubos de salida.
	Habilitación de repuestos de calidad en todo momento de la producción.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Resultados de análisis modal de fallas y efectos, factores

Acciones implantadas	Factores
Extraer muestras de las figuras del proceso luego de la calibración inicial	Ejecución de procedimientos
Revisar el área de cada caja guía durante el cambio de calibre.	Aumento de control
Estandarizar parcialmente los parámetros	Ejecución de procedimientos
Revisar los de parámetros programables previo al arranque	Ejecución de procedimientos
Revisar la longitud de la varilla por parte del operador	Aumento de control
Supervisar de manera programada y eficiente	Mejora en la supervisión
Aumentar de compromiso de los colaboradores hacia sus responsabilidades	Factor humano
Proponer la programación de producción para 3 meses	Aumento de control
Controlar la dureza superficial de rodillos previo a su ingreso a producción	Aumento de control
Asegurar un sistema de lubricación continuo y eficiente	Aumento de control
Calibrar la separación entre rodillos de cajas guías con muestras estandarizadas	Ejecución de procedimientos
Calibrar con una varilla corrugada los rodillos bajo la supervisión del operador.	Mejora en la supervisión
Alinear tubos de entrada y salida, así como equipos periféricos	Ejecución de procedimientos
Clasificar la materia prima previa a su ingreso al horno de laminación	Ejecución de procedimientos
Cortar homogéneamente en cizallas voladoras de despunte	Aumento de control
Calibrar la separación entre rodillos de cajas guías con muestras estandarizadas	Ejecución de procedimientos
Revisar detalladamente cada parte de la caja en paros de producción y mantenimiento	Ejecución de procedimientos

Fuente: elaboración propia.

La tabla XV consolida y compara las diferentes acciones implantadas con factores correspondientes, o en otras palabras, particularidades del proceso que en ausencia de los mismos son la raíz de los modos de fallo que ocasionaron paros de producción y por ende una reducción de la eficiencia.

Las acciones implantadas son la versión específica de los factores, ya que las acciones se encuentran dentro de un procedimiento establecido previamente que no se está cumpliendo correctamente o son parte de un control que no se está llevando.

El aumento de control o la ejecución de procedimientos resaltan como los principales factores que deben ser corregidos. El fortalecimiento a la falta de control y evitar la ausencia de ejecución de procedimientos contribuirá considerablemente a disminuir el NPR según el análisis AMFE y como consecuencia, el modo de fallo tiende a desaparecer. Los dos factores son determinantes en los modos de fallo del proceso en análisis.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Determinación de principales factores que regulan la eficiencia del proceso de producción de varilla de acero corrugado

Los paros de producción son necesarios para hacer mantenimientos a las máquinas o equipos de un proceso determinado; sin embargo, cuando los paros de producción no son programados tienen un efecto perjudicial en el proceso porque debe ser detenido cuando debe producir. Como parte del control de un proceso se establecen metas que deben de cumplirse en determinado tiempo, pero si el tiempo destinado para cumplir una meta de producción se emplea en detener el proceso y realizar correcciones no programadas afectaran la cantidad de producción y por ende la eficiencia se ve afectada. Es por ello que se deben de evitar los paros de producción no programados.

El análisis que se inició en la presente investigación tomando nota de los paros de producción no programados, luego tabulando y estratificando la información obtenida para encontrar los problemas de raíz que deben ser corregidos, permitió comprobar el alcance negativo que tienen los paros de producción en el proceso.

Se identificaron acciones correctivas que ayudan a aumentar la eficiencia del proceso, evitando fallas en el mismo y paros de producción. Los paros de producción son la base del análisis y afectan directamente la eficiencia del proceso, impidiendo que se alcancen las metas establecidas y se invierta tiempo de producción en actividades que alejaran los resultados esperados.

5.1.1. Modos de fallo en las etapas del proceso de fabricación de acero corrugado en los trenes de laminación

Las etapas del proceso fueron determinadas ampliamente en el marco teórico y los factores que regulan la eficiencia del proceso resultaron del análisis modal de fallas y efectos, el que califica como un procedimiento práctico y de alto nivel para mejorar un proceso productivo, además de ser claro y muy detallado de tal manera que el procedimiento conduce a los resultados esperados.

Tal como fue incluido en la descripción de las etapas del proceso de laminación, se deben tener estándares en cada paso del proceso para conseguir un producto final de calidad, es por ello que la aplicación de controles y procedimientos durante todo el proceso no debe de escatimar esfuerzos.

