

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y de
Sistemas

PROGRAMA DE DOCTORADO

CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

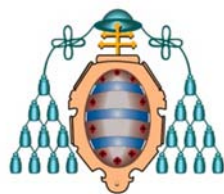
TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SKIN-PASS DEL
ACERO DE HOJALATA PARA LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO
SUPERFICIAL DE PLIEGUE**

Autor:

D. David Silván Blanco

Junio 2014



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y de
Sistemas

PROGRAMA DE DOCTORADO

CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SKIN-PASS DEL
ACERO DE HOJALATA PARA LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO
SUPERFICIAL DE PLIEGUE**

DOCTORANDO: **D. David Silván Blanco**

DIRECTOR: **D. Juan Ángel Martínez Esteban**

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente: **Faustino Emilio Obeso Carrera**

Secretario: **Francisco Javier de Cos**

Vocal: **Manuel Domínguez González**

Junio 2014

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al departamento del DIEECS (Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y de Sistemas de la Universidad de Oviedo) y en especial al tutor de esta tesis Juan Ángel Martínez Esteban, su interés en convertir en tesis un proyecto de investigación desarrollado desde una empresa, así como su apoyo, orientación, comprensión y esfuerzo a lo largo de todos estos años. Me gustaría igualmente destacar a Juan Díaz González, Miguel Ángel José Prieto, Fernando Nuño García y a Juan Antonio Martín Ramos por los consejos, el asesoramiento y el ánimo transmitido durante todo el proceso.

Agradezco así mismo la colaboración del personal de las diferentes fábricas del Grupo ArcelorMittal, a quien muestro mi profundo respeto por su extenso conocimiento de la hojalata y su disposición para compartirlo. De entre la larga lista de personas que merecerían ser nombradas, me gustaría destacar a Laurent Vermot des Roches, Nicolas Legrand, Javier Hernández y José Manuel Menéndez. Gracias también por su apoyo a Vicente Puchades Marco, una gran persona tanto en el terreno humano como en el profesional.

Finalmente quiero dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres y hermana, sin los que esta tesis no habría sido posible. Son ellos los que me han enseñado a esforzarme para superar los obstáculos del camino y lograr mis metas, y los que me han acompañado en todos los momentos, tanto en los buenos como en los malos.

A todos, gracias.

RESUMEN

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SKIN-PASS DEL ACERO PARA LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO SUPERFICIAL DE PLIEGUE

Hoy en día, la política de las grandes empresas siderúrgicas está dirigida hacia la reducción del coste de fabricación, dado el marco económico de estos años, la reducción del toneladas/hombre/año, y como consecuencia, la eliminación de todos aquellos rechazos internos y productos de no primera calidad, generados en los diferentes procesos de la cadena de producción.

Hay que tratar de evitar con mayor énfasis todos aquellos rechazos generados aguas abajo de la cadena de producción, puesto que el valor añadido adquirido es mayor y así mismo su repercusión económica, su impacto sobre la producción anual y sobre el rendimiento de la instalación.

Esta tesis se centra en el proceso de temperizado, segundo proceso de laminación en frío dentro de la cadena de producción de productos finales de hojalata y previo al último proceso de la cadena productiva, el recubrimiento del metal. De ahí la importancia del objetivo de esta tesis, la eliminación del defecto de pliegue.

Actualmente no es posible encontrar en las empresas siderúrgicas modelos para procesos de temperizado o skin-pass, los cuales permitan la eliminación del defecto superficial de pliegue. Ante la cada vez mayor exigencia de eficiencia en los procesos, mayor ratio de material de primera calidad y mayor homogeneidad y calidad exigida por parte de los clientes, las industrias siderúrgicas se ven obligadas a mejorar sus métodos de control, que en la actualidad, para este tipo de defecto de pliegue, son puramente manuales y basados en la experiencia del operador.

Es obvio que este sistema de control basado en la experiencia del operador plantea dos serios inconvenientes: el primero la dificultad que puede suponer la introducción de un nuevo operario en dicho sistema, que no poseerá la experiencia de sus compañeros más veteranos. El segundo, y probablemente más importante, que ante una línea de temperizado o skin-pass con tres turnos de trabajo y cuatro o más equipos diferentes, el coste de producción de una misma unidad de material es variable en función del equipo de trabajo.

Una de las soluciones más comunes en nuestros días se basa en acumular el conocimiento humano en sistemas computerizados. Típicamente, el esquema convencional de implementación de un problema en un ordenador comienza por un

análisis detallado del mismo. Tras este estudio, se desarrolla la solución mediante una sucesión de etapas, que dan lugar al algoritmo. Posteriormente, la codificación del algoritmo resultante, resume en un programa de ordenador la solución al problema propuesto.

En la búsqueda de determinadas soluciones industriales, esta metodología de solución al problema dado no resulta adecuada. Esto puede ser debido a la imposibilidad de desarrollar un modelo cuya codificación sea lo suficientemente sencilla para ser abordable. En otros problemas es aún peor: ni siquiera se sabe definir un algoritmo que permita dar solución al problema planteado.

Se constata pues, la necesidad de aplicar técnicas basadas fundamentalmente en la incorporación del conocimiento del proceso, inherente a los datos históricos.

Esta tesis combina el análisis empírico basado en modelos matemáticos clásicos mejorados con la aplicación de nuevas técnicas basadas en inteligencia artificial. Por su parte el análisis empírico ha permitido identificar las variables más relevantes para la caracterización del defecto superficial, dando una primera solución a través de modelos matemáticos convencionales optimizados. Por otro lado el empleo de dichas técnicas, basadas en inteligencia artificial, ha permitido validar los resultados obtenidos por métodos empíricos y mejorar el nivel de precisión del modelo.

Dentro de estas nuevas técnicas, destaca por su gran capacidad de adaptación el método de splines regresivos adaptativos (Multivariable Adaptive Regressive Splines, MARS). Este tipo de tecnología, capaces de aprender a partir de los datos históricos proporcionados para su entrenamiento, puede ser aplicada a casi cualquier otro campo de la ciencia, donde se haga necesaria una predicción de resultados sobre la base de un conocimiento de datos anteriores en el tiempo. Un sistema como el aquí desarrollado, permite considerar en el modelo, todas aquellas peculiaridades que hacen única la instalación considerada. Estos sistemas pueden llegar a proporcionar predicciones correctas en un número de casos superior al 90%, siendo en el resto de los casos el error asumible.

El método de splines regresivos adaptativos ha comenzado recientemente a aplicarse en procesos industriales, principalmente a partir de la limitación de representación no lineal. Pero también, gracias a su capacidad de abordar problemas cuando su complejidad no permite la elaboración de un modelo explicativo de los datos que se poseen, o no es fácil traducir en reglas los procedimientos establecidos.

Este trabajo, que pretende una puesta al día e investigación de la aplicación de la computación neuronal a problemas de modelado en la industria siderúrgica, se desarrolla en ocho capítulos, además de esta introducción, los anexos, el glosario de términos y las referencias a bibliografía cuyo contenido se describe a continuación.

En el capítulo primero se describe el planteamiento seguido, los objetivos a alcanzar y la estructura planteada en la consecución de la tesis.

En el capítulo segundo se describe con detalle el sector de la hojalata como uno de los productos finales de mayor desarrollo tecnológico dentro del sector siderúrgico del acero, haciendo especial hincapié en los diferentes tipos de hojalata dependiendo de su uso final dado que esto influirá entre otros puntos en el tipo de ruta metalúrgica y modelo de control y regulación en los procesos.

En el capítulo tercero se describe con detalle el entorno industrial del proceso de fabricación de la hojalata, acotando cada vez en mayor medida la cadena de producción hasta llegar al proceso donde se genera el defecto superficial de pliegue a estudio. Se analizan los dos procesos de la laminación en frío por su influencia sobre la ruta metalúrgica y características mecánicas y especificaciones finales del producto final requerido por el cliente.

En el capítulo cuarto se ofrece una perspectiva histórica de la evolución de los sistemas de control y modelado de los procesos de laminación en frío, realizando posteriormente, un recorrido por los diversos reguladores que se han desarrollado, para terminar con una referencia a aquellos que están implantados y en desarrollo en la industria siderúrgica.

En el capítulo quinto se describen los aspectos mecánicos y metalúrgicos de los procesos de laminación témpor, entrando en detalle en la modelización del proceso, haciendo hincapié en la transferencia de rugosidad como uno de los objetivos primordiales del proceso témpor. Finalmente se da una visión de los datos técnicos de diseño, limitaciones de producción del proceso témpor, así como de la capacidad de producción.

En el capítulo sexto se centra en la descripción del problema, origen, análisis inicial, identificación del defecto superficial entrando en profundidad en la evolución y análisis histórico del defecto.

El capítulo séptimo describe y analiza tanto desde un punto de vista estático como dinámico el rodillo anti-crimping del proceso témpor llegando a un modelo matemático del proceso que simula la generación del defecto superficial. Al final de

este capítulo se analiza el defecto mediante técnicas basadas en minería de datos para llegar a un sistema combinado que ratifica el modelo matemático empírico optimizado. Para todos los análisis se presentan las conclusiones parciales.

Por último, el capítulo octavo resume las conclusiones derivadas del trabajo realizado y marca las líneas de actuación en que podrían ser acometidas en investigaciones posteriores.

El trabajo se acompaña de una bibliografía de consulta y referencia, así como de unos anexos en los que se incluye las tablas de correlaciones de variables además de los listados de salidas de programa resultantes de la aplicación de los diferentes algoritmos de selección de variables.

ABSTRACT

ANALYSIS AND EVALUATION OF SKIN-PASS PROCESS IN STEEL FOR REMOVAL OF FOLD SURFACE DEFECTS

Nowadays, philosophy and goal of main steel companies is reducing productions costs, moreover taking into account the economic frame of these years, tons/human/year reduction, and as result of it, cancellation of internal scraps, non-prime products incurred in the different process of the production.

Main effort has to be taken to avoid all those scraps incurred in last process of the production, as added value is higher and even still its economic, annual production impact and process performance.

This Ph.D. focuses on skin-pass process, second cold rolling process of tinplate production and previous to last process, tinplate coating process. That is why the goal of this Ph.D. is removing fold surface defects.

Steel companies don't have integrated any type of control model to remove fold superficial defects. Due to the continuously growing efficiency process demand, better ratios of first quality products and more uniformity and quality client requirements, steel companies has being forced to improve their control methods for fold superficial defects which nowadays are human protocols and process based on worker experience.

It is obvious that this control system based on worker experience shows up two serious inconveniences: Difficulty of incorporating a new worker who will not have the process experience of any of their co-workers and probably the most important is taking into account that a skin-pass process has three work shifts and four or more working groups, that is to say production cost of a metal unit is a function of the work group.

One of the most common solutions nowadays is accumulate human knowledge in computerized systems. Commonly the structure of how to implement a problem in a computer starts with a detailed analysis of it. After it, solution is developed through a string of steps that give rise the algorithm. Finally, the code of that algorithm resultant same up in a computer program the solution the problem proposed.

For industrial applications this methodology to solve problems it is not adequate. The reason could be facing the impossibility of develop a model which codification is as simple as it could be approachable. In some other problems faced on industrial sectors it could be worst, because it is not knew how define an algorithm that could give the solution to the problem.

It therefore appears the need to apply technics based essentially on process knowledge integration, inherent to history data.

This Ph.D. combine the empiric analysis based on classic mathematical optimized models with implementation of new technics founded on artificial intelligent. Empiric analysis has allowed identifying more relevant variables to characterize the superficial defect, giving a first solution through conventional mathematical model optimized. In the other hand using these technics, founded on artificial intelligent, has allowed validating the result obtained with empiric methods and improving accuracy level of the model.

Within these new techniques, known for its high adaptability we can remark the Multivariate Adaptive Regressive Splines, MARS. This type of technology, able to learn from the historical data provided for training, can be applied to almost any field of science, where prediction results based on knowledge of past data becomes necessary. A system as developed here allows considering in the model all the characteristics that make the considered system unique. These systems can provide correct predictions in a number of cases greater than 90%, being the error in the rest of cases assumable.

The method of multivariable adaptive regressive splines has recently begun to be applied in industrial processes, mainly from the non-linear constraint representation. But also thanks to its ability to address problems when complexity does not allow the development of an explanatory model of the data we have, or is not easily translated into rules established procedures.

This work, which aims to update and research into the application of neural computation to modeling problems in the steel industry, is developed in eight chapters, in addition to this introduction, appendices, glossary of terms and references to literature, whose contents are described below.

The first chapter describes the approach followed, the objectives to be achieved and the structure proposed in the completion of the thesis.

The second chapter describes in detail the area of the tin as one of the end products of higher technological development within the steel industry, with special

emphasis on the different types of tin depending on its end use since this will have an influence, among others, on the type of metallurgical route and on the control and regulation model of processes.

The third chapter describes in detail the industrial environment in the manufacturing process of tin, further narrowing the production line until we reach the process where the surface defect under study is generated. The two existing processes of cold rolling are analyzed, given their influence on the mechanical properties and the metallurgical route and on the final specifications of the final product required by the customer.

The fourth chapter provides a historical perspective of the evolution of control systems and modeling of cold rolling processes, after which the various regulators that have been developed for this purpose are revisited, and finally a reference to those implanted and developed in the steel industry is presented.

Mechanical and metallurgical aspects of temper rolling processes are included in chapter five, going into detail about the modeling process and emphasizing roughness transfer as one of the primary objectives of temper process. Finally, an overview of design technical data, production constraints within temper processes and production capacity is given.

The sixth chapter focuses on problem description, origin, initial analysis and identification of the surface defect, thoroughly studying its evolution and its historical analysis.

The seventh chapter describes and analyzes, both from a static and a dynamic point of view, the anti-crimping roll used in temper processes, and provides a mathematical model that simulates the generation of the surface defect. At the end of this chapter, the defect is analyzed by means of data mining techniques in order to obtain a combined system that validates the optimized empirical mathematical model. For all the analysis, partial conclusions are presented.

Finally, the eighth chapter summarizes the conclusions derived from the work carried out and marks the lines of action that could be undertaken in future research.

The work includes a bibliography of reference and consultation, as well as annexes with the variables mapping tables and listings of program outputs resulting from the application of the different variable-selection algorithms.

1 PLANTEAMIENTO, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA	13
1.1 Planteamiento.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Estructura	16
2 LA HOJALATA	19
2.1 Introducción	19
2.2 Historia del producto hojalata	22
2.3 Usos de la hojalata	23
2.4 Diseño de producto.....	27
2.5 Esquema de la ruta de la hojalata	28
2.6 Tipos de hojalata según su aplicación	33
2.6.1 Hojalata DR.....	34
2.6.2 Hojalata sin estaño, TFS: Tin Free Steel	35
2.6.3 Hojalata DWI (DraW and Ironed)	35
2.6.4 Hojalata DRD (Draw and ReDraw)	37
2.6.5 Hojalata EO (Easy Open).....	37
2.6.6 Hojalata para tapón corona.....	38
2.6.7 Hojalata LTS (Low Tin coated Steel)	38
2.7 RECICLADO.....	39

3 EL PROCESO SIDERÚRGICO.....	47
3.1 La laminación en frío.....	50
3.1.1 Laminación en frío para chapa.....	52
3.1.2 Laminación en frío para hojalata.....	52
3.2 Tipos de trenes	53
3.2.1 El Tren Tándem.....	53
3.2.1.1 Partes funcionales de un Tren Tándem	53
3.2.1.2 La caja de laminación.....	54
3.2.2 Tren cuatro	55
3.2.2.1 Elementos de la caja del tren	56
3.2.2.2 Interacción entre los elementos principales del tren cuatro	59
3.3 Equipos del tren témpor DCR	63
3.3.1 Equipos lado entrada	63
3.3.1.1 Desbobinadora de cabeza de expansión doble	67
3.3.1.2 Regulación de centraje de banda.....	67
3.4 Datos técnicos del tren.....	68
3.4.1 Sensores y sistemas de control	70
3.5 Sistemas de monitorización y control.....	77
3.5.1 Sistema de monitorización y minería de datos softdetect.....	77
3.5.2 Estructura del sistema.....	77
3.5.2.1 Adquisición de datos y monitorización on-line.....	78
3.5.2.2 Análisis de datos off-line.....	79
3.5.2.3 Aplicación del gestor de modelos.....	81

4	MODELOS DE CONTROL	83
4.1	Introducción	83
4.2	Modelado de trenes de laminación en frío	84
4.2.1	Modelos estáticos	86
4.2.1.1	El modelo de Von Kármán	88
4.2.1.2	El completo modelo de Orowan	97
4.2.1.3	Modelo de Cosse y Economopoulos.....	102
4.2.1.4	Modelos computacionalmente eficientes	103
4.2.2	Modelos dinámicos	107
4.3	Modelos de regulador de espesor para una caja de laminación.....	110
4.3.1	Modelos de proceso y control	111
4.3.2	Alternativas de control.....	115
4.3.2.1	Regulador de espesor feedback	115
4.3.2.2	regulador de espesor feedforward	118
4.3.2.3	regulador de espesor mediante galgas	120
4.3.2.4	compensación de la excentricidad de los cilindros	124
4.3.2.5	regulador de flujo de material	126
4.3.2.6	modelo basado en un regulador feedback.....	127
4.3.2.7	control de la elongación en un tren témpor.....	128
4.4	Determinación del modelo del tren	130
4.5	Compensación del efecto de la velocidad	132
4.6	Interacciones de las tensiones	133
4.7	Discusión sobre los tipos de regulación.....	134
4.7.1	Regulador de espesor feedback	134

4.7.2	Regulador de espesor feedforward.....	134
4.7.3	Regulador de espesor mediante galgas.....	135
4.7.4	Regulador de flujo de material	135
4.8	Conclusión sobre los tipos de regulación.....	135
5 ASPECTOS MECÁNICOS Y METALÚRGICOS DE PROCESOS DE LAMINACIÓN TEMPER.....		137
5.1	Modelización de la estructura de la banda.....	138
5.1.1	Iniciación al mecanismo de estructura de la banda	138
5.1.2	Relación que describe la red de líneas	140
5.1.3	Predicción de la evolución del límite de elasticidad	141
5.1.4	Diagrama fuerza de laminación – tensión	142
5.2	Modelo de fuerza de laminación	143
5.2.1	Descripción de un modelo.....	143
5.2.2	Validación experimental del modelo.....	145
5.3	Transferencia de rugosidad.....	147
5.3.1	Consideraciones experimentales	147
5.3.2	Efecto de las propiedades de la banda.....	147
5.3.3	Efecto de los parámetros de proceso.....	149
5.3.4	Discusión	151
5.4	Conclusión	153
5.5	Datos técnicos del tren.....	153
5.6	Dimensiones de la banda.....	153
5.6.1	Dimensiones de bobina.....	154
5.6.2	Producción.....	154

5.6.3	Datos del Tren.....	154
6	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	155
6.1	Introducción/definición	155
6.2	Origen y análisis inicial	158
6.3	Identificación.....	159
6.4	Evolución y análisis histórico del defecto.....	162
6.4.1	Análisis del año 2006	163
6.4.1.1	Producción de DR y SR	163
6.4.1.2	Toneladas de DR y SR con defecto	165
6.4.1.3	Porcentaje toneladas de DR y SR con defecto.....	165
6.4.2	Análisis del año 2007	166
6.4.2.1	Producción de DR y SR	166
6.4.2.2	Producción de DR menor del 10% reducción	167
6.4.2.3	Porcentaje toneladas de DR y SR con defecto.....	167
6.4.2.4	Toneladas de DR y SR con defecto	168
6.4.2.5	Porcentaje toneladas de dr menor del 10% reducción con defecto.....	168
6.4.3	Análisis del año 2008	169
6.4.3.1	Producción de DR y SR	169
6.4.3.2	Producción de DR menor del 10% reducción	169
6.4.3.3	Toneladas de DR y SR con defecto	170
6.4.3.4	Porcentaje toneladas de DR y SR con defecto.....	170
6.4.3.5	Porcentaje toneladas de DR menor del 10% con defecto	171
6.4.4	Análisis del año 2008	171
6.5	Interacción entre el rodillo anti-crimping y la planitud de la banda en el temperizado	182

7 METODOLOGÍA.....	185
7.1 Plan de investigación	185
7.2 Condiciones de simulación.....	186
7.3 Análisis estático del efecto del rodillo anti-crimping en un tren témper	189
7.3.1 influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping.....	190
7.3.1.1 Defecto inicial de planitud de 3mm de altura.....	191
7.3.1.2 Para un defecto inicial de planitud de 1mm de altura.	195
7.3.1.3 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud de la banda	196
7.3.1.4 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la tensión de compresión transversal a la banda.....	197
7.3.1.5 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la curvatura de banda	199
7.3.1.6 Influencia de la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro.....	201
7.3.1.7 Riesgo de abolladuras	204
7.3.1.8 Influencia de la tensión de banda.....	205
7.3.2 Influencia del diámetro del rodillo anti-crimping en la amplitud de la planitud de la banda y curvatura.....	205
7.3.2.1 Influencia del diametro del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud de la banda	206
7.3.2.2 Influencia del radio del rodillo anti-crimping sobre la curvatura de banda	207
7.3.2.3 Influencia del radio del rodillo anti-crimping sobre la tensión de compresión transversal a la banda	207
7.3.3 Influencia de la corona del rodillo anti-crimping. en la amplitud de la planitud de la banda	208
7.3.4 Conclusiones análisis estático	209
7.3.4.1 Conclusiones del análisis estático de la posición vertical del rodillo anti-crimping	210
7.3.4.2 Conclusiones del análisis estático del radio del rodillo anti-crimping.....	211

7.3.4.3 Conclusiones del análisis estático de la corona del rodillo anti-crimping	212
7.4 Análisis dinámico del efecto del rodillo anti-crimping en un tren témp	213
7.4.1 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping	214
7.4.1.1 Influencia sobre la amplitud de la planitud de la banda	215
7.4.1.2 INFLUENCIA SOBRE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LA BANDA	216
7.4.1.3 Influencia sobre la curvatura de banda	217
7.4.2 Influencia de la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro	217
7.4.2.1 Influencia sobre la amplitud de la planitud de la banda	217
7.4.2.2 Influencia sobre la tensión de compresión transversal a la banda	218
7.4.2.3 Influencia sobre la curvatura de banda	219
7.4.3 Conclusiones análisis dinámico	221
7.4.3.1 Conclusiones del análisis dinámico de la posición vertical del rodillo anti-crimping	221
7.4.3.2 Conclusiones del análisis dinámico de la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro	222
7.5 Análisis mediante minería de datos e inteligencia artificial	223
7.5.1 Introducción.....	223
7.5.2 Materiales y métodos empleados en el análisis	224
7.5.2.1 Métodos de Detección de Espúreos	224
7.5.2.2 Splines Regresivos Multivariantes Adaptativos – (MARS).....	232
7.5.3 Eliminación de espúreos	234
7.5.3.1 DESARROLLO DEL MODELO	237
7.5.4 Conclusiones del análisis basado en minería de datos e inteligencia artificial	245
8 APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS	247
8.1 APORTACIONES	247

8.1.1 Aspecto económico	248
8.2 Líneas futuras	249
VARIABLES DEL SISTEMA SOFTDETECT	251
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	255
Acería	255
Calidad	264
Técnicas de análisis y estadística	267
BIBLIOGRAFÍA.....	271

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Corte transversal de una chapa de hojalata electrolítica.	21
Figura 2.2 Envases de hojalata, envases de fácil apertura, tapones corona.	24
Figura 2.3 Hojalata en bobinas y en hojas.	25
Figura 2.4 Esquema del proceso Siderúrgico.	26
Figura 2.5 Ejemplos de los diferentes tipos de hojalata.	34
Figura 2.6 Hojalata DWI.	36
Figura 2.7 Latas de fácil apertura.	38
Figura 2.8 Tapones corona.	38
Figura 2.9 Evolución del reciclado de acero para embalajes en Europa.	40
Figura 2.10 Reciclado de los principales materiales de envases en Europa.	41
Figura 2.11 Reciclado de Chatarra.	41
Figura 2.12 Almacenaje de Chatarra.	42
Figura 2.13 Ciclo de reciclado.	42
Figura 2.14 Proceso de Fragmentación.	43
Figura 2.15 Proceso de Desestañado.	43
Figura 2.16 Evolución del reciclado en España.	44
Figura 2.17 Evolución de los ratios de reciclaje para envases de acero en Europa.	44
Figura 2.18 Emisiones de CO ₂	45

Figura 2.19 Reciclaje de los principales materiales para envases en Europa	45
Figura 3.1 Horno de precalentamiento.	48
Figura 3.2 Tren desbastador.	48
Figura 3.3 Tren acabador o Steckel	49
Figura 3.4 Tren desbastador	49
Figura 3.5 Bobinadora	49
Figura 3.6 Almacenaje de bobinas	51
Figura 3.7 Esquema simplificado de la fabricación de chapa galvanizada	51
Figura 3.8 Descripción de las partes principales de un Tren Tándem	54
Figura 3.9 Tipos de configuración de una caja de laminación	55
Figura 3.10 Otros tipos de configuración de una caja de laminación	55
Figura 3.11 Mecanismos principales de una caja de laminación	57
Figura 3.12 Dibujo esquemático de una ampuesa.	58
Figura 3.13 Offset entre los cilindros de trabajo y los de apoyo.	61
Figura 3.14 Distintos efectos del Bending.	61
Figura 3.15 Desplazamiento con cilindros de trabajo CVC	62
Figura 3.16 Grado de libertad de los cilindros de trabajo.	62
Figura 3.17 Rodillo flexor entre dos cajas de laminación	63
Figura 3.18 Transportador de Viga galopante	65
Figura 3.19 Equipos en el lado de entrada	66
Figura 3.20 Parámetros del tren témpér	70
Figura 3.21 Control de tensión: a) por gap y b) por velocidad.	73

Figura 3.22 Galga de Rayos X.....	74
Figura 3.23 Diagrama simplificado con los diferentes lazos de control del tren, sensores y actuadores (H, sistema hidráulico; M control motores).....	76
Figura 3.24 Ventana principal de la aplicación de adquisición con ventanas secundarias.....	79
Figura 3.25 Ventana principal de la aplicación de análisis.....	80
Figura 3.26 Ventana principal del gestor de modelos.	81
Figura 3.27 Monitorización del tren con modelo SOM.	82
Figura 4.1 Compresión no homogénea y homogénea.	87
Figura 4.2 Distribución de presiones según Von Kármán del tipo friction-hill.....	88
Figura 4.3 Diagrama de fuerzas durante el proceso de laminación.....	89
Figura 4.4 Geometría considerada teniendo en cuenta la deformación del rodillo en el modelo de Smith.....	92
Figura 4.5 Curvas de Trinks para la resolución gráfica del modelo basado en Von Kármán. [87]	93
Figura 4.6 Distribución de presiones según Tselikov.....	94
Figura 4.7 Distribución de presiones según Nadai.....	96
Figura 4.8 Distribución de presiones según Nadai.....	97
<i>Figura 4.9 Asunciones del modelo de Orowan.</i>	<i>99</i>
Figura 4.10 Zona de deformación elástico-plásticas según Jortner	103
Figura 4.11 Gráficas del método de Davies	105
Figura 4.12 Distribución de presiones constante según Roberts y las 3 longitudes efectivas.....	106

Figura 4.13 Efectos sobre el equilibrio caja-material de un proceso de laminado en frío.....	108
Figura 4.14 Ecuaciones del control de espesor de una caja simple.....	111
Figura 4.15 Regulador de espesor Feedback.....	116
Figura 4.16 Sistema de control de la posición del entrehierro.....	117
Figura 4.17 Regulador de espesor Feedback, para espesores finos.....	117
Figura 4.18 Regulador de espesor Feedforward.....	119
Figura 4.19 Sistema de Control de espesor mediante galgas con compensación de excentricidad de los cilindros.....	122
Figura 4.20 Factor de atenuación de las galgas como función del error del módulo del tren.....	123
Figura 4.21 Efecto del módulo del tren en el Factor de Atenuación.....	124
Figura 4.22 Estructura de un regulador de excentricidades.....	125
Figura 4.23 Resultados medidos de la Regulación de la Excentricidad.....	126
Figura 4.24 Regulador de espesor mediante flujo de masa.....	127
Figura 4.25 Modelo basado en el Control Feedback.....	128
Figura 4.26 Regulación de Elongación.....	129
Figura 4.27 Componentes de desviación de una caja de un tren de laminación.....	131
Figura 4.28 Efecto del ancho de banda en el alargamiento del tren y módulo.....	131
Figura 4.29 Efectos de la velocidad en la Fuerza del cilindro.....	132
Figura 4.30 Resultados de la simulación que muestran una interacción adversa de tensión.....	133

Figura 5.1 Propagación de las líneas a través del entrehierro, durante el proceso de temperizado.....	139
Figura 5.2 Líneas de Piobert-Lüders.....	139
Figura 5.3 Detalle de una línea de Piobert-Lüders.....	141
Figura 5.4 Determinación experimental del diagrama Fuerza de Laminación-Tensión	143
Figura 5.5 Zonas en el entrehierro y distribución de tensiones.....	144
Figura 5.6 Comparación entre datos experimentales y calculados para un acero estándar de 1mm de espesor.	146
Figura 5.7 Influencia del límite de elasticidad y el diámetro del cilindro en la transferencia de rugosidad (cilindros rectificadas).....	148
Figura 5.8 Influencia del valor inicial de rugosidad de la banda en la transferencia.	149
Figura 5.9 Influencia de una tensión de entrada equivalente a una de salida, en la transferencia de rugosidad.....	150
Figura 5.10 Comparación de transferencia de rugosidad entre cilindros rectificadas ($R_a = 1,7 \mu\text{m}$) y cilindros granallados ($R_a = 2,0 \mu\text{m}$)	150
Figura 5.12 Modelización de la transferencia de rugosidad con la presión reducida media para cilindros rectificadas.	151
Figura 5.11 Modelización de la transferencia de rugosidad con la presión máxima para cilindros granallados.....	152
Figura 6.1 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 1	156
Figura 6.2 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 2	156
Figura 6.3 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 3	156
Figura 6.4 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 4	157
Figura 6.5 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 5	157

Figura 6.6 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 6	157
Figura 6.7 Figura esquemática de la configuración de un tren témpor.....	161
Figura 6.8 Evolución en tanto por mil de toneladas de la producción 2003-2008.....	162
Figura 6.9 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2006.	164
Figura 6.10 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2006..	164
Figura 6.11 Toneladas producidas con defecto en 2006 en ambos tipos de reducción.	165
Figura 6.12 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2006.	165
Figura 6.13 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2006.....	166
Figura 6.14 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2007.	166
Figura 6.15 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2007..	167
Figura 6.16 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2007	167
Figura 6.17 Toneladas producidas con defecto en 2007 en ambos tipos de reducción.	168
Figura 6.18 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2007.....	168
Figura 6.19 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2008.	169
Figura 6.20 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2008..	169
Figura 6.21 Toneladas producidas con defecto en 2008 en ambos tipos de reducción.	170

Figura 6.22 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2008	170
Figura 6.23 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2008.	171
Figura 6.24 Bobinas con defecto en los dos tipos de reducción (2008).....	172
Figura 6.25 Toneladas de defecto en los dos tipos de reducción (2008).....	173
Figura 6.26 Bobinas con defecto en las 3 etapas de Doble Reducción (2008)	173
Figura 6.27 Toneladas de defecto en las 3 etapas de Doble Reducción (2008)	174
Figura 6.28 Meses con mayor número de bobinas con defecto (2008)	175
Figura 6.29 Toneladas del defecto dentro de la Doble Reducción (2008) ...	176
Figura 6.30 Bobinas defecto dentro de la Doble Reducción (2008).....	176
Figura 6.31 Toneladas de defecto por dos proveedores tándem (2008). ...	177
Figura 6.32 Efecto del rodillo anti-crimping en un tren témpor.....	183
Figura 6.33 Posibles defectos de calidad a la entrada de un tren témpor. ..	183
Figura 7.1 Esquema representativo de la entrada de un tren témpor.	186
Figura 7.2 Vista de perfil parcial de la entrada del tren témpor.....	188
Figura 7.3 Vista parcial en 3D de la entrada del tren témpor.....	188
Figura 7.4 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Banda con borde ondulado con profundidad de 125mm.....	190
Figura 7.5 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Banda con borde ondulado con profundidad de 250mm.....	190
Figura 7.6 Configuración entrada, banda con defecto de planitud de 3mm de altura.	191

Figura 7.7 Planitud con defecto inicial de 3mm de altura.	192
Figura 7.8 Planitud de la banda variando rodillo A.C. (0–350mm).	193
Figura 7.9 Esquema de la entrada de un tren témper	193
Figura 7.10 Diferencial tensión interna, imbricación rodillo A.C. de 5mm... ..	194
Figura 7.11 Diferencial tensión interna, imbricación rodillo A.C. de 25mm.	194
Figura 7.12 Efecto sobre banda de una posición de 25mm/ línea de paso.	195
Figura 7.13 Perfil de planitud, defecto inicial de 1mm de altura.	195
Figura 7.14 Posición vertical del Rodillo A.C. igual a cero.....	196
Figura 7.15 Posición vertical del rodillo A.C. y planitud.	196
Figura 7.16 Planitud del ancho de banda con rodillo A.C. en 200mm	197
Figura 7.17 Influencia rodillo A.C. sobre tensión de compresión transversal entrehierro de 676mm.	198
Figura 7.18 Tensión de compresión transversal dependiendo de la posición vertical del rodillo A.C.....	199
Figura 7.19 Representación 3D de la banda con máxima curvatura de banda a la entrada.....	200
Figura 7.20 Función de curvatura extraída de iteraciones del modelo matemático.....	200
Figura 7.21 Posición vertical- curvatura de la banda, entrehierro 676mm... ..	201
Figura 7.22 Tensión transversal función rodillo A.C. y entrehierro.	202
Figura 7.23 Diferencial de tensión interna función del entrehierro.....	202
Figura 7.24 Efecto de la distancia entre rodillo A.C. y entrehierro (70mm borde e imbricación 150mm).	203