El análisis descrito en el capítulo anterior revela que todas las etapas del proceso de laminación se ven afectadas por los factores que reducen la eficiencia. Los estratos seleccionados están incluidos en varias de las etapas del proceso. Las etapas incluyen desde el calentamiento de la palanquilla, pasando por la transformación de la sección de acero llegando a su figura y dimensiones finales, hasta que la varilla es enfriada hasta llegar al área de empaque. Cabe resaltar que el área de los trenes de laminación donde se transforma la sección de acero es la que recibe la mayor incidencia ya que todos los estratos la incluyen.

Los controles y los procedimientos son factores implícitos en todo el proceso de producción de varilla de acero corrugado y son determinantes en todo el proceso de producción.

Las etapas del proceso de laminación se ven afectadas a cada momento por los factores que regulan la eficiencia del mismo. El control en el proceso, desde que el acero es calentado hasta que es laminado en cada una de sus etapas, es crucial para un óptimo desempeño, no se puede obtener un proceso de calidad sin controles en el mismo. De igual manera los procedimientos deben ser certificados regularmente por el supervisor para que asegure el fiel cumplimiento de los mismos, ya que como se puede corroborar en las tablas de resultados la falta de aplicación de procedimientos produce automáticamente problemas que ocasionan paros de producción.

Debido a que el proceso en análisis es un proceso en línea, no se puede prescindir de ninguna etapa, por lo que es preciso mantener cada etapa bajo control. No es posible dar menor importancia a una u otra etapa. Los resultados finales del proceso se ven afectados considerablemente por las fallas en cualquiera de sus etapas, ya sea que afecten la calidad del producto o la eficiencia del proceso, ambas de carácter crítico para la colocación del producto en el mercado.

5.1.2. Efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción.

La estratificación como método para agrupar datos es de mucha ayuda cuando los datos son situaciones a evaluar en cantidades grandes que comparten diferentes cosas en común, lo cual permite relacionarlas y ubicar un mismo patrón que permita alcanzar una mejor perspectiva del estudio que se está realizando. La estratificación para el caso en particular debe ser algo que se pueda realizar de forma automática, que pueda ser consecuencia de una serie de evaluaciones, que gracias a la experiencia se pueden llevar a cabo, para determinar su estrato y así identificar resultados en un menor tiempo de trabajo.

El análisis de Pareto brindo una orientación sobre los focos de interés en el estudio, no pudo hacerse sino hasta que después de la estratificación y solamente con la información obtenida del análisis de Pareto se pudo continuar con un análisis modal de fallas y efectos.

El análisis de Pareto es aplicable al estudio perfectamente, permite visualizar todo el conjunto de información y subir al próximo nivel de análisis depurando la información obtenida. Es un paso importante, ya que la cantidad de información es mucha y se desea obtener la información correcta para poder concluir de forma acertada.

El análisis modal de fallos y efectos permitió encontrar diferentes modos de fallos de un mismo proceso o función y a la vez determinar cuál puede ser una solución o acción correctora para dicho fallo. Teniendo en cuenta que existen fallos inherentes al proceso, muy difíciles de resolver en comparación con otros; además, se consideró que las acciones correctoras más viables deben ser las primeras en ser usadas, por ejemplo aquellas que implican cambios en el proceso de ejecución u optimización del control ya existente. No se opta por incrementos de control en el proceso que impliquen inversiones financieras costosas o cambios radicales en equipo o maquinaria de la planta.

Al analizar cada una de las causas originales de los paros de producción se encontró una cantidad muy grande de modos de falla, efectos y causas de los mismos. Sin embargo, en cada análisis se hizo énfasis en aquellos que tenían el número de prioridad de riesgo (NPR) más elevado. Ello permitió encontrar soluciones puntuales con cada causa, implicando así etapas enteras del proceso de laminación, métodos de controles existentes y mejorables, metodología de

trabajo de producción más eficiente y una dependencia más objetiva de la tecnología utilizada en el proceso productivo.

Los resultados establecen que existen diferentes medios para disminuir las causas que reducen la eficiencia del proceso de producción. Dichas acciones permitieron disminuir el NPR y así reducir en algunos casos la severidad del fallo, la frecuencia del suceso o la probabilidad de no detección.

5.1.3. Relación existente entre los modos de fallo, los paros de producción no programados, los factores y la eficiencia del proceso de producción

En un principio se estableció que la principal causa de la reducción en la eficiencia es causada por los paros de producción por tal razón se determinó que lo que origine los paros de producción será lo que reduzcan la eficiencia del proceso de producción.

El análisis modal de fallas y efectos fue determinante para encontrar los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción. El análisis determino de manera muy objetiva cada una de las acciones correctoras e implantadas para un modo de fallo, ello permite concluir de manera firme y certera teniendo una base sólida en análisis y resultados, ver tabla XIV.