Figura 7.25 Efecto de la distancia entre rodillo A.C. y entrehierro (70mm y espesor 0.27mm)	203
Figura 7.26 Simulación apareciendo cazuelas (tensión tracción 2,8MPa)..	204
Figura 7.27 Influencia de la tensión de la banda en la generación de cazuelas.....	205
Figura 7.28 Planitud función del diámetro del rodillo A.C.	206
Figura 7.29 Curvatura de banda función del radio del rodillo A.C.....	207
Figura 7.30 Tensión de compresión transversal función radio del rodillo A.C.	208
Figura 7.31 Planitud función corona del rodillo A.C. con defecto de banda inicial de borde ondulado.	209
Figura 7.32 Optimización de la planitud. Análisis estático.	211
Figura 7.33 Rango de optimización de la planitud.	212
Figura 7.35 Análisis dinámico. a) Tensión banda 50MPa. b) Posición vertical del tensiómetro igual a su radio.	214
Figura 7.36 Análisis dinámico. a) Posición vertical del rodillo A.C. igual a su radio. b) Banda en movimiento con el mapa de planitud.	214
Figura 7.37 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud de la banda	215
Figura 7.38 Amplitud de la planitud de la banda a lo largo del ancho de banda para una posición vertical del rodillo anti-crimping de 200mm.....	216
Figura 7.39 Variación de la tensión de compresión transversal a la banda en función de la posición vertical del rodillo anti-crimping	216
Figura 7.40 Variación de la curvatura de banda respecto a la posición vertical del rodillo anti-crimping. Análisis Dinámico.....	217
Figura 7.41 Variación de la planitud sobre la posición vertical para distancias rodillo A.C.-entrehierro, 500 y 676mm.	218

Figura 7.42 Variación de la tensión de compresión transversal sobre la posición vertical para distancias del rodillo-entrehierro, 500 y 676mm.....	219
Figura 7.43 Variación de la tensión de compresión a lo largo de la banda para distancia rodillo A.C-entrehiero de 500mm y posición vertical de 100mm.....	220
Figura 7.44 Variación de la tensión de compresión a lo largo de la banda para distancia del rodillo A.C.-entrehiero de 676mm y posición vertical de 100mm.	220
Figura 7.45 Rangos de optimización de la planitud, tensión de compresión y curvatura en función de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Análisis dinámico.	222
Figura 7.46 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo basado en los Autovalores de la Muestra	235
Figura 7.47 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo BACON (Distancias de Mahalanobis).	236
Figura 7.48 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo BACON (Distancias Euclídeas).....	237
Figura 7.49 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización del Radio.....	239
Figura 7.50 Validación del modelo de Radio. Valores Reales vs Valores Predichos.....	240
Figura 7.51 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Posición Vertical.....	241
Figura 7.52 Validación del modelo de Posición vertical. Valores Reales vs Valores Predichos.....	242
Figura 7.52 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Curvatura.	243
Figura 7.53 Validación del Modelo de Curvatura. Valores Reales vs Valores Predichos.....	244
Figura 8.1 Estimación económica del rechazo por el defecto de pliegue.	249

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Composición de la hojalata.....	27
Tabla 2-2 Designación del temple para hojalata.....	30
Tabla 2-3 Designación del temple para hojalata (continuación).....	31
Tabla 2-4 Pasivación de la hojalata	32
Tabla 3-1 Datos técnicos del tren	68
Tabla 3-2 Datos técnicos del tren (continuación).....	69
Tabla 3-3 Datos del tren	69
Tabla 4-1 Dependencia del material y anchura de la plasticidad dimensional, parámetro 'a'.....	113
Tabla 4-2 Dependencia del material y anchura de la plasticidad dimensional, parámetro 'a' (continuación).....	114
Tabla 4-2 Respuesta de las galgas frente a perturbaciones.....	121
Tabla 6-1 Toneladas de L5 y el número de bobinas año 2008	175
Tabla 6-2 Bobinas laminadas trenes Tándem de la planta B (2008)	177
Tabla 6-3 Bobinas con defecto L5 provenientes de Recocido Base.....	178
Tabla 6-4 Evolución del defecto bobinas templadas (2008)	178
Tabla 6-5 La sección máxima, media y mínima de la chapa con defecto	179
Tabla 6-6 Análisis experimental del defecto en planta en 2008.....	179
Tabla 6-7 Análisis experimental con cilindros de trabajo texturados.....	180
Tabla 6-8 Análisis experimental con rodillo A.C.....	180
Tabla 6-9 Varias pruebas experimentales 2006-2008 en el tren témpér	180

Tabla 6-10 Varias pruebas experimentales 2006-2008 en el tren témpor ...	181
Tabla 6-10 Varias pruebas experimentales 2006-2008 en el tren témpor (continuación).....	181
Tabla 7-1 Configuración de distancias del rodillo anti-crimping.....	187
Tabla 7-2 Diferencia de tensión interna ($\Delta\sigma$) en diferentes puntos entre el centro y el borde de la banda.	192
Tabla 7-3 Ecuación del modelo de optimización del Radio.	238
Tabla 7-4 Ecuación del modelo de optimización de la Posición Vertical.	241
Tabla 7-5 Ecuación del modelo de optimización de la Curvatura.....	243

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

1 PLANTEAMIENTO, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

1.1 PLANTEAMIENTO

El modelo clásico de *cadena de valor* continúa siendo una herramienta de análisis clave para la planificación estratégica en la industria del acero, [Porter 85]. Su objetivo último de maximizar la creación de valor a la vez que se minimizan los costes, constituye actualmente una premisa de actuación del todo vigente y necesaria; sin embargo, ya no es suficiente [Powell 01]. El dinamismo actual del sector acero, su gran influencia en sectores económicos clave como las conservas y bebidas, construcción, energía o automoción [IISI 07d, IISI 07c], la deslocalización de los principales focos de producción y demanda, su fuerte dependencia de recursos naturales y energéticos [IISI 07a], o la tendencia actual de fusiones y alianzas con el fin de mitigar la dispersión de las empresas productoras [IISI 08], obliga a las empresas a la constante innovación en gestión, producto y proceso para lograr mantener su competitividad en el mercado [Friedman 06]. En este entorno global, la ventaja competitiva sostenible

reside en la palabra clave conocimiento [Drucker 69, DE 00], siendo actualmente la capacidad para generarlo, adquirirlo, codificarlo, transferirlo, aplicarlo y reutilizarlo de forma óptima, el principal recurso estratégico y factor de diferenciación para la generación de riqueza por parte de las empresas [Alvin 06]. Esta situación da lugar a nuevos modelos de negocio basados en el concepto de cadena de revalorización del conocimiento [Landry 06], con el objetivo de capitalizar los activos intangibles de la empresa mediante la asimilación, de forma efectiva, de los flujos crecientes de información disponible.

El grado de desarrollo tecnológico asociado al control y supervisión avanzada de procesos industriales complejos, genera grandes volúmenes de información que es almacenada en bases de datos distribuidas a lo largo del proceso productivo. A medida que la dimensionalidad (número de variables), complejidad, o número de muestras almacenadas son demasiado grandes para un análisis manual eficiente, surge la necesidad de aplicar nuevas metodologías para el tratamiento de información masiva y extracción de conocimiento a partir de bases de datos, [Fayyad 96b]. Una parte fundamental de este proceso, denominada minería de datos, engloba un amplio conjunto de técnicas, desde el aprendizaje relacional hasta la estadística avanzada o las redes neuronales, que facilitan la comprensión de los datos, permitiendo comprender el proceso subyacente. Durante los últimos años, este tipo de técnicas han venido siendo aplicadas con éxito para el modelado y optimización de procesos industriales de fabricación de acero.

Una de las razones más importantes y que revelan la complejidad y la cantidad de variables que influyen en el problema que supone, el defecto de “flor de skin-pass” en el proceso siderúrgico del acero para su transformación en hojalata, es el alto rechazo en el control de calidad de la misma, resultante del proceso de laminación en frío.

Este rechazo en el control de calidad en varios procesos del flujo de producción de la hojalata está íntimamente relacionado con el coste económico final del producto hojalata. Y desde el punto de vista tecnológico de la eficiencia y productividad de los procesos englobados. En esta cadena de procesos que conforman la fabricación de la hojalata cuanto antes se pueda detectar, analizar y poner fin a este defecto menores consecuencias económicas tendrá sobre el producto final.

Esta tesis versa sobre la optimización del control del segundo proceso de laminación en frío dentro de la cadena de fabricación de la hojalata, el ténper o skin-pass, para la eliminación del defecto superficial de pliegue. Dado el gran

impacto económico que supone este defecto, al generar un ratio de rechazo elevado en la producción del proceso témpor, era necesario analizar y estudiar toda la nube de variables que influyen en la aparición del defecto, determinar aquellas más relevantes, de mayor peso específico y generar un modelo que permita la automatización del proceso en condiciones óptimas de trabajo y calidad.

1.2 OBJETIVOS

En esta tesis se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

1. Estudio, análisis, evolución y cuantificación de la repercusión del defecto superficial sobre la producción del proceso de skin-pass.
2. Identificación y clasificación de los defectos superficiales de pliegue, de acuerdo a criterios de relevancia y fiabilidad, que afectan al aumento del rechazo de la producción del proceso skin-pass.
3. Identificación de las posibles variables del proceso que estén implicadas en el origen del defecto superficial de pliegue.
4. Desarrollo y aplicación de algoritmos y herramientas automatizadas para la determinación del peso específico de las diferentes variables influyentes en la generación del defecto superficial de pliegue.
5. Diseño de un modelo matemático capaz de cumplir las necesidades exigidas para la simulación y recreación de la causa-defecto superficial en un tren skin-pass de acero, hojalata.
6. Aplicación del diseño de modelo matemático y algoritmia desarrollada en entorno industrial y real para la validación de los elementos desarrollados.

1.3 ESTRUCTURA

Esta tesis está estructurada en las secciones que se describen a continuación:

- **LA HOJALATA:**

En esta sección se describe con detalle el sector de la hojalata como uno de los productos finales de mayor desarrollo tecnológico dentro del sector siderúrgico del acero, haciendo especial hincapié en los diferentes tipos de hojalata dependiendo de su uso final dado que esto influirá entre otros puntos en el tipo de ruta metalúrgica y modelo de control y regulación en los procesos.

- **EL PROCESO SIDERÚRGICO:**

Aquí se describe con detalle el entorno industrial del proceso de fabricación de la hojalata, acotando cada vez en mayor medida la cadena de producción hasta llegar al proceso donde se genera el defecto superficial de pliegue a estudio. Se analizan los dos procesos de la laminación en frío por su influencia sobre la ruta metalúrgica y características mecánicas y especificaciones finales del producto final requerido por el cliente.

- **MODELOS DE CONTROL:**

Se ofrece una perspectiva histórica de la evolución de los sistemas de control y modelado de los procesos de laminación en frío, realizando posteriormente, un recorrido por los diversos reguladores que se han desarrollado, para terminar con una referencia a aquellos que están implantados y en desarrollo en la industria siderúrgica.

- **ASPECTOS MECÁNICOS Y METALÚRGICOS DE PROCESOS DE LAMINACIÓN TÉMPER:**

En esta sección se describen los aspectos mecánicos y metalúrgicos de los procesos témpér, entrando en detalle en la modelización del proceso y haciendo hincapié en la transferencia de rugosidad como uno de los objetivos primordiales del proceso témpér. Finalmente se da una visión de los datos técnicos de diseño, limitaciones de producción del proceso témpér, así como de la capacidad de producción.

- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA:

Esta sección se centra en la descripción del problema, origen, análisis inicial, identificación del defecto superficial entrando en profundidad en la evolución y análisis histórico del defecto.

- METODOLOGÍA:

Aquí se describe y analiza tanto desde un punto de vista estático como dinámico el rodillo anti-crimping del proceso témper llegando a un modelo matemático del proceso que simula la generación del defecto superficial. Al final de este capítulo se analiza el defecto mediante técnicas basadas en minería de datos para llegar a un sistema combinado que ratifica el modelo matemático empírico optimizado. Para todos los análisis se presentan las conclusiones parciales.

- CONCLUSIONES, APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS:

Por último, esta sección resume las conclusiones derivadas del trabajo realizado y marca las líneas de actuación en que podrían ser acometidas en investigaciones posteriores.

CAPÍTULO 2

PRODUCTO EN ESTUDIO: LA HOJALATA

2 LA HOJALATA

2.1 INTRODUCCIÓN

La hojalata es una chapa de acero, de poco espesor (inferior a 0,5 mm) y bajo contenido en carbono, recubierta electrolíticamente de una capa de estaño, comercialmente puro. Sus principales ventajas son:

- **Resistencia:** Buenas características mecánicas, deformable, fácil de fabricar con precisión y productividad. Resistencia a los agentes externos. Ofrece igualmente una alta opacidad, evitando la degradación de los alimentos causada por la acción de la luz.
- **Bajo peso:** La Hojalata Electrolítica es más liviana en comparación con otros materiales de empaque, por lo tanto se hace más fácil su manipulación y almacenamiento. Igualmente, tiene bajos costos de transporte.

- **Larga vida:** Los productos naturales envasados en hojalata se conservan por largos periodos sin perder sus propiedades organolépticas, ni su valor nutricional. No requiere de preservativos para prolongar la conservación de los alimentos, ya que esto se logra en el proceso de envasado (vacío y esterilización).
- **Acabado superficial del producto final:** Buena soldabilidad, estaño-plomo y eléctrica, resistente a la corrosión, estética. Su superficie permite excelentes impresiones litográficas, a la vez que el envasador puede utilizarla como medio publicitario o de decoración. Así mismo tiene una buena adherencia a barnices y lacas y nula toxicidad.
- **Ahorro energético:** Bajo consumo energético en su producción (inferior al vidrio y al aluminio).
- **Hermeticidad:** Estanqueidad perfecta a los gases, como oxígeno, nitrógeno o dióxido de carbono, así como al agua, a la radiación ya los microorganismos.
- **Diversidad:** Con la hojalata se puede elaborar todo tipo de envases, en varios tamaños que pueden contener diversidad de productos sólidos, líquidos o gaseosos.
- **Reciclaje:** Económica y fácil de reciclar y reutilizar a partir de los envases usados o latas contenidas recuperados magnéticamente de los residuos sólidos urbanos (RSU). Además el envase de hojalata es totalmente degradable, convirtiéndose en materia inorgánica por efectos del oxígeno y el ambiente.

A pesar del fino espesor de la hojalata, su estructura es muy compleja. La Figura 2.1 muestra un esquema del corte transversal de una chapa de hojalata electrolítica.

La hojalata está constituida por cinco capas, cada una de las cuales tiene diferente función:

1. Acero base: La capa central. Su misión en la hojalata es conferirle una resistencia mecánica difícil de conseguir por otro tipo de materiales. El acero empleado puede ser de varias calidades y el espesor suele variar entre los 0,5 mm y los 0,13 mm de la hojalata de doble reducción. El tipo de

acero influye en la corrosión, acelerándola o retardándola en función de los elementos de aleación que contenga y de la forma de cristalización.

2. Aleación hierro-estaño: constituida por el compuesto intermetálico Fe-Sn₂. Por sus características electroquímicas, actúa como barrera contra la corrosión. Para su efectivo comportamiento, más que la cantidad, es importante su continuidad.
3. Estaño metálico: el estaño tiene innumerables ventajas, las cuales han hecho de éste el elemento más importante en la protección del acero usado para envases; en muchos alimentos actúa como simple barrera contra la corrosión, ayuda a la soldabilidad, es una excelente base para litografiar y aplicar lacas. Con alimentos desestañadores actúa como elemento de sacrificio.
4. Película de pasivación: permite, según su naturaleza, mejorar la resistencia de la hojalata a la sulfuración, a la oxidación y la herrumbre. Acondiciona, también, la adherencia de los barnices, tintas, lacas, etcétera.
5. Película de aceite: protege la lámina de la humedad del aire y facilita su manejo. Es aplicada por un aceitador electrostático en ambas caras de la hoja.