De acuerdo a la tabla XIII de resultados se definen acciones implantadas para la corrección de modos de fallo específicos. Con excepción de una sola acción implantada, el resto pueden clasificarse bajo los títulos de aumento de controles, ejecución de procedimientos y por consecuencia mejora en la supervisión.

Los dos factores, controles y procedimientos, son factores que deben ser fortalecidos para evitar la reducción de la eficiencia del proceso de laminación.

Los procedimientos establecidos para el análisis de los paros de producción no programados reflejan que indican directamente en la eficiencia del proceso, ocupan el tiempo destinado a la producción.

La particularidad del proceso necesitaba varios métodos de análisis para conseguir un resultado y el orden en que fueron usados lo permitió, desde la información general hasta la específica. La investigación no solo permite determinar los principales factores que reducen la eficiencia del proceso sino que deja marcado el camino para realizar las correcciones pertinentes y aumentar la eficiencia del proceso.

El proceso de laminación reúne una amplia gama de procesos menores y determinantes, es por ello que todo el proceso de laminación debe contar con controles específicos y procedimientos puntuales con estándares definidos que ayuden a reducir los modos de fallo y aumente el tiempo en que el proceso de producción mantiene una continuidad.

CONCLUSIONES

1. Los factores básicos que inciden en el proceso de laminación en caliente son en el control deficiente de procesos y la no ejecución de procedimientos de producción ya establecidos.
2. Las etapas del proceso de laminación en caliente que se ven más afectadas debido a las variables que inciden en el proceso son: el proceso de laminación dentro del molino, el corte en caliente y enfriamiento de la varilla.
3. Los métodos de control que tienen mayor incidencia en el proceso de laminación, son los que delimitan la calibración inicial del molino, tanto físicamente como en parámetros programables.
4. La metodología de producción que permitió optimizar el proceso de laminación en caliente, se focalizó en la estandarización de parámetros programables y variantes físicas en el molino de laminación para cada medida de producción.
5. La tecnología actual permite un aumento de control significativo durante todo el proceso de laminación, especialmente desde el control de la temperatura del horno y el manejo del mismo hasta la permisibilidad de producción a velocidades cada vez más elevadas.
6. Los modos de fallo que tienen origen en los paros de producción y que tienen un número de NRP elevado, los cuales se enlistan en cada análisis modal de fallos y efectos efectuado afectan las etapas de calentamiento del acero, la transformación y el enfriamiento del mismo.

7. Los efectos de los modos de fallo en los factores que regulan la eficiencia del proceso de producción son la limitación de la calidad del producto final, al grado de ponerla en riesgo y la disminución del tiempo destinado a la producción interrumpiendo la continuidad del mismo, para realizar correcciones y garantizar las últimas.
8. Los modos de fallo dentro del proceso de laminación de acero originan los paros de producción no programados que son clasificados por la estratificación, el diagrama de Pareto permite enfocar los esfuerzos de análisis en lo relevante y el análisis modal de fallas y efectos facilita definir los factores que regulan la eficiencia del proceso, debido a lo imposible que resulta mantener la continuidad en un proceso cuando es interrumpido.
9. La propuesta de mejora está formada por la aplicación de la estratificación juntamente con el diagrama de Pareto, que permiten definir los problemas relevantes que ocasionan paros de producción no programados; el análisis modal de fallas y efectos que determina acciones correctivas. En conjunto forman una propuesta de mejora a los problemas identificados en el proceso de producción.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar los controles actuales del proceso productivo y los procedimientos de operación dentro de los trenes de laminación, para evitar que el control deficiente de procesos y la no ejecución de procedimientos de producción ya establecidos no sean los que afecten negativamente la eficiencia del proceso.
2. Aumentar los esfuerzos por tener una supervisión objetiva y eficiente durante el mantenimiento de los trenes de laminación dentro de la planta, previo a un arranque de producción y durante el proceso de producción, especificando los puntos críticos de cada etapa del proceso de transformación del acero.
3. Diseñar formatos específicos para cada medida de producción, resaltando las variantes en el proceso para crear condiciones de trabajo similares en cada turno de producción.
4. Verificar el desempeño de cada control o estándar a fin de tener una retroalimentación, para implementar una mejora continua.
5. Realizar periódicamente evaluaciones con los proveedores de maquinaria y equipo, a fin de evaluar el costo beneficio de una inversión en la adquisición de nuevas tecnologías, para el proceso de laminación en caliente.
6. Evaluar continuamente las acciones implantadas dentro del análisis modal de fallos y efectos para disminuir considerablemente los NRP más altos de los modos de fallo de las operaciones o funciones bajo análisis.

7. Llevar un control estadístico de la eficiencia del proceso de producción, haciendo particular énfasis en la calidad del producto y en la continuidad del proceso.
8. Utilizar la gestión de calidad para mejorar la eficiencia del proceso, para aumentar la calidad de los controles de producción y de la ejecución de los procedimientos de operación.
9. Hacer un plan de prevención, que permita identificar posible fallas en el proceso de laminación y eliminarlas, ya sea al analizar el proceso a través de un análisis modal de fallos y efectos o algún otro que enfoque los esfuerzos de prevención en erradicar problemas de raíz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, R. (1999). Características técnicas del acero para la construcción en el nuevo milenio!!. Construxpo '99. El Salvador.
2. Aguilar, R. (2012). Introducción a la metalurgia. Proyecto de investigación metalúrgica EIM. FIUSAC. Guatemala.
3. Aguilar, R. (2011). Solidificación de metales y aleaciones y el mecanismo de cierre de la vena fluida durante los ensayos de fluidez. Escuela de ingeniería mecánica. Facultad de Ingeniería. USAC. Guatemala.
4. Aiteco consultores. (s.f.) Estratificación: Herramienta estadística para el análisis y la mejora. Consultado el 18 de septiembre de 2013, de <http://www.aiteco.com/estratificacion/>
5. Añez, J. De Orue, I. Kerdel, M. Lacoa, U. Valsecchi, A. (2010) Estudio y aplicación del método SMEDA la línea de producción de la empresa SIDETUR, S.A. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela.
6. Arenas, Antonio. (2010). Diseño de sistema de control supervisorio en horno de calentamiento de lingotes de acero. Tesis de Ingeniería Mecánica Eléctrica. USAC. Guatemala.
7. Besterfield, Dale. (1995) Control de Calidad (4a ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana.
8. Calderón, O. (2001) Laminación en caliente de aceros comerciales para fabricación de redondos corrugados. Tesis de la Ingeniería Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

9. Cama de enfriamiento automática y canaleta revolver. (s.f) Consultado el 20 de febrero de 2015, de <http://www.evotech.in/rollingmill/auto-cooling-bed.php>
10. Chase, R. y Jacobs, R. (2009) Administración de operaciones: producción y cadena de suministros. (12ª ed.). México: Mc. Graw Hill / Interamericana Editores, S.A de C.V.
11. Guatemala, Ministerio de Economía, Comisión guatemalteca de normas (2005) “Barras de acero de refuerzo para hormigón (concreto), sin exigencias especiales de soldabilidad. Especificaciones.”
12. Danieli. (s.f.) Defectos en lingotes de acero. Archivos INDESA. (s.l.): (s.n.).
13. Definición.de. (s.f.) Definición de eficiencia. Consultado el 18 de septiembre de 2013, de <http://definicion.de/eficiencia/>
14. Enríquez, J. Tremps, E. De Elío, S. Fernández, D. (2009) Monografías sobre tecnologías del acero. Parte II Colada de acero. Consultado el 20 de febrero de 2015, de http://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPS_2009_01.pdf
15. Enríquez, J. Tremps, E. De Elío, S. Fernández, D. (2010) Monografías sobre tecnologías del acero. Parte IV Laminacion. Consultado el 4 de septiembre de 2013, de http://oa.upm.es/2074/1/LAMINACION2_MONO_2010.pdf

16. España. Diputación Foral de Biskaia. Departamento de promoción económica. AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos. Consultado el 18 de septiembre de 2013, de <http://www.valoryempresa.com/archives/amfefmea.pdf>

17. Evotech.in. (s.f). Laminación, cama de enfriamiento automática con canaleta doble. Consultado el 4 de junio de 2013, de <http://www.evotech.in/rollingmill/auto-cooling-bed.php>.

18. Fernández, J. (2009) Los sistemas de gestión de la calidad. Consultado el 18 de septiembre de 2013, de <http://es.slideshare.net/jcfdezmxcal/los-sistemas-de-gestin-de-la-calidad>

19. Forni, L. (1981) New plant aspect of hot – Rolling wire rod and rounds. Pomini Farrel. Italia: (s.n.).

20. Forni, L. (1981) Nuovi aspetti impiantistici della laminazione a caldo vergella e tondi – Una nuova técnica di laminazione. Pomini Farrel. Italia: (s.n.).