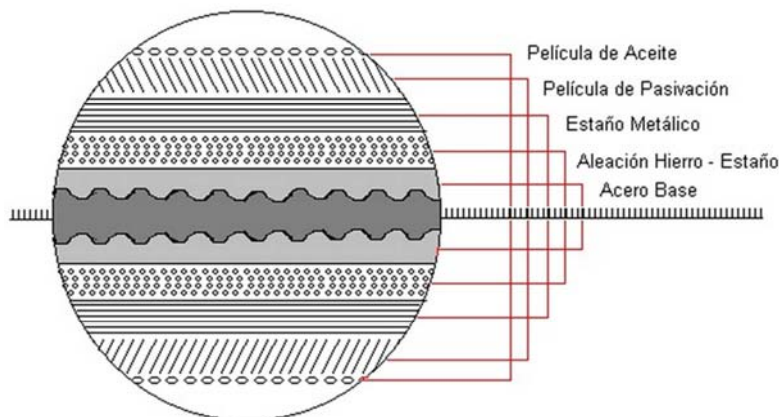


Figura 2.1 Corte transversal de una chapa de hojalata electrolítica.

El estaño es el recubrimiento básico de la hojalata por su protección electroquímica del acero. Esta capa que se le aplica al acero es la responsable de la mayor o menor protección contra la corrosión y de la duración de la hojalata, todo esto en función de su espesor y continuidad, y del tamaño de grano de estaño.

El barnizado, lacado y litografiado son otras capas que aplica el fabricante de envases y que debido al alto precio del estaño son cada vez más utilizadas como protección adicional.

La producción de la hojalata se consigue mediante el paso de una banda de acero por unas cubas donde se encuentran sumergidos unos ánodos de estaño. La regulación del proceso de deposición electrolítica y por tanto la capa de recubrimiento de estaño aplicada, se consigue mediante la aplicación de una corriente proporcionada por una batería de rectificadores.

El problema de defecto en la capa de estaño es muy grave ya que acelera la corrosión, lo cual puede acarrear serios problemas de salud pública en caso de que los alimentos protegidos en ese envase se corrompan. El problema de exceso de recubrimiento es menor, pero empieza a ser relevante al no poder aplicarse correctamente todas las lacas y pinturas que embellecen los envases.

El proceso de laminación en frío tiene el mismo fundamento que el de la laminación en caliente. Produce una deformación permanente haciendo pasar el material laminado en caliente entre dos cilindros cuya separación es inferior al espesor del material de partida. Esto es posible gracias a la ductilidad del acero.

2.2 HISTORIA DEL PRODUCTO HOJALATA

El hombre primitivo conoció el estaño antes que el hierro por su más sencilla obtención y una estabilidad frente a la oxidación comparable al oro y a la plata. De ahí que la edad de Bronce (3.500 a.C.) preceda a la del Hierro. Los orígenes de la hojalata datan de la época de los antiguos griegos; según una descripción de Theophrastus; "...se sumergió acero al rojo vivo en un recipiente de estaño, añadiendo a este estaño...".

La hojalata industrial aparece por primera vez en Alemania (1340) y durante siglos su proceso productivo fue mantenido como un secreto de estado, envidiado fundamentalmente por los ingleses que se veían obligados a exportar el estaño a la baja Sajonia. Esa situación se resolvió en el siglo XVI gracia al espionaje industrial.

Posteriormente a esto y tras pasar por Inglaterra, que por muchos años dominó el mercado de la hojalata, la primera fábrica de hojalata española se emplazó en Juzcar hacia el año 1731.

El espectacular desarrollo del producto se debió a la aparición de las conservas. Los soldados y marineros dependían en gran medida de productos alimenticios conservados en salazón y técnicas que en general eliminaban las proteínas. Los navegantes llevaban a bordo frecuentemente animales vivos, que sin embargo muchas veces enfermaban y morían, limitando así la alimentación a carnes saladas y similares. La falta de alimentos frescos produjo muchas veces manifestaciones carencias tan temidas como el escorbuto.

Napoleón había reconocido el problema, ofreciendo un premio de 12.000 francos por un procedimiento para la conservación de productos alimenticios frescos. Este premio lo obtuvo el francés Nicholas Appert, que inventó el procedimiento de esterilización térmica en 1800, utilizando botellas de vidrio, cerrándolas con corcho y alambre y puestas al baño maría.

El 25 de Abril de 1810, el inglés Peter Durand obtuvo la patente no. 3372, que tuvo por objeto la conservación de productos alimenticios en envases de hierro estañados. En los años 1813 y 1814 el ejército inglés y la marina probaron conservas de carne en hojalata, con excelentes resultados. En el año 1820, Edgard Parry regresó de su primera expedición a las regiones árticas, elogiando los alimentos en latas que había llevado consigo. Más tarde, en 1911, algunas latas que él mismo había dejado en la región, fueron abiertas, encontrándose el producto en perfectas condiciones. Alrededor de 1830 aparecieron los primeros alimentos en latas en las tiendas inglesas y se consideraron entonces como algo exquisitos. Nació así la industria del envase de hojalata.

A partir de 1910 se empezó a experimentar con estañado electrolítico de planchas; en 1934 se inició el estañado de láminas, llegando al producto actual de hojalata de chapas tan finas y capas de estaño tan delgadas como nunca se había logrado anteriormente.

El consumo per cápita de hojalata en el año 2000 es un buen indicativo del desarrollo de un área. Así, en EEUU el consumo per cápita está alrededor de 10 Kg, en Japón unos 8 Kg y en Brasil aproximadamente 1 Kg.

2.3 USOS DE LA HOJALATA

Las propiedades del material marcan sus posibilidades de uso:

- **Conformabilidad:** Permite disponer de gran variedad de formatos y tamaños para envases que pueden ser decorados con atractivos dibujos y litografías.

- **Hermeticidad:** El acero base evita la filtración de gérmenes y bacterias mientras protege los alimentos de los efectos de la luz, temperatura y humedad.
- **Dureza:** La resistencia del acero base facilita la manipulación y el transporte de los envases de hojalata, evitando filtraciones o roturas y permitiendo su apilamiento con el consecuente ahorro de espacio.
- **Durabilidad:** Los envases de hojalata permiten mantener los productos contenidos en condiciones óptimas durante largos períodos de tiempo.
- **Compatibilidad:** La hojalata es compatible con una amplia variedad de alimentos.

La hojalata es el producto ideal para la fabricación de envases y embalajes que contengan alimentos, vegetales, pescados, etc. Así como bebidas carbonatadas o no, productos industriales, aerosoles, etc. A la vista de sus cualidades, las aplicaciones más usuales son los envases alimentarios en forma de tapas de fácil apertura, twistoff, fondos, tapones corona y cuerpos cilíndricos soldados de gran diámetro, embutidos y estirados. Por último citar la fabricación de envases industriales de fondos y cúpulas de aerosoles y tapas de gran diámetro.

La corrosión que experimenta un metal se debe a una reacción electroquímica entre éste y el ambiente que le rodea, formándose un compuesto similar a partir del cual fue obtenido dicho metal (óxido, sulfato, etc.). La corrosión puede clasificarse según las condiciones medioambientales que la produzcan.



Figura 2.2 Envases de hojalata, envases de fácil apertura, tapones corona.

A la laminación en frío pasan las bobinas de chapa laminadas en el tren de bandas en caliente. El metal adquiere aquí todas aquellas características que lo hacen ser una materia prima increíblemente dura a la vez que flexible, idónea para la fabricación de productos cotidianos como envases de hojalata, electrodomésticos, automóviles, etc. La laminación reduce el metal al espesor deseado y mejora sus propiedades metalúrgicas, los tratamientos térmicos posteriores le confieren ductilidad o flexibilidad y el temporizado le aporta la resistencia requerida para transformarlo en productos.

Existen ciertas diferencias en cuanto a los procesos de laminación en frío, tren tándem y tren témpor dependiendo del producto final a obtener. En esta tesis se va a tratar la línea dedicada a productos de hojalata.

El proceso sobre el que se va a investigar el defecto de laminación de un pliegue, defecto de “Flor de Skin-Pass”, denominado, tren témpor o Skin-Pass conforma el segundo proceso de laminación en frío.

La Figura 2.3 muestra el formato final de los productos del proceso de laminación en frío y hojalata, con destino a envases de hojalata, observándose el producto de hojalata tanto en bobinas como en hojas.

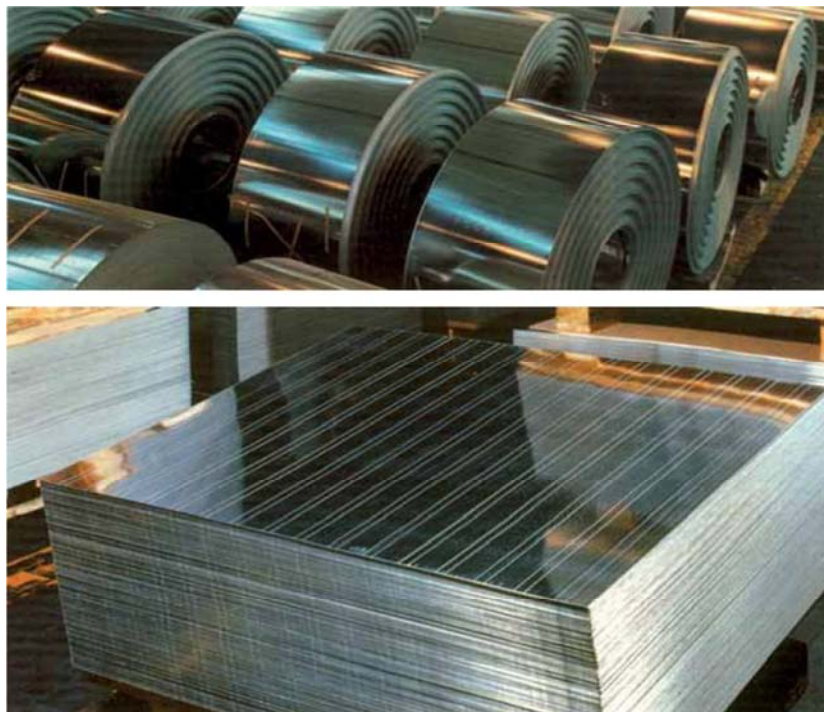


Figura 2.3 Hojalata en bobinas y en hojas.

Análisis y evaluación del proceso de skin-pass del acero de hojalata para la eliminación del defecto superficial de pliegue

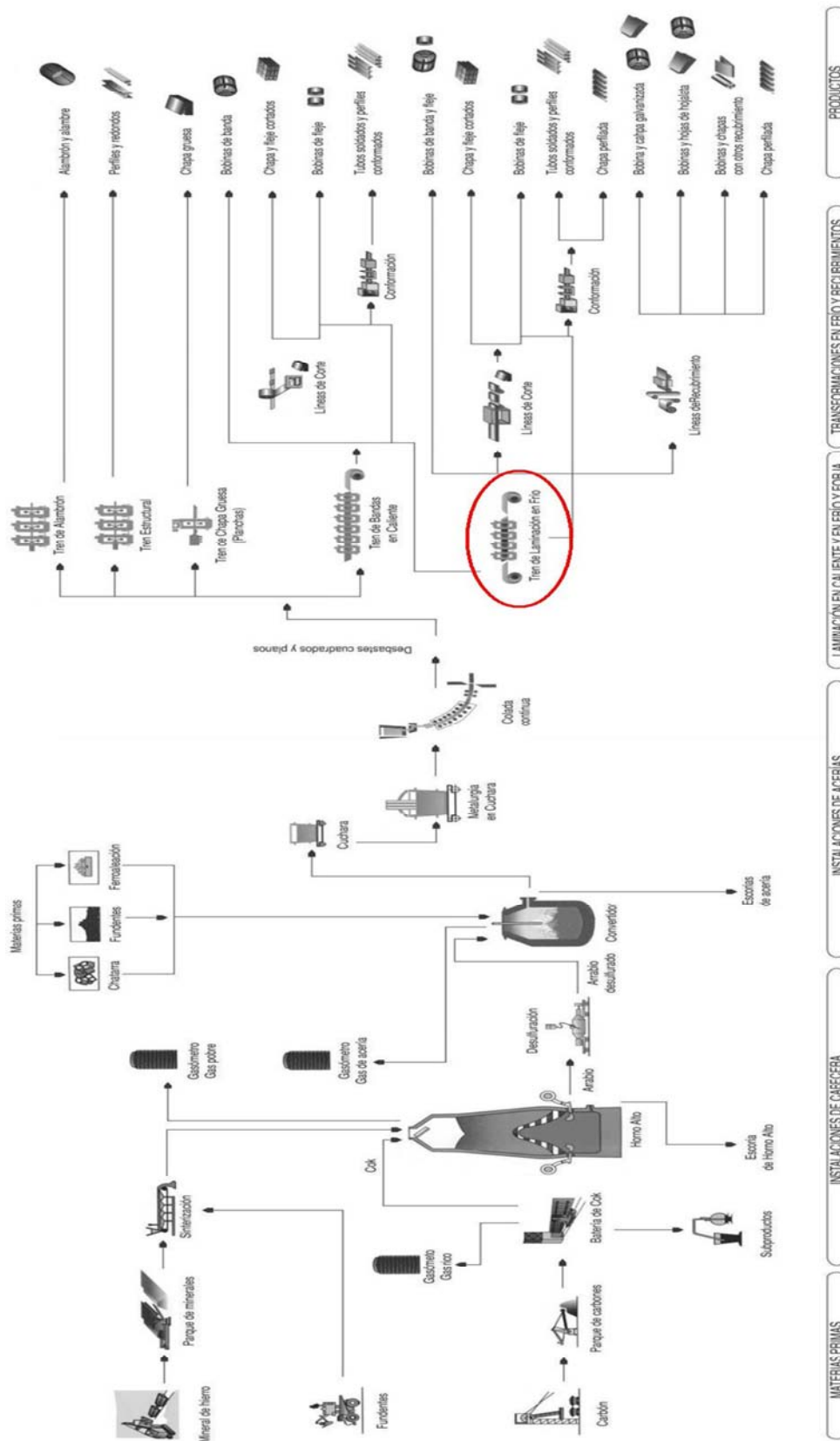


Figura 2.4 Esquema del proceso Siderúrgico.

2.4 DISEÑO DE PRODUCTO

La hojalata es un producto formado por una chapa de acero fino recubierta de estaño. Como producto de un gran acabado que es, precisa de un buen número de instalaciones para su obtención. Sin contar instalaciones comunes anteriores a la acería, que es donde se define una colada como destinada a hojalata, este material pasa por el Semicontinuo, Decapado, Tren Tándem, Líneas de Limpieza Electrolítica, Recocido Continuo o en Campana, Tren Témpor, Líneas de Preparación y Líneas de Estañado Electrolítico, exigiendo al final un empaquetado especial [UNE98][ACE98][VAR87].

Tabla 2-1 Composición de la hojalata

	Tipo D	Tipo L	Tipo MR
Carbono	0,120	0,130	0,130
Magnesio	0,600	0,600	0,600
Fósforo	0,020	0,015	0,020
Azufre	0,050	0,050	0,050
Silicio	0,020	0,020	0,020
Cobre	0,200	0,060	0,200
Níquel	0,150	0,040	0,150
Cromo	0,100	0,060	0,100
Molibdeno	0,050	0,050	0,050

Los parámetros clave de la hojalata son, aparte de sus dimensiones como bobina, el tipo de colada, el grado témpor, el acabado, el pasivado y el recubrimiento de estaño. En la acería se obtiene el acero base empleado en la fabricación de la hojalata, un acero suave con un contenido en carbono inferior al 0,13%. Hoy en día se obtiene por el procedimiento LD, con colada continua. Hay tres tipos de acero denominados D, L Y MR, cuyas composiciones químicas son las mostradas en la tabla 1 (en % máximo).

Así, en función del tipo de acero empleado, se puede clasificar la hojalata en tres tipos:

1. **Tipo "D"**: Es un acero calmado con aluminio que se utiliza cuando la hojalata se destina a embuticiones muy profundas y/o estirado ya que al no sufrir endurecimiento por envejecimiento garantiza la no aparición de líneas Lüders. Se utiliza sobre todo para la fabricación de botes de dos piezas, evitando la producción de poros y las segregaciones durante el estiramiento en el proceso de fabricación.
2. **Tipo "L"**: Es un acero con bajo contenido en metaloides y elementos residuales, para conseguir mejorar las características de resistencia a la corrosión.
3. **Tipo "MR"**: Es un acero menos restrictivo en metaloides y elementos residuales que el tipo L, y es el más utilizado en la mayoría de las aplicaciones de la hojalata.

Para el caso de la hojalata en el semicontinuo, los desbastes, previamente calentados en los hornos a temperaturas de laminación de 1.180 °C, se laminan en el tren reversible para reducir su espesor de 230-250 mm, hasta un chapón de 35-55 mm, y posteriormente en el tren acabador se transforma en una banda de espesor comprendido entre 1,8 y 2,3mm.

2.5 ESQUEMA DE LA RUTA DE LA HOJALATA

A pesar de su poco espesor, la estructura de la hojalata es muy compleja. La base es una chapa de acero sobre cuyas caras se forma una capa de aleación Fe-Sn; sobre ésta se deposita el recubrimiento de estaño, rematándose con un pasivado y una capa de aceite.