21. Fundibeq. (s.f.) Análisis Modal de Fallos y Efectos. Consultado el 20 de febrero de 2015, de <http://www.fundibeq.org/opencms/export/sites/default/PWF/downloads/gallery/methodology/tools/amfe.pdf>

22. García, Gonzalo. (2013, enero 8). Definición de Productividad [Economía para todos] Consultado el 18 de septiembre de 2013, de <http://www.territorioempresas.com/2013/01/08/definicion-de-productividad/#sthash.Bbfyg8yM.dpuf>.
23. Germaksan machinery. (2015) Hot rolling mill stands. Consultado el 3 de marzo de 2015, de https://twitter.com/germaksan_eu
24. Gibler, N. (2003) Manual de Administración de la Calidad Total y Círculos de Control de Calidad. Instituto Tecnológico y de Estudios Superior de Monterrey. Monterrey, México.
25. Gómez, P. Soto, H. (1987) Calibración de laminación. Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
26. Gutiérrez, Humberto. (2010) Calidad total y productividad. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A. de C.V.
27. Hernández, C. (1991). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill.
28. Hesong, A. (s.f.) Cómo calcular la eficiencia de fabricación [Finanzas] Consultado el 25 de junio de 2014, de http://www.ehowenespanol.com/calcular-eficiencia-fabricacion-como_63482/
29. Hollteck rolling mill guides. (s.f). RE-WB “split” series “2” roller entry guides. (s.l.): (s.n.).

30. Instituto latinoamericano del fierro y el acero (1980). Laminación '80. Santiago, Chile: Editorial Sideral Ltda.
31. Instituto latinoamericano del fierro y el acero (1983). Laminación '83. Santiago, Chile: (s.n.).
32. Ingeniería, Investigación y Desarrollo, INDESA. (2014). Archivos y manuscritos. Guatemala.
33. Kerlinger, En., (1979). Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento. México, D.F: Nueva editorial interamericana.
34. Limón, A. (2004). Laminación de productos no-planos. TA – 42. México: (s.n.).
35. López, O. (1999). Ajustes de reguladores electrónicos de estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente. Tesis de la Ingeniería Eléctrica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
36. Martínez, I. (2008). Revisión del proceso siderúrgico de colada continua mediante solidificación rápida. Sistema de dos cilindros de colada conformación. (s.l.): (s.n.).
37. Mejía, C. (1998). Indicadores de efectividad y eficacia. Documentos planning. Consultado el 25 de junio de 2014, de: http://www.planning.com.co/bd/valor_agregado/Octubre1998.pdf

38. NDT elearning. (2013). Defectología en los materiales. Consultado el 4 de junio de 2013, de <http://www.ndtelearning.com/ut-li-defectologia.html>
39. Next generation plant services, inc. (s.f.). Laminación. Consultado el 27 de abril de 2014, de http://www.nps-tech.com/nps/index.php?option=com_joomgallery&func=viewcategory&catid=1&Itemid=104
40. Nuñez, P. (2012). Acción Correctiva y Preventiva. Gestión. Consultado el 18 de septiembre de 2013, de : <http://www.knoow.net/es/cieeconcom/gestion/accioncorrectiva.htm>
41. P.P. Rolling mills. (s.f.). Canaleta doble. Consultado el 4 de junio de 2013, de <http://www.pprmmfg.com/rolling-mill-twin-channel-479955.html>.
42. ¿Qué es y para qué sirve la mejora continua? (s.f.) Consultado el 20 de marzo de 2013, de <http://es.workmeter.com/blog/bid/273276/Qu%C3%A9-es-y-para-qu%C3%A9-sirve-la-mejora-continua>.
43. Rolling-mill.co. (s.f.). Cizalla voladora. Consultado el 4 de junio de 2013, de <http://www.rolling-mill.co/flying-crop-shear.htm>
44. Real academia española. (2001). Diccionario de la Lengua Española. (22ª ed.). España: S.L.U. Espasa libros.
45. Sacristán, F. (1995) En busca de la eficacia en los sistemas de producción. España: FC Editorial

46. Selltiz, C. Jahoda, M. Deutsch, M. Cook. (1976). Métodos de investigación en las relaciones sociales. (8ª ed.). Madrid: Rialp.
47. Sistemas y calidad total.com (2011). Sistemas de Gestión de la Calidad - Historia y definición. Consultado el 20 de marzo de 2013, de: <http://www.sistemasycalidadtotal.com/calidad-total/sistemas-de-gestion-de-la-calidad-%E2%94%82-historia-y-definicion/>
48. Smroll. (2015). Rod and bar mills. Consultado el 3 de marzo de 2015, de: <http://smroll.com/cn/PROJECTS.aspx>
49. Strabla. (s.f.). Laminador para redondo. Consultado el 27 de abril de 2014, de <http://www.strabla.com/es/offerta/laminatoio-tondo/>
50. Sudman, S. (1976). Applied Sampling. New York: Academic Press.
51. Summers, Dona. (2006) Administración de la Calidad. México: Pearson Educación.
52. The Wire Association, INC. (1963). Steel Wire Handbook (Volume 1). Connecticut, USA: Shore Line Times Publishing Company.
53. Tradekorea.com (2015). Rolling mill rolls. Consultado el 3 de marzo de 2015, de <http://www.tradekorea.com/product/detail/P277080/Rolling-Mill-Rolls.html>
54. Wusatoski, Z. (1969) Fundamentals of rolling. Londres: Pergamon