Las funciones y características de estos componentes son los siguientes:

- I. **Acero.** Tiene como misión conferir una resistencia mecánica al producto, difícil de conseguir con otro tipo de material. El acero empleado debe reunir ciertas condiciones como:
 - Características mecánicas (rigidez, formabilidad, etc.).
 - Anticorrosivos, principalmente ausencia de elementos incluidos que puedan formar pares de ánodo-cátodo con el acero.

El espesor empleado va desde 0,5 mm a los 0,14 mm de la hojalata de doble reducción. El acero retarda o acelera la corrosión según los elementos aleantes y la forma de cristalización. A menor número de metaloides menor corrosión.

- II. **Aleación Fe-Sn.** Es una capa de espesor mínimo, formada por reacciones químicas y difusión producidas durante el proceso de fusión y abrillantado. La forma de cristalización y en especial su continuidad y homogeneidad, determinan su comportamiento resistente a la corrosión frente a muchos productos. La cantidad de estaño aleado es independiente del grado de revestimiento aplicado. Esta capa de aleación intermetálica actuará de pantalla mermando la velocidad de corrosión en función del espesor y forma de cristalización.
- III. **Estaño.** Es el recubrimiento básico de la hojalata por su protección electroquímica del acero, gozando de unas características únicas, como son:

- Nula toxicidad.
- Soldabilidad.
- Poder lubricante.
- Capacidad para admitir barnices y lacas de diversa composición.
- Apariencia agradable.

El espesor del estaño (que se suele expresar en g/m²) es variable y depende principalmente del tipo de aplicación, variando desde los de menor espesor (0,9 gramos de estaño por m² de superficie de banda de acero) hasta los de mayor espesor (14 g/m² medidos en peso mínimo por cara). El tiempo de duración del envase depende de la continuidad de la capa de estaño y del tamaño del grano de estaño, que conviene que sea grande.

El tipo de recubrimiento depende de la masa depositada y puede ser:

- I. **Normal:** igual cantidad por ambas caras; se indica con una E seguida de la cifra que da la masa de recubrimiento (normalmente desde 1,0 hasta 11,2 g/m²).

- II. **Diferencial:** donde cada cara tiene una masa de recubrimiento distinta y se indica con una D.

La característica mecánica de la hojalata, denominada comúnmente con la palabra "Témper" (o temple), seguida de la cifra resultante del ensayo especial de dureza superficial, reúne una combinación de propiedades mecánicas interdependientes y constituye un dato fundamental, que junto con el de recocido en campana BA o en continuo CA, se considera básico para determinar los usos de la hojalata.

Las hojalatas se clasifican para su aplicación según sus diferentes Témper, es decir, por los intervalos de dureza del producto, desde el Témper 1 para hojalatas muy blandas y deformables, hasta el Témper 5 e incluso 6 para las más duras.

Tabla 2-2 Designación del temple para hojalata.

<i>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</i>			
<i>Designaciones de temple para lámina de reducción sencilla recocida</i>			
<i>TEMPLE</i>	<i>DUREZA ROCKWELL 30T MIN-MÁX</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>	<i>USOS</i>
<i>*T - 12</i>	<i>46 - 52</i>	<i>Embutidos muy profundos o severos</i>	<i>Botes para troquelado extraprofundo. Boquillas aerosol, fondo aerosol, tapas, botes de dos piezas.</i>
<i>T - 2</i>	<i>50 - 56</i>	<i>Embutidos moderados.</i>	<i>Tapones con rosca, tapas y fondos.</i>
<i>T - 3</i>	<i>54 - 60</i>	<i>Embutidos poco profundos para aplicaciones comunes</i>	<i>Botes en general, cuerpos y tapas, corcholatas</i>

Tabla 2-3 Designación del temple para hojalata (continuación).

<i>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</i>			
<i>Designaciones de temple para lámina de reducción sencilla recocida</i>			
<i>TEMPLE</i>	<i>DUREZA ROCKWELL 30T MIN-MÁX</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>	<i>USOS</i>
<i>T-4</i>	<i>58-64</i>	<i>Aplicaciones comunes donde se requiere aumentar la rigidez.</i>	<i>Cuerpos de botes, tapas y corcholatas.</i>
<i>T-5</i>	<i>62-68</i>	<i>Para una gran rigidez se fabrica con acero refosforado a fin de resistir los engargolados severos.</i>	<i>Tapas y cuerpos de botes para empleo en conservación de productos moderadamente o nada corrosivos.</i>
<i>T-6</i>	<i>67-73</i>	<i>Para una rigidez extraordinaria (se fabrica con acero refosforado)</i>	<i>Tapas y fondos de botes.</i>

1 Los valores de dureza son determinados en unidades Rockwell 15 T para espesores menores o iguales a 0,21 mm (0.01 in) y en Rockwell 30 T para espesores mayores a 0,21 mm (0.01 in).

2 (*) Los materiales con temple 1 a 3 son producidos con recocido tipo batch, en campana o caja, y los temple 4 y 5 con recocido continuo.

Otro parámetro interesante es el acabado superficial (brillante, mate, piedra y plata), y que es función de la rugosidad superficial (dependiente del tipo y acabado de los cilindros del temperizado empleados) y del estado de refusión de la capa de estaño.

El pasivado. Su objetivo primordial es la protección superficial durante el almacenamiento, protegiéndola de la sulfuración y oxidación atmosféricas y retardando el desestañado. Está compuesto por cantidades muy pequeñas de cromo metálico y óxido de cromo depositados electrolíticamente. A su vez, constituye un anclaje adecuado para lacas y barnices siempre que la relación entre cromo metálico y óxido de cromo esté en proporciones adecuadas. Los tratamientos son 300, 311 Y 314 (>9 mg/m²).

Tabla 2-4 Pasivación de la hojalata

Pasivación de la hojalata				
Tipo de tratamiento	300 Inmersión		311 Electroquímico	
Óxido de cromo	1-2 mg/m ²	0,082-0,186 mg/pie ²	4,0-7,0 mg/m ²	0,35-0,65 mg/pie ²
Propiedades de laqueado	Buena adherencia a lacas		Buena adherencia de lacas secas y húmedas	
Decoloración	Pobre (puntos amarillos causados por sulfuros durante almacenamiento prolongado)		Presenta mayor resistencia a la decoración	
Aplicación	Contenidos secos (leche en polvo)		Uso universal, para encalar, pintar y esterilizar.	

Finalmente la capa de aceite se aplica para proteger a la hojalata, favoreciendo el deslizamiento y evitando la abrasión durante su manipulación por la línea de producción. Estos aceites deben ser compatibles con los alimentos; normalmente se utiliza DOS (dioctil-sebacato), que es una grasa sintética, en una cantidad comprendida entre 5 y 1 °mg/m²

Barnizado, lacado o litografiado. Son capas que introduce el fabricante de envases y que debido al alto precio del estaño, cada vez tienen más empleo como protección adicional contra la corrosión. El barnizado disminuye drásticamente la disolución del estaño, pudiendo propiciar la aparición de picaduras. Este efecto está en función del barniz, grado de secado y espesor, adherencia y continuidad de la película.

El embalaje varía en función del medio de transporte y destino; además la hojalata puede suministrarse en paquetes de hojas cortadas, o más comúnmente en bobinas de ancho y espesor de banda concretos.

La calidad de la hojalata ha mejorado sensiblemente en los últimos años, lo que ha permitido una reducción de los espesores de la misma y de la masa de recubrimiento, produciéndose una considerable reducción del peso del envase y

por tanto del coste unitario. De cara al futuro esta tendencia continúa, ganando cotas de mercado pero exigiendo una mayor precisión en el estaño aplicado.

A modo de comentario definir la chapa cromada (TFS3) que consiste en una chapa de acero, de muy poco espesor y bajo contenido en carbono, recubierta electrolíticamente de cromo y óxido de cromo. Su acrónimo deriva de que sustituye a la hojalata en múltiples aplicaciones, y está constituida por acero libre de estaño. Sus principales características son similares a la hojalata, salvo en algunos aspectos (más abrasiva, mejor adherencia de lacas y pinturas, peor deformabilidad que la hojalata), lo que la hace más adecuada para ciertas aplicaciones específicas. También es conocida bajo las siglas ECCS.

2.6 TIPOS DE HOJALATA SEGÚN SU APLICACIÓN

Los aceros empleados, junto con los procesos adecuados, son los que confieren a la hojalata sus características [ACE98][AIS96]. Para altas prestaciones, como fabricación de latas para bebidas carbonatadas embutidas y estiradas (DW) o para fabricar tapas de fácil apertura (EOE), se utilizan aceros de gran limpieza, bajos y ultra bajos en carbono (tratados al vacío) con estrictos procesos de laminación en caliente, en frío y recocido en continuo, además de garantizar una planitud y constancia de espesor excelentes. Por ejemplo, una lata DWI para bebidas, tiene un espesor en su fondo del orden de 0,21 a 0,24 mm (igual que el espesor de la hojalata a partir de la cual se fabrica) y un espesor en sus paredes inferior a 70 micras. La dureza del acero recocido en continuo es mayor y uniforme (no direccional), por lo que es necesario ajustar el proceso de fabricación del envase a las características de las nuevas calidades de aceros. Aparte de la hojalata denominada normal, existen las enumeradas a continuación que serán explicadas en los siguientes subapartados:

- Hojalata DR (Doble Reducción)
- Hojalata DWI (Drawn and Ironed)
- Hojalata DRD (Drawn and Redraw)
- Hojalata EO (Easy Open)
- Hojalata para Tapón Corona.
- Hojalata LTS (Low Tin Coated Steel)



Figura 2.5 Ejemplos de los diferentes tipos de hojalata

2.6.1 HOJALATA DR

Este tipo de hojalata presenta un espesor menor del habitual, lo que supone menor cantidad de acero y menor costo. La reducción del espesor debe ser compensada por una mejora de las propiedades que caracterizan la resistencia, ya que de lo contrario esta reducción no sería posible.

Existen tres tipos de hojalata DR, los cuales se diferencian fundamentalmente por su dureza y, en menor medida, por su límite elástico. Los procesos de fabricación pueden resumirse en tres:

- Variación de la composición del acero base.
- Variación del ciclo o del sistema de recocido (en campana o continuo).
- Variaciones en el grado de reducción del espesor en la segunda laminación en frío, llegándose hasta segundas reducciones del 35 %.

Una vez realizada la limpieza electrolítica, las bobinas de hojalata son recocidas en un horno, lo que modifica sus características mecánicas al cambiar su estructura como consecuencia del tratamiento térmico. En las bobinas de

hojalata convencional estas características permanecerán constantes hasta el final del proceso de fabricación y transformación. Sin embargo en la hojalata DR, una vez recocida, sufre un proceso de reducción del 30% (menor si es de recocido continuo, ya que en este caso la dureza es algo mayor), con lo que sus características son de nuevo modificadas, de forma que tras la segunda reducción se obtiene un acero donde los granos de su estructura experimentan un alargamiento en la dirección del laminado.

2.6.2 HOJALATA SIN ESTAÑO, TFS: TIN FREE STEEL

El incremento de porcentaje de alargamiento en el tren témpor, es directamente proporcional al incremento de la dureza final obtenida en la hojalata. Teniendo en cuenta el proceso de fabricación y la estructura obtenida en la segunda reducción, se hacen necesarias las siguientes puntualizaciones para su uso posterior:

Este tipo de hojalata posee unas características direccionales más acentuadas que las hojalatas convencionales, por ello al redactar el pedido debe especificarse el sentido de laminado, sobre todo cuando se trata de hojalata cortada en hojas.

En su utilización también debe tenerse en cuenta la orientación, procurando que las zonas de conformado de las pestañas, envases rectangulares y cilíndricos coincidan con el sentido de laminación.

Las propiedades más características de este tipo de hojalata son:

- Dureza más alta que la hojalata normal y menos ductibilidad.
- Marcadas propiedades direccionales.
- No presenta fenómenos de envejecimiento.
- Puede causar en mayor grado defectos de plenitud de banda.

2.6.3 HOJALATA DWI (DRAW AND IRONED)

Este tipo de hojalata permite la fabricación de botes de dos piezas mediante embutición y estirado, pudiendo fabricar de una sola pieza el fondo y el cuerpo del bote (embutiendo un disco circular), con lo que se evitará, respecto al bote de tres piezas (fondo-cuerpo-tapa), el agrafado del fondo con el cuerpo,

pudiendo además reducirse considerablemente el espesor de la pared del bote. También se evita la soldadura del bote, y por tanto, el riesgo de contaminación a consecuencia de la misma.

A grandes rasgos, el proceso de manufactura parte de una lámina circular de hojalata que es transformada mediante embutición en una copa, cuyas paredes son estiradas mediante unas prensas especiales. Seguidamente se conforma el fondo y se procede a un lavado desengrasante, barnizado exterior, litografiado secado de la tinta, estrechamiento del cuello, formación de una pestaña circular para el agrafado de la tapa, lacado interior por spray, curado de éste y finalmente, paletizado.

Al final de este proceso se llega a obtener un envase que partiendo de un disco de 0,30-0,33 mm de espesor, alcanza un grueso de pared de unos 0,10mm. Este proceso supone un considerable ahorro, ya que el número de botes que se pueden fabricar con una determinada cantidad de hojalata, es muy superior al que se obtendría con botes de tres piezas. Al destinarse esta hojalata para embutición y estirado, hay que tener en cuenta que las características mecánicas deben ser lo más uniformes posibles, no debiendo existir ningún tipo de inclusión que suponga un deterioro del bote durante el estirado del material.

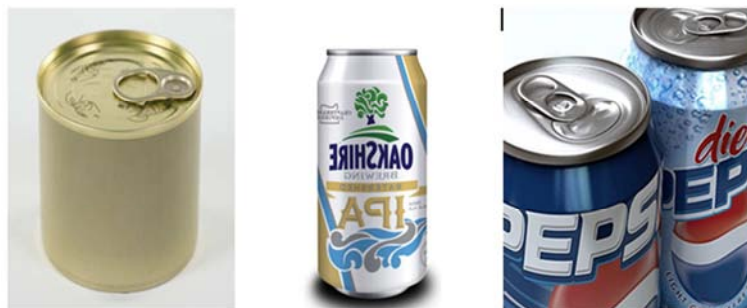


Figura 2.6 Hojalata DWI

Debe controlarse de forma rigurosa el espesor de la banda, ya que al embutirse simultáneamente varios botes, cualquier diferencia en el espesor supone distinto esfuerzo en las máquinas de embutir, pudiendo producir atascos en las líneas de fabricación y rechazo de botes. El acero base será del tipo calmado al aluminio, actuando en este caso el estaño no sólo como protector del acero, sino también como lubricante en el proceso de embutición y estirado.

El tipo de envase al que va dirigida esta hojalata es el de bebidas (cervezas y bebidas carbónicas). Se establece una clara diferencia con los envases

destinados a conservas alimenticias, ya que para estos productos líquidos, no se necesita tratamiento posterior al enlatado, siendo suficiente el mantenimiento uniforme de una moderada sobrepresión interior que contribuye a dar una mayor rigidez a las finas paredes del envase.

Con los productos alimenticios no se produce este efecto, ya que los alimentos enlatados requieren un tratamiento posterior de esterilización, a base de procesos térmicos, que originará el desarrollo alternativo de presiones y depresiones en el interior del envase. Esto puede producir un colapsamiento de las paredes de la hojalata OWI, por eso, salvo en contadas ocasiones, este tipo de hojalata no será apta para el enlatado de alimentos.

2.6.4 HOJALATA DRD (DRAW AND REDRAW)

Este tipo puede entenderse como una variante del tipo DWI, destinada a superar la limitación de ésta para el envasado de los alimentos.

La hojalata ORO, al igual que la OWI, permite la fabricación de un envase de dos piezas. La diferencia radica en que aquí el conformado del bote se efectúa mediante embuticiones sucesivas de un disco, pero sin estirado del material. Por este motivo, el espesor de las paredes del bote resulta prácticamente igual al espesor del disco, no economizando material. La ventaja está en que no precisa ni el agrafado de la tapa ni la soldadura lateral. El mayor espesor de las paredes permite la esterilización de los alimentos envasados sin deformar el envase.

Otra diferencia fundamental respecto al tipo OWI es que, mientras que en ésta el estaño actúa como lubricante en el proceso de conformación, la ORO debe ser revestida de un elemento orgánico que facilite las sucesivas embuticiones; por este motivo es obligatorio fabricar la hojalata en paquetes.

2.6.5 HOJALATA EO (EASY OPEN)

Este tipo de hojalata se destina a la fabricación de tapas de botes, cuya apertura se realiza tirando de una argolla que va sujeta a las mismas, evitándose el uso de un abrelatas.

Se consigue la apertura fácil del bote efectuando una incisión en la hojalata, que sea lo suficientemente profunda como para que se pueda abrir el bote sin gran esfuerzo, garantizando al mismo tiempo su estanqueidad.



Figura 2.7 Latas de fácil apertura

Esta característica exigirá la utilización de acero calmado al aluminio que además mantenga una uniformidad en el espesor de la hojalata de un +/- 4%, condición que encarece su fabricación por una mayor posibilidad de rechazo en la fabricación.

2.6.6 HOJALATA PARA TAPÓN CORONA

Este tipo se emplea para la fabricación de tapones de botellas de cerveza, bebidas refrescantes, etc. Sus características fundamentales deben ser la dureza y el espesor, de forma que sea posible abrir la botella sin grandes dificultades y que al mismo tiempo, la presión del producto envasado no sea capaz de abrir la tapa.



Figura 2.8 Tapones corona

2.6.7 HOJALATA LTS (LOW TIN COATED STEEL)

Es un tipo de hojalata de bajo revestimiento para reducir el costo de fabricación al rebajar la cantidad de estaño depositado. Las diferencias fundamentales entre la hojalata LTS y la normal son las siguientes:

En la hojalata LTS la cantidad de estaño depositado por unidad de superficie es de 1,5 g/m², cuando en la normal es de 2,8 g/m² en su revestimiento más bajo.

La deposición de estaño se efectúa de forma distinta a la hojalata normal, debiendo cambiar el electrolito y las condiciones del estañado.

Una deposición del estaño en la banda más densa y homogénea.

Una menor rugosidad en el acero base, para evitar las crestas.

Con este tipo de hojalata se pretende competir con la hojalata TFS (Tin Free Steel), en la que se sustituye el estaño por una capa de cromo depositada electrolíticamente. La LTS es más resistente a la corrosión y tiene mejor aptitud a la soldabilidad.

2.7 RECICLADO

La hojalata es biodegradable [AIS96], por lo que una vez depositada en vertederos, se descompone rápidamente (unos 10 meses), para convertirse en óxido de hierro y óxido de estaño.

El marco legal que cubre el mundo del reciclaje hoy en día se podría resumir:

Ley de Envases 11/97 (LERE)

Ley 22/2011 de Residuos: Futuro Desarrollo Reglamentario

Envasadores: Financian la recogida y selección de los residuos de envases

Entidades de Materiales: Garantizan el reciclado de los envases recuperados y el cumplimiento de los objetivos de reciclado.

El acero tiene el mayor grado de reciclabilidad de todos los materiales de empaquetado. Adicionalmente a esto, el acero está clasificado como el mejor en seguridad, protección y conservación, convirtiéndolo en un material de alto rendimiento en términos de sostenibilidad.

Hoy en día, en España, el 77% del acero procede de chatarras férricas.

En 2007 más de 2,5 millones de toneladas de envases de comida y bebida junto con otros tipos de envases de hojalata fueron reciclados en Europa, suponiendo esto un ahorro de 4,8 millones de toneladas de CO₂. De acuerdo a la Asociación Europea de productores de acero para envases (APEAL) la hojalata alcanzó un ratio de reciclaje del 69% en el mismo año.

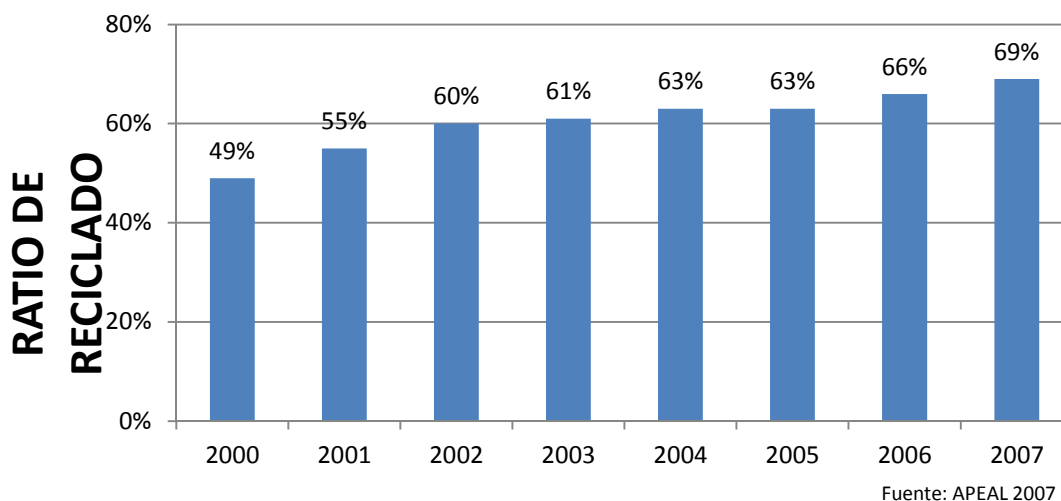


Figura 2.9 Evolución del reciclado de acero para embalajes en Europa

Integrando acero reciclado en el proceso de fabricación del mismo, se alcanzan ahorros de energía del 70% y se rebajan las emisiones de CO₂. Esto quiere decir que cuanto mayor sea el ratio de reciclaje menores emisiones de CO₂ y por lo tanto se están preservando las reservas naturales para futuras generaciones y el ahorro de energía utilizada y las emisiones de CO₂ son significativamente reducidas. Datos que corroboran estas aseveraciones son que a día de hoy reciclar 1t de acero evita el uso de 2t de recursos naturales y las emisiones de CO₂ son hoy la mitad que en 1970.

El acero tiene un excelente uso en términos de reciclaje, siendo fácilmente recolectado a través de varios sistemas. Gracias a sus propiedades magnéticas naturales, los envases de hojalata son recuperables del resto de los residuos mediante la utilización de electroimanes de forma sencilla, económica y eficaz. Además es fácilmente separable de los residuos en proceso de incineración. Por encima de todo esto la segunda propiedad natural del acero es su reciclabilidad, dado que los materiales reciclables son una parte esencial en el proceso del acero. El acero es único debido a su infinito bucle de reciclabilidad – puede ser reciclado una y otra vez sin pérdida alguna de sus propiedades inherentes. Este

potencial de reciclaje ilimitado le da una ventaja enorme en términos de sostenibilidad.

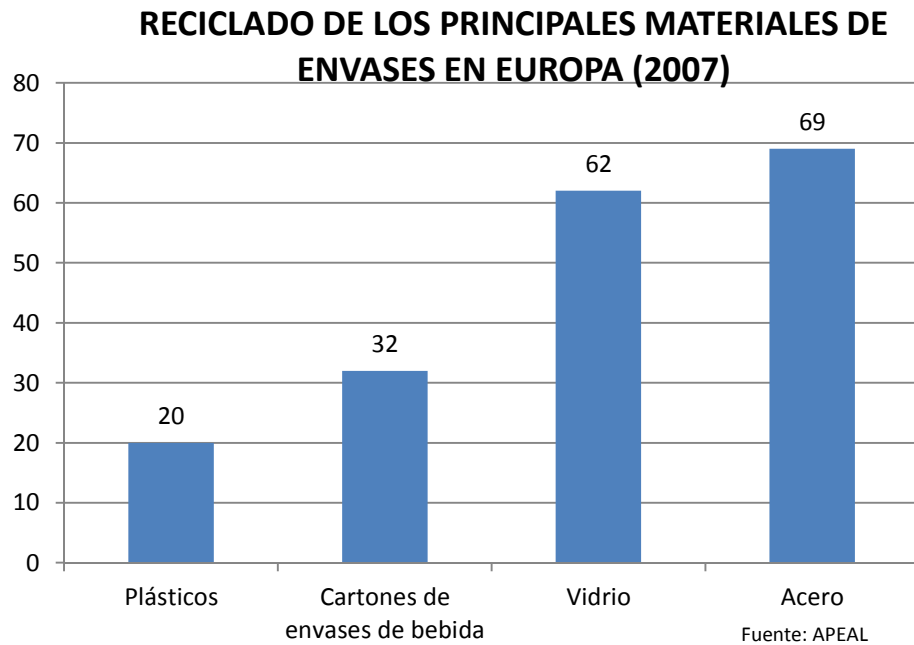


Figura 2.10 Reciclado de los principales materiales de envases en Europa

Según la directiva 85/339/CE y la 94/62/CE se exigía alcanzar en el año 2001 una tasa de recuperación mínima del 15%. Esta cifra es ampliamente superada en la hojalata.



Figura 2.11 Reciclado de Chatarra

La hojalata recuperada puede ser reutilizada en la producción de acero con el consecuente ahorro de energía y materia prima.



Figura 2.12 Almacenaje de Chatarra

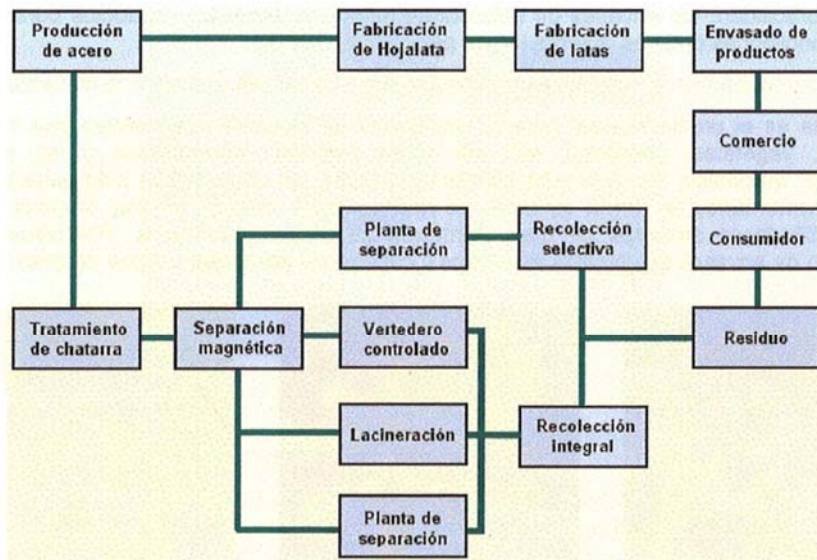


Figura 2.13 Ciclo de reciclado

A continuación se detallan las principales fases del reciclaje del acero, así como sus diferentes procesos que los conforman:

- La Fragmentación.
- La Trituración.
- La limpieza del material.
- La Separación magnética.
- El Desestañado.
- La Fragmentación.
- El Decapado.
- El Desestañado.



Figura 2.14 Proceso de Fragmentación



Figura 2.15 Proceso de Desestañado

En la siguiente figura se puede observar la evolución del reciclado en España desde 1994 hasta 2001.

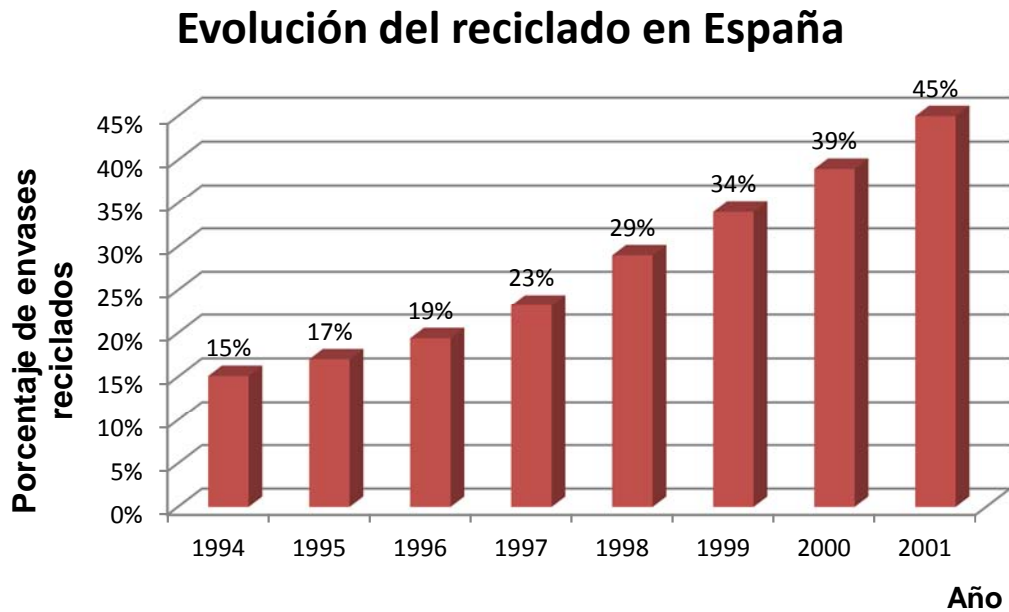


Figura 2.16 Evolución del reciclado en España

Hay que actualizar información y fuentes de Internet. Adjuntar comparativa con el aluminio.

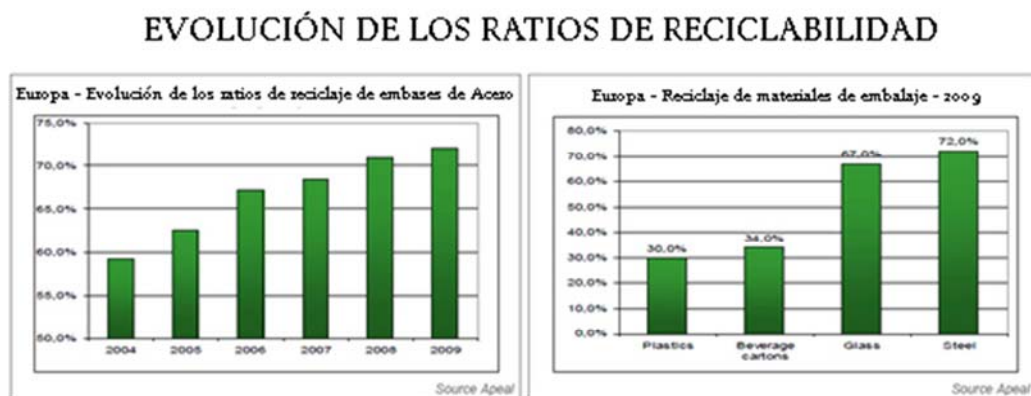
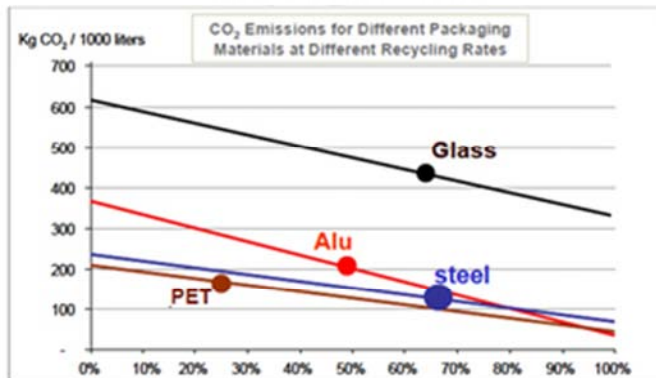


Figura 2.17 Evolución de los ratios de reciclaje para envases de acero en Europa

EMISIONES DE CO₂ PARA DIFERENTES MATERIALES DE EMBALAJE A DIFERENTES RATIOS DE RECICLABILIDAD



Sources : Ecoinvent database, European Aluminium Industry, Worldsteel 2007/2008

Figura 2.18 Emisiones de CO₂

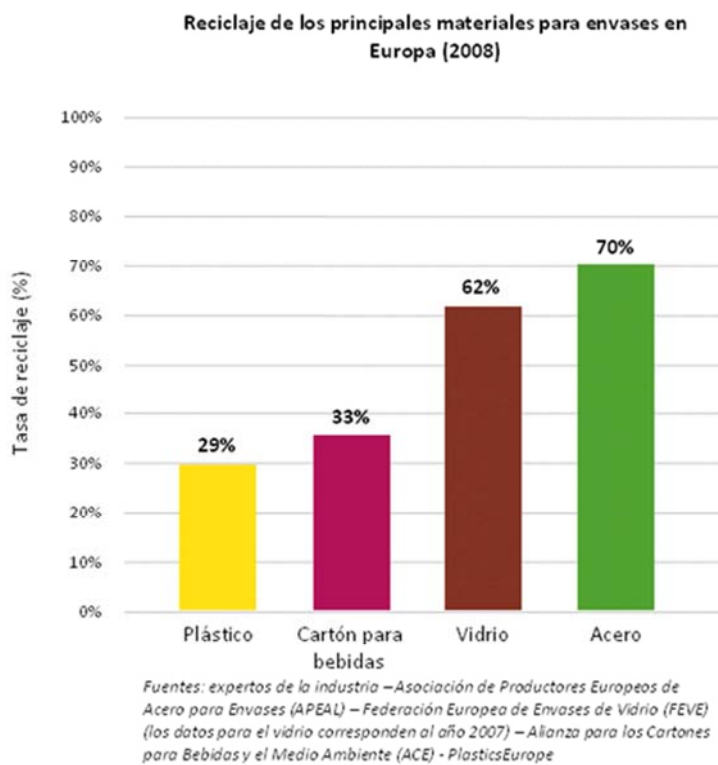


Figura 2.19 Reciclaje de los principales materiales para envases en Europa

CAPÍTULO 3

EL PROCESO SIDERÚRGICO

3 EL PROCESO SIDERÚRGICO

Como podemos apreciar en la Figura 2.4 donde se muestra los distintos procesos que conforman el proceso siderúrgico de sectores como la hojalata, la industria y el automóvil, tenemos:

- Materias primas: Parque almacenaje y gestión de las materias primas
- Instalaciones de cabecera: Horno alto
- Instalaciones de acería: Desde el convertidor a la colada continua.
- Laminación en caliente.
- Laminación enfrió.