ANEXO

NOTAS DEL AUTOR

El seminario que se lleva durante el estudio del pensum en la maestría brinda los conceptos necesarios para entender que se desea lograr con la tesis, sin embargo un entendimiento superficial no es muy perjudicial. Considero que desde la elaboración del protocolo de tesis el manejar los conceptos correctamente implica lograr una excelente guía para desarrollar la tesis. Es imprescindible plantear un tema sin poder relacionarlo con los objetivos y las

preguntas de investigación y perder la visión de la justificación y los alcances. Los elementos están relacionados entre sí, ya que son consecuencia unos de otros y deben mantener armonía para que el trabajo final sea coherente. Parte de la coherencia se ve reflejada en la manera en que se plantean los resultados y se discuten los mismos y la manera en que se dan recomendaciones y conclusiones.

Otra parte importante de la tesis y muy categórica para su ejecución es el marco metodológico, el cual en cada etapa de su desarrollo tiene gran incidencia sobre lo que se elaborará en el trabajo final, es por ello que cada parte se debe plantear conociéndola perfectamente. Entre las partes principales están el enfoque y tipo de investigación y la hipótesis y sus variables, es elemental para el desarrollo del trabajo ya que permite tener la orientación necesaria para definir los métodos estadísticos que se utilizarán para analizar el problema.

Sugiero por lo antes descrito realizar un estudio profundo de los temas vistos en los seminarios antes de realizar el protocolo o el trabajo final, el no hacerlo será la fuente principal de una cantidad grande de correcciones.

Una guía esquemática de la tesis podría ser un trabajo realizado con anterioridad, aprobado, sin dudas puede brindar un panorama muy certero de lo que se espera alcanzar y como debe quedar.

Desde la redacción del protocolo de tesis es importante hacer el correcto uso de las normas de citación, es una ayuda enorme al momento de entregar el trabajo final. Se debe tener un alto grado de habilidad para utilizar el método para que después la mala citación no sea un tropiezo para el avance de la aprobación de la tesis.

A medida que el trabajo de investigación crece, habrá conceptos de otros autores que deben de ser incluidos. Los conceptos no deben de entrar en contradicción con los resultados que brinda el programa de escaneo que detecta plagios, por lo que sugiero que el trabajo debe ser escaneado durante todo el proceso de elaboración para evitar correcciones severas al tener el trabajo completado.

**NORMA
GUATEMALTECA
OBLIGATORIA**

**COGUANOR
NGO 36 011:2005**
Segunda Revisión

Barras de acero de refuerzo para hormigón (concreto), sin exigencias especiales de soldabilidad. Especificaciones.



Comisión Guatemalteca de Normas
Ministerio de Economía

Calzada Atanasio Tzul 27-32 zona 12
Tel: (502) 2476 6784 al 7
Fax: (502) 2476 6777
[Info-coguanor@mail.mineco.gob.gt](mailto:info-coguanor@mail.mineco.gob.gt)
<http://www.mineco.gob.gt>

Referencia número
COGUANOR NGO
36 011 : 2005
ICS: 77.140.60

6 MATERIAS PRIMAS Y MATERIALES.

Los lingotes y palanquillas, empleados para la fabricación de las barras de acero de refuerzo para hormigón armado, deberán tener un contenido de fósforo no mayor de 0.060%, y de azufre no mayor de 0.060%; sin embargo, en un análisis de comprobación realizado en una barra terminada, se podrá aceptar como máximo 0.075% de fósforo. La comprobación de la composición química sobre producto solo se realizará si se solicita expresamente en el pedido o en aquellos casos en que a partir de los ensayos mecánicos puedan presentarse dudas razonables sobre la calidad del material.

7 ESPECIFICACIONES

7.1 Características generales

7.1.1 Fabricación. Las barras lisas y corrugadas de acero al carbono deberán ser fabricadas por laminación de lingotes o palanquillas, obtenidos por uno de los siguientes procesos: Horno eléctrico, convertidor básico de oxígeno u horno de solera abierta.

7.1.2 Acabado. Las barras deben estar libres de imperfecciones perjudiciales en la superficie. Óxido, arrugas, irregularidades en la superficie o incrustaciones provocadas por el molino no deben ser motivo de rechazo, a condición de que la masa, dimensiones, área transversal y propiedades de tensión de una muestra limpiada a mano con cepillo de alambre, no sea menor a los requerimientos de esta especificación. Otras imperfecciones de la superficie que las especificadas en el punto anterior deben considerarse perjudiciales cuando las muestras que contengan dichas imperfecciones fallen al cumplir con los requerimientos de tensión o doblado. Por ejemplo: Traslapes, arrugas, astillas, costras o marcas de los molinos.

7.2 Dimensiones

7.2.1 Medidas nominales. Las medidas nominales del diámetro, de la masa por metro lineal y del área de la sección transversal, se indican en el cuadro 2. En cuanto a sus tolerancias de fabricación, están expresadas en función de la tolerancia para la masa de una barra considerada; véase el numeral 7.3.1.

7.2.2 Longitud de las barras. Las barras de acero para hormigón armado se suministrarán en longitudes de 6 m, 9 m y 12 m. En cuanto a sus tolerancias de longitud véase el numeral 7.3.2.

7.2.3 Corrugaciones. Se tomará como corruga única aquella que presenta sólo un tipo de nervadura respecto al eje longitudinal de la barra y como corruga doble aquella que tenga más de un tipo de nervadura respecto al eje de la barra (véase figura 1). Toda aquella corruga que presente características especiales o diferentes a las descritas anteriormente, serán aceptadas de manera contractual entre comprador y vendedor.

C O N T I N Ú A

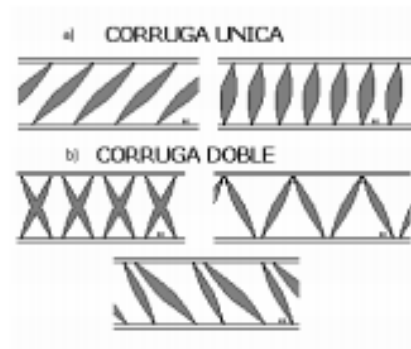


Figura 1 Diagrama de tipo de corrugas a) Corrugación única b) Corrugación doble

7.2.3.1 Las corrugaciones deberán espaciarse a distancias uniformes y las de igual geometría serán similares en tamaño y forma. El espaciamiento promedio entre corrugaciones en cada lado de la barra no deberá exceder siete décimos del diámetro nominal de la barra.

7.2.3.2 Las corrugaciones deberán localizarse con respecto al eje longitudinal de la barra en tal forma que el ángulo no sea menor de 45° .

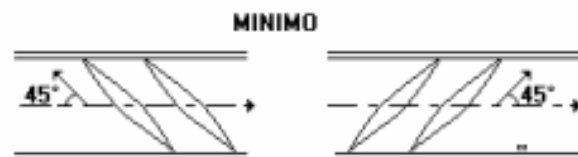


Figura 2 Ángulo de las corrugaciones

7.2.3.3 Cuando las corrugaciones formen ángulos entre 45° y 75° inclusive, deberán alternarse opuestas en dirección a cada lado de la barra o bien, aquellas localizadas sobre un lado deberán ser inversas en dirección con respecto a las localizadas sobre el lado opuesto. Cuando las corrugaciones formen ángulos mayores de 75° no se requerirá alternar en dirección.

C O N T I N Ú A

Cuadro 2. Designación, dimensiones nominales y requisitos de las corrugaciones

No. de Designación de barra ^A	Masa nominal, kg/ft (Masa nominal, lb/ft)	Dimensiones nominales ^B			Requerimientos de corrugaciones, mm (pulg.)		
		Diámetro mm (pulg.)	Área de la sección transversal mm ² (pulg. ²)	Perímetro mm (pulg.)	Espaciamiento máximo promedio	Altura mínima promedio	Ancho máximo de separación sin corruga ^C (cordón de 12.5% del Perímetro nominal)
10 (3)	0.560 (0.376)	9.5 (0.375)	71 (0.11)	29.9 (1.178)	6.7 (0.262)	0.38 (0.015)	3.6 (0.143)
13 (4)	0.994 (0.668)	12.7 (0.500)	129 (0.20)	39.9 (1.571)	8.9 (0.350)	0.51 (0.020)	4.9 (0.191)
16 (5)	1.552 (1.0439)	15.9 (0.625)	199 (0.31)	49.9 (1.963)	11.1 (0.437)	0.71 (0.028)	6.1 (0.239)
19 (6)	2.235 (1.502)	19.1 (0.750)	284 (0.44)	59.8 (2.356)	13.3 (0.525)	0.97 (0.038)	7.3 (0.286)
22 (7)	3.042 (2.044)	22.2 (0.875)	387 (0.60)	69.8 (2.749)	15.5 (0.612)	1.12 (0.044)	8.5 (0.334)
25 (8)	3.973 (2.670)	25.4 (1.000)	510 (0.79)	79.8 (3.142)	17.8 (0.700)	1.27 (0.050)	9.7 (0.383)
29 (9)	5.060 (3.400)	28.7 (1.128)	645 (1.00)	90.0 (3.544)	20.1 (0.790)	1.42 (0.056)	10.9 (0.431)
32 (10)	6.404 (4.303)	32.3 (1.270)	819 (1.27)	101.3 (3.990)	22.6 (0.889)	1.63 (0.064)	12.4 (0.487)
36 (11)	7.907 (5.313)	35.8 (1.410)	1006 (1.56)	112.5 (4.430)	25.1 (0.987)	1.80 (0.071)	13.7 (0.540)
43 (14)	11.30 (7.65)	43.0 (1.693)	1452 (2.25)	135.1 (5.32)	30.1 (1.185)	2.16 (0.085)	16.5 (0.648)
57(18)	20.24 (13.60)	57.3 (2.257)	2561 (4.00)	180.1 (7.09)	40.1 (1.58)	2.59 (0.102)	21.9 (0.864)