- Transformación en frío y recubrimientos.
- Producto final: Bobinas de hojalata, industria y para el sector automóvil.

A continuación explicaremos con algo más de detalle aquellos procesos que tienen lugar a partir de conseguir los desbastes en el proceso de colada continua:

Horno de Pre calentamiento: Los desbastes esmerilados se introducen en un horno de pre calentamiento de viga galopante y se llevan a la temperatura de laminación, de 1250 °C a 1280 °C. Una vez igualadas las temperaturas del corazón y de la superficie del desbaste, se lleva por medio de un camino de rodillos al tren desbastador.

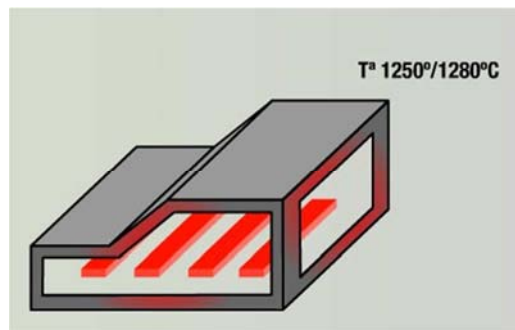


Figura 3.1 Horno de pre calentamiento.

Tren desbastador: El tren desbastador es un cuatro reversible, es decir, un tren constituido por cilindros de trabajo que se apoyan respectivamente en otros dos cilindros de apoyo.

Al final de esta operación, el desbaste de 200 mm de espesor pasa a ser un chapón de 20 a 30 mm de espesor.

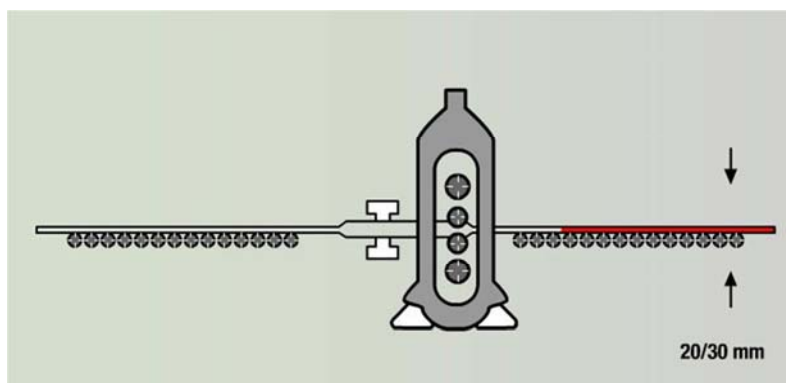


Figura 3.2 Tren desbastador.

Tren acabador o Steckel: El tren Steckel es un laminador sexto reversible provisto de una bobinadora a cada lado. Como la banda se enfría en cada pasada, este tren dispone de pequeños hornos envolviendo a cada bobinadora. Mediante varias pasadas, se consigue un espesor de banda entre 2 y 10 mm.

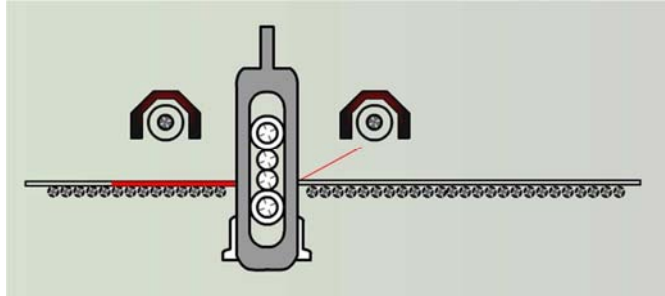


Figura 3.3 Tren acabador o Steckel

Tren desbastador: El tren desbastador es un cuatro reversible, es decir, un tren constituido por cilindros de trabajo que se apoyan respectivamente en otros dos cilindros de apoyo.

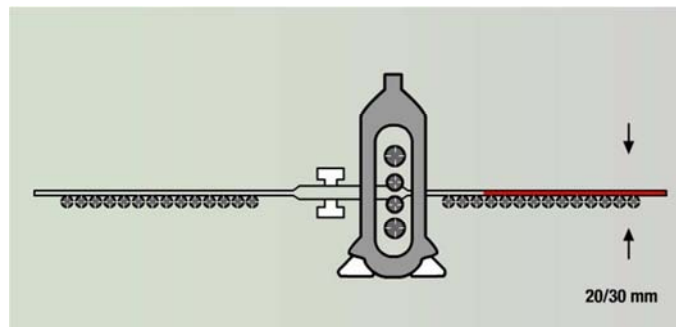


Figura 3.4 Tren desbastador

Bobinadora: Una vez terminada la operación de laminación en el tren steckel, la banda se enfría en la mesa de salida y posteriormente se bobina y se fleja. El resultado es la bobina negra.

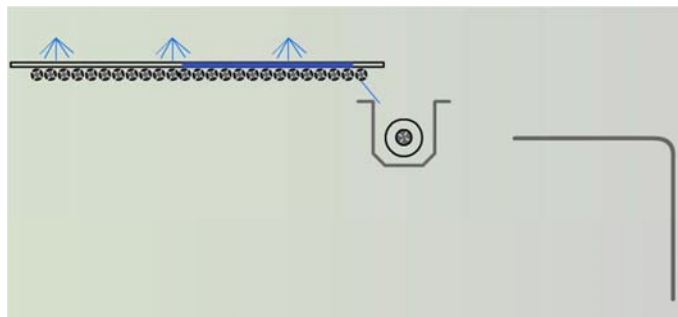


Figura 3.5 Bobinadora

3.1 LA LAMINACIÓN EN FRÍO

La laminación en frío es uno de los principales métodos de trabajar los metales. Es un proceso que tenemos que entender si queremos fabricar banda de buena calidad para chapa o para hojalata.

Si echamos un vistazo a los electrodomésticos que tenemos a nuestro alrededor, nos encontraremos con que muchos de ellos están fabricados con productos laminados planos. Por ejemplo, una tostadora, está hecha de chapa de acero de un espesor de menos de ocho décimas de milímetro. Esta chapa es plana y lisa y por supuesto tiene la flexibilidad que permitió darle una forma bonita, y además seguir siendo resistente.

Los fabricantes de electrodomésticos no sólo exigen que la banda que compran tenga las características que acabamos de señalar, sino que además plantean otras exigencias. Quieren que tenga un cierto acabado que le permita ser esmaltada para mobiliario de cocina o que sea resistente a los ácidos o quizás que tenga una superficie especial, como en el caso de los frigoríficos, etc.

En realidad todo esto –acabado y recubrimiento del metal – es relativamente fácil de lograr. Lo que es difícil es hacer bien la chapa de acero. Pensemos en aquello de lo que partimos: un material indiferenciado, llamado mineral de hierro que podría tener las mismas posibilidades de transformarse en una tostadora que en un montón de piedras. Posteriormente se refina y se lamina con maquinaria más grande que un edificio y se espera que termine siendo un producto con una precisión de hasta 3 milésimas de milímetro. Esa es la razón de que se hayan necesitado muchos años y millones de horas de trabajo para perfeccionar este proceso.

Los fabricantes exigen que la banda que producimos tenga estas cualidades a las que nos venimos refiriendo. Eso se consigue con la laminación en frío que añade al metal todas aquellas características que lo hacen ser una materia prima increíblemente dura a la vez que flexible, para la fabricación de productos cotidianos.

En el mundo del acero, los procesos en frío son aquellos en los que se trata de transformar las características dimensionales de un elemento mediante transformaciones a una temperatura cercana al ambiente (en comparación con las temperaturas alcanzadas en los procesos en caliente). La transformación en frío es ya una de las etapas finales dentro del proceso siderúrgico integral. El producto de esta etapa suele utilizarse como *input* para otros procesos

posteriores de alto valor añadido (hojalata, galvanizado, pintado,...) aunque también encuentra cabida en el mercado como producto final *Figura 3.6*



Figura 3.6 Almacenaje de bobinas

El mecanismo de laminación fría (un esquema simplificado en *Figura 3.7*) comienza con la recepción de bobinas obtenidas del tren de laminación en caliente. La laminación en caliente y el almacenamiento de las bobinas a la intemperie, producen sobre la superficie de la banda una serie de impurezas y óxidos perjudiciales para el aspecto superficial en el posterior proceso en frío.

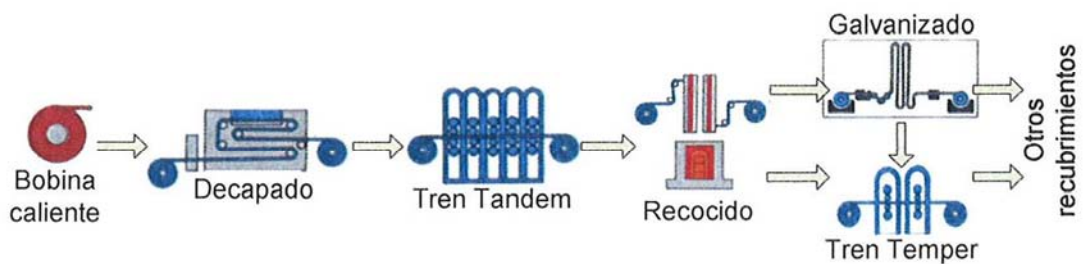


Figura 3.7 Esquema simplificado de la fabricación de chapa galvanizada

La línea de decapado tiene como objetivo la eliminación de éstos a través de una serie de baños del material en ácido. Otros elementos previos al tándem son las líneas auxiliares de saneo, encargadas de cortar bordes, mejorar plenitud, etc.

Por otro lado, y después del tren tándem, es necesario aplicar al material un proceso de recocido a fin de rebajar su acritud (endurecimiento por deformación) y así disminuir su dureza y fragilidad. Este proceso suele hacerse en hornos, ya sea de campana o continuos, donde se le aplica un tratamiento térmico específico. Por último y para corregir excesos en el tratamiento de recocido, se procesa la banda a través de un tren témp. Su finalidad no es reducir el espesor sino:

- La supresión de la meseta de límite elástico
- Mejora de la planitud
- Dar el acabado superficial a la banda requerido (rugosidad)

3.1.1 LAMINACIÓN EN FRÍO PARA CHAPA

Las chapas, que tienen un ancho de hasta 1800 mm, se fabrican en el tren tándem de productos planos. Estos trenes, que pueden tener 4 ó 5 cajas, reducen la banda en caliente entre un 60% y un 80% con tolerancias de menos de 3 centésimas de milímetro. Cuando la banda sale de la última caja puede estar moviéndose a una velocidad de hasta 1.500 m/min. Gran parte de esta banda laminada en frío pasa entonces al recocido en campana a fin de restaurar la ductilidad o maleabilidad de la banda.

A continuación la banda pasa al tren Témp. para que adquiera ciertas propiedades metalúrgicas además de los distintos acabados superficiales requeridos. Si la banda se va a galvanizar, se enviará directamente desde el tren de laminación en frío y se recocerá en la propia línea de galvanizado.

3.1.2 LAMINACIÓN EN FRÍO PARA HOJALATA

En el caso de los productos de hojalata, que raramente superan los 1000 mm de ancho, la banda en caliente se introduce en el tren tándem para hojalata. Este tren tiene 5 ó 6 cajas y reduce la banda entre un 80% y un 95%. A veces opera a velocidades de hasta 1.800 m/min. De aquí la banda pasa, bien a la línea de recocido continuo o a una línea de limpieza electrolítica, previa a un recocido en campana.

3.2 TIPOS DE TRENES

Hay tres tipos de trenes de laminación en frío:

- **TRENES DE REDUCCIÓN SIMPLE:** son los trenes tándem para chapa y los trenes tándem para hojalata.
- **TRENES DE DOBLE REDUCCIÓN:** también llamados DCR.
- **TRENES TEMPER:** son los trenes de temperizado para chapa y para hojalata.

Dado que la fabricación de la banda consiste en una serie de operaciones, un error en cualquier punto del proceso puede causar problemas en las operaciones posteriores. Por ejemplo, si la banda no está del todo plana después del laminado, puede impedir que la línea de recocido continuo funcione a plena velocidad. O todavía peor, si la banda no circula uniformemente pueden producirse distorsiones de calentamiento.

3.2.1 EL TREN TÁNDEM

Se conoce como tren tándem a la instalación donde se consigue reducir el espesor de una banda de acero, mediante el paso sucesivo de la misma a través de un conjunto de cajas de laminación sincronizadas entre sí, Figura 3.8. Está formado por un número determinado de cajas de laminación (típicamente cuatro o cinco), sistemas de bobinado y desbobinado, elementos de potencia y un gran número de mecanismos auxiliares. A pesar de ser un proceso con muchos años de historia, las instalaciones más competitivas disponen de la última tecnología a fin de producir productos con un alto valor añadido.

3.2.1.1 PARTES FUNCIONALES DE UN TREN TÁNDEM

En la Figura 3.8 puede observarse un plano esquemático de las partes fundamentales de un tren tándem. Nótese la ubicación de los sistemas sensores, así como las diferentes guías para la conducción precisa de la banda. Este capítulo hará especial hincapié en los elementos de la caja de laminación y en los esquemas de control del mismo.

3.2.1.2 LA CAJA DE LAMINACIÓN

La caja de laminación es sin duda el corazón del proceso de laminación. De manera muy simplificada estará formada por una estructura fija o castillete que da soporte a un conjunto de elementos móviles. Como elementos móviles (rotatorios) principales están los cilindros de laminación, denominados de trabajo o apoyo según estén en contacto con la banda o con el sistema de apriete. A lo largo de la historia varios han sido los diseños de cajas de laminación según la disposición y número de los cilindros. De esta manera, hasta el siglo XIX la configuración habitual era de dos cilindros. Posteriormente se introdujo una configuración de tres cilindros, con el del medio de menor diámetro, siendo ésta un diseño más ventajoso al requerir menos energía. Posteriormente aparece la típica configuración de cuatro cilindros (dos de trabajo en contacto con la banda y dos de apoyo para la transmisión de la fuerza de apriete) e incluso con seis cilindros en diversas disposiciones, ver Figura 3.9. Merece la pena mencionar la existencia de los trenes Sendzimir de veinte rodillos capaces de grandes reducciones en una sola caja de laminación. Figura 3.10.

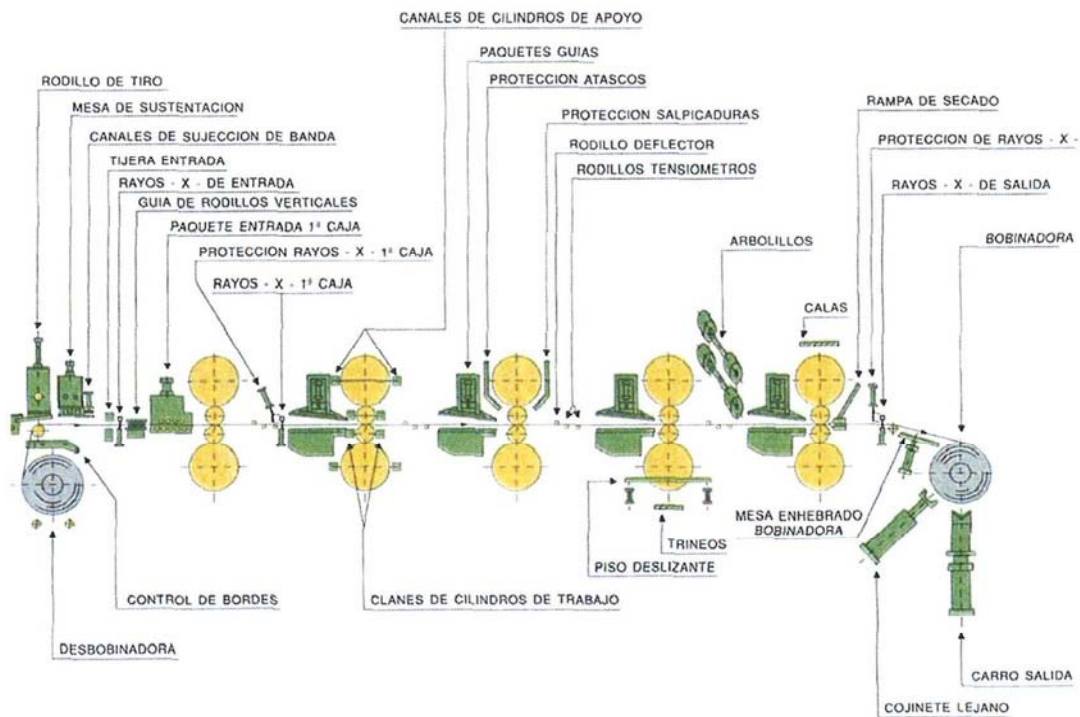


Figura 3.8 Descripción de las partes principales de un Tren Tándem

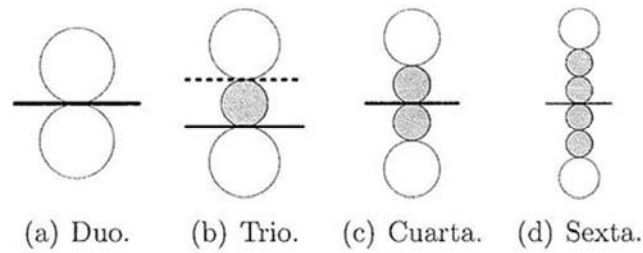


Figura 3.9 Tipos de configuración de una caja de laminación

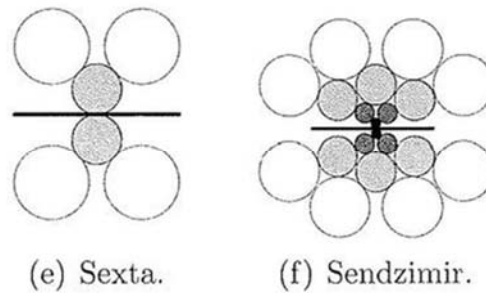


Figura 3.10 Otros tipos de configuración de una caja de laminación

El tren de laminación en este estudio consta de cinco cajas cuartas, es decir con cuatro cilindros. El número de cajas dependerá del tipo de producto a fabricar, las necesidades de espacio y el sistema empleado. Es muy habitual encontrarse con sistemas de cuatro y cinco cajas e incluso de seis para grandes reducciones y acabados de alta calidad; al contrario, también existen trenes de dos e incluso una sola caja para aplicaciones especiales.