A: los números de las barras están basados en el número aproximado de milímetros del diámetro nominal de la barra (los números de las barras están basados en los octavos de pulgada incluidos en el diámetro nominal de las barras)

B: las dimensiones nominales de una barra deformada son equivalentes a las de una barra redonda plana teniendo el mismo peso [masa] por pie [metro] que la barra deformada.

C: separación entre extremos de corrugas

Fuente: Norma ASTM A 615/ A 615M-03a tabla No.1

Nota 8. En tanto se establece el plazo para la transición plena del país al uso del Sistema Internacional, se usará el punto para separar las cifras decimales de las cifras enteras, pues lo correcto es el empleo de la coma.

Cuadro 3. Requisitos de límite de fluencia, resistencia a la tensión y elongación

	Grado 280 [40] ^A	Grado 414 [60]	Grado 517 [75] ^B
Máxima resistencia a la tensión, min. MPa (psi)	414 [60,000]	620 [90,000]	690 [100,000]
Esfuerzo de fluencia, min. MPa (psi)	280 [40,000]	414 [60,000]	517 [75,000]
Elongación en 203.2 mm [8 pulg.], min. %:			
No. de designación de barra			
10 [3]	11	9	---
13, 16 [4, 5]	12	9	---
19 [6]	12	9	7
22, 25 [7, 8]	12	8	7
29, 32, 36 [9, 10, 11]	---	7	6
43, 57 [14, 18]	---	7	6

A: barras grado 280 [40] son fabricadas únicamente en designaciones de 10 a 25 [3 a 8].

B: barras grado 517 [75] son fabricadas únicamente en designaciones de 19 a 57 [6 a 18].

Fuente: Norma ASTM A 615/ A 615M-03a tabla No.2

C O N T I N Ú A

Cuadro 4. Clasificación de sistemas de extensómetros de acuerdo con los requerimientos del error máximo permitido en la lectura de la deformación.

Clasificación de Sistema de Extensómetros				
Clasificación	Error de deformación no exceda mayor de:		Error de longitud calibrada no exceda mayor de:	
	Error ajustado, (pulg/pulg)	Error Variable, % de deformación	Error ajustado, pulg	Error Variable, % de longitud calibrada
Clase A	0.00002	± 0.1	± 0.001	± 0.1
Clase B-1	0.0001	± 0.5	± 0.0025	± 0.25
Clase B-2	0.0002	± 0.5	± 0.005	± 0.5
Clase C	0.001	± 1	± 0.01	± 1
Clase D	0.01	± 1	± 0.01	± 1
Clase E	0.1	± 1	± 0.01	± 1

Fuente: Norma ASTM E 83 - 85

Cuadro 5. Prueba de doblado a 180°

No. de designación de barra	Diámetro del mandril para pruebas de doblado ^a		
	Grado 40 [280]	Grado 60 [414]	Grado 75 [517]
10, 13, 16 [3, 4, 5]	3 1/2 ^d	3 1/2 ^d	...
19 [6]	5 ^d	5 ^d	5 ^d
22, 25 [7, 8]	5 ^d	5 ^d	5 ^d
29, 32, 36 [9, 10, 11]	...	7 ^d	7 ^d
43, 57 [14, 18] ***	...	9 ^d	9 ^d

^a la prueba se dobla 180° a menos que se haga otra anotación.

^b d = diámetro nominal de la muestra.

*** En estas barras la prueba de doblado se realiza a 90°

Fuente: Norma ASTM A 615/ A 615M-03a tabla No.3

15 CORRESPONDENCIA

Para la elaboración de la presente norma se tomaron en cuenta los siguientes documentos:

- Norma ASTM A615/A 615M-03a. "Standard Specification for Deformed and Plain Billet-steel Bars for concrete Reinforcement".
- Norma ASTM E 83-85. Standard Practice for Verification and Classification of Extensometers.

C O N T I N Ú A