Los cilindros de laminación utilizados son de una importancia capital. De sus características mecánicas dependen parámetros tan dispares como el desgaste, calentamiento y evacuación de calor, elasticidad y por supuesto rozamiento. No se debe olvidar que el rozamiento es fundamental para llevar a cabo el proceso, de ahí que los cilindros de trabajo deban ser rectificadas a menudo a fin de asegurar un nivel determinado de rugosidad así como una superficie libre de defectos.

3.2.2 TREN CUATRO

Este tren se llama cuarto porque utiliza dos cilindros por encima de la banda y otros dos por debajo de ella. Los dos que realmente entran en contacto con el

metal se llaman cilindros de trabajo; los dos exteriores, más grandes, se llaman cilindros de apoyo.

Aunque cuesta imaginarlo, los cilindros de trabajo se curvarían por la presión, así que los cilindros de apoyo cumplen la función de evitar una deformación por flexión excesiva de los cilindros de trabajo durante el funcionamiento. Pero una cierta deformación es inevitable; de hecho, a los cilindros se les da forma de barril o de corona para compensar la deformación que se producirá bajo la enorme presión de laminación.

3.2.2.1 ELEMENTOS DE LA CAJA DEL TREN

En cada extremo del cilindro hay un cuello en el que se encaja un rodamiento. En los trenes cuartos, los rodamientos del cilindro de trabajo son cuatro hileras de rodillos cónicos. Estos rodamientos pueden soportar las altas fuerzas radiales y axiales que se producen en la laminación. Los rodamientos del cilindro se asientan en piezas de acero moldeado, llamadas ampuestas. Estas llevan también cilindros hidráulicos que ayudan a controlar la corona de los cilindros.

Tanto los cilindros como las ampuestas están situados en el castillete, una estructura lo suficientemente fuerte como para mantener los cilindros alineados en su posición. En los trenes modernos de alta velocidad, cilindros y ampuestas pueden ser remplazados en las cajas en cuestión de minutos por medio de cambiadores automáticos de cilindros.

Por supuesto, para conseguir una banda totalmente uniforme y plana, es absolutamente esencial lograr una posición adecuada que permita soportar las enormes fuerzas y la velocidad del laminado. Para mantener dicha posición, los rodamientos y los husillos motorizados juegan un papel trascendental, al tiempo que permiten la realización de ajustes.

Durante la laminación se riegan los cilindros y la banda con una emulsión aceitosa que actúa como refrigerante y lubricante.

En la entrada de los trenes tándem para chapa y para hojalata, se fija la banda mediante unos prensadores neumáticos o hidráulicos. Estos prensadores suelen ser de madera y producen el suficiente rozamiento para sujetar la banda cuando el extremo final de una bobina ha salido de la caja anterior. Estos prensadores también van provistos de guías laterales de bronce para asegurar que la banda vaya centrada adecuadamente al pasar por el tren.

Para recoger la banda en forma de bobina, se utilizan bobinadoras que se encargan además de darle la tensión adecuada. A continuación se zunchan con un fleje de acero.

Un mecanismo básico de la caja de laminación es el sistema de apriete, necesario para imprimir fuerza sobre la banda. Dicho sistema aplica la fuerza desde los lados del cilindro de apoyo superior, siendo posible hacer una distribución asimétrica de la carga (mecanismo de *bending*). Es habitual encontrar dos tipos de sistemas para este apriete: a través de un tornillo accionado por un motor eléctrico o mediante un sistema hidráulico (este último utilizado en el tren en estudio).

Los cilindros están libres en dirección vertical. La unión del rodillo con la caja se hace a través de un elemento mecánico denominado ampuesa. Las ampuestas son cilindros concéntricos al eje del rodillo con rodamientos dentro, que permiten el giro del rodillo a la vez que su movimiento vertical. La traslación vertical de los rodillos puede considerarse una no linealidad del proceso, ya que el rozamiento con el castillete provoca una histéresis perjudicial.

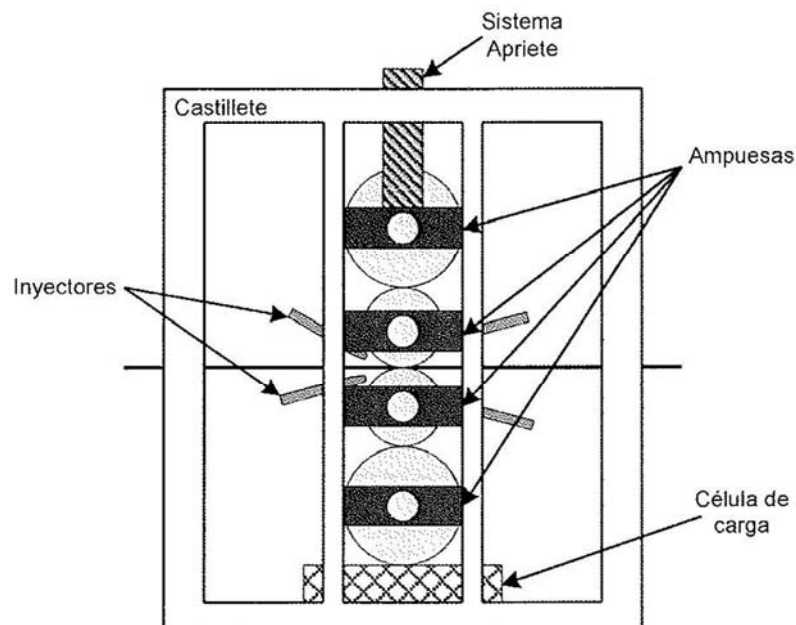


Figura 3.11 Mecanismos principales de una caja de laminación

Los rodillos de trabajo están unidos a través de sendos ejes y uniones articuladas a una transmisión accionada por potentes motores eléctricos. El funcionamiento de estos es vital para el tren. De hecho la mayor limitación que el

sistema puede alcanzar, en cuanto a reducción y velocidad de laminado, viene determinada por la potencia de los motores instalados. Estos mecanismos de potencia y transmisión son una fuente de vibraciones constante que ha de ser monitorizada y controlada a fin de evitar defectos superficiales en el producto final.

La lubricación en el proceso de laminación en frío merece un estudio aparte debido a su gran importancia y complejidad. Lleva a cabo una función doble: por un lado mantiene las condiciones de rozamiento estables en unos niveles determinados y por otro se encarga de evacuar calor de la banda y el área de mordida. El líquido lubricante puede variar desde componentes únicos (aceites lubricantes o grasa) a compuestos emulsionados (aceites mezclados con agua). El tren tándem es lubricado a través del uso de emulsiones de gran densidad (alto contenido en grasa) mediante aplicación directa (en circuito abierto) a la entrada de la caja sobre la banda y los rodillos de trabajo. A su vez existe un sistema de refrigeración encargado de controlar la temperatura de los rodillos de laminación, formado por una serie de inyectores de agua dispuestos a la salida de la caja y en paralelo con los rodillos. Según la cantidad de inyectores activados y el grado de abertura de los mismos se mantendrá una temperatura óptima.

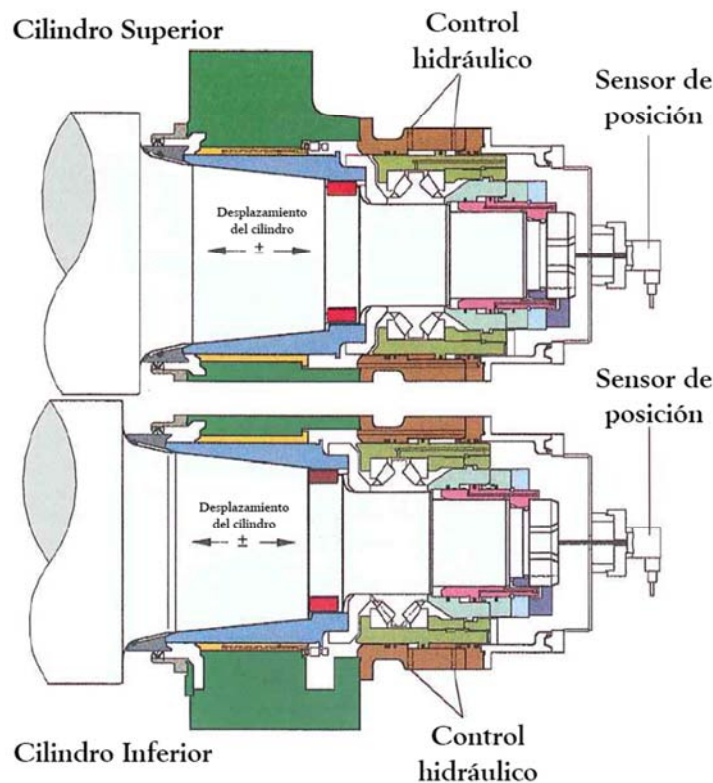


Figura 3.12 Dibujo esquemático de una ampuesa.

3.2.2.2 INTERACCIÓN ENTRE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL TREN CUATRO

Una caja de un tren consta de:

- Castillete
- Cilindros superiores e inferiores montados en ampuestas.
- Actuadores de posición tanto para las ampuestas superiores como inferiores.
- Actuadores de giro para los cilindros. Arbolillos.
- Dispositivos de posición y fuerza realimentados.
- Actuadores de curvatura para los cilindros. Bending.

El *castillete* está construido para soportar la pila de cilindros y proporcionar la reacción a las fuerzas de carga de los cilindros principales del tren y a las fuerzas de carga del bending (Es decir contrarrestar la fuerza de separación que tiene lugar entre los cilindros durante la laminación).

Los *cilindros de trabajo* son posicionados normalmente por un motor que gira un tornillo, el eje del cual pasa a través de una arandela, por la parte superior del castillete y la cabeza de la cual posiciona la ampuesa superior del cilindro. También puede incorporar cilindros hidráulicos ya bien sea en la parte inferior de las ampuestas de los cilindros de apoyo o en la parte superior del castillete actuando igualmente sobre las ampuestas de los cilindros de apoyo.

En un tren cuatro los cilindros inferiores y superiores son conocidos como *cilindros de apoyo*, estos cilindros son de diámetro mayor y su principal funcionalidad es la de reducir la cantidad de bending durante el laminado de los cilindros de trabajo.

Los *cojinetes de los cilindros de apoyo* son camisas con cabeza en forma de cuña con una fina película de aceite entre las dos superficies. Los cojinetes de los cilindros de trabajo son normalmente cojinetes de bolas lubricadas con grasa.

Para mantener la apertura necesaria entre los cilindros de trabajo cuando no hay chapa – *roll gap* -, los cilindros superiores, cilindros de apoyo, están

sostenidos por un sistema llamado roll balance compuesto de cilindros hidráulicos, los cilindros hidráulicos de equilibrado.

La fuerza de separación de los cilindros es medida a través de las *celdas de cargas* que están localizadas tanto entre las ampuestas del cilindro de apoyo inferior y el castillete como entre las ampuestas de los cilindros de apoyo superiores y el tornillo o la tuerca y el castillete.

El castillete está diseñado para soportar el conjunto de todas las cargas sin que se produzcan descuellos significativos en los lados que van a interferir con el libre movimiento de las ampuestas de los cilindros cuando las fuerzas son aplicadas.

El castillete ejerce fuerzas sobre los cuellos de los cilindros por diferentes propósitos:

- Fuerzas de laminación para comprimir la chapa.
- La fuerza para balancear el peso del cilindro de apoyo superior durante el cambio de los cilindros de trabajo.
- La fuerza para asegurar el contacto entre el cilindro de trabajo superior y el cilindro de apoyo superior.
- Las fuerzas para aplicar la flexión a los cilindros de trabajo para el control de la planitud y el perfil de espesor.

En el diseño estándar de un tren cuatro es normal que haya un Offset entre los ejes de los cilindros de trabajo y los de apoyo Figura 3.13. El rango de Offset suele variar entre 4 y 7mm. La razón de este Offset es la de proporcionar estabilidad a la pila de cilindros. Los cilindros de trabajo tienen desplazado su eje hacia el lado de salida de la banda de forma que a mayores tensiones de salida tenderán a apretar las ampuestas de los cilindros de trabajo contra los forros. Si los cilindros de trabajo estuviesen en el mismo eje que los cilindros de apoyo, podrían desplazarse y flexionarse horizontalmente en la dirección resultante del balance entre las tensiones de entrada y salida. Algunos trenes operan sin Offset mientras que algunos diseños recientes de trenes tienen un Offset ajustable.

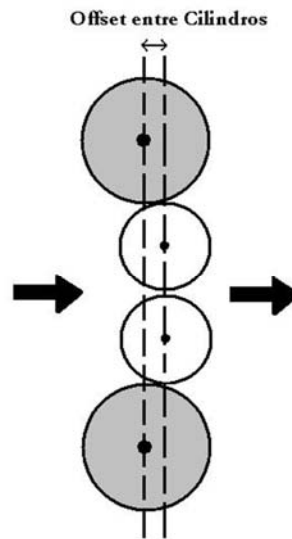


Figura 3.13 Offset entre los cilindros de trabajo y los de apoyo.

El diseño básico de un tren cuatro conduce a la flexión de los cilindros de trabajo dado que la fuerza está aplicada en los extremos de los cilindros de apoyo, fuera del ancho de la banda, por ello siempre se tiende a flexionar los cilindros alrededor de la banda causando sobre laminación de los bordes de la banda y generando mal aspecto superficial. Este efecto se ve altamente afectado por las variaciones de espesor, fuerzas de laminación y cambios térmicos. Es por esto que algunos mecanismos son necesarios para compensar estos defectos, los más comunes son el roll bending y desplazamiento en la dirección axial de los cilindros de trabajo Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16 donde se ve en detalle los diferentes componentes de los cilindros de apoyo y la flexión y ángulos que se generan de flexión en los propios cilindros generado por la fuerza sobre las ampuestas de los mismos.

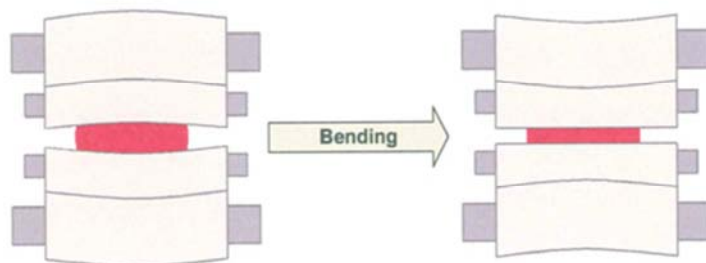


Figura 3.14 Distintos efectos del Bending.

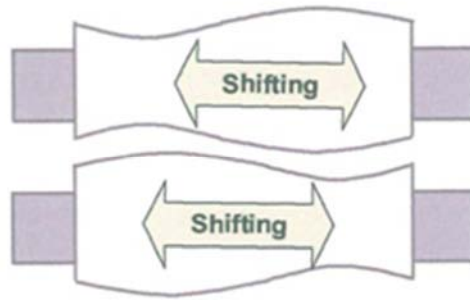


Figura 3.15 Desplazamiento con cilindros de trabajo CVC.

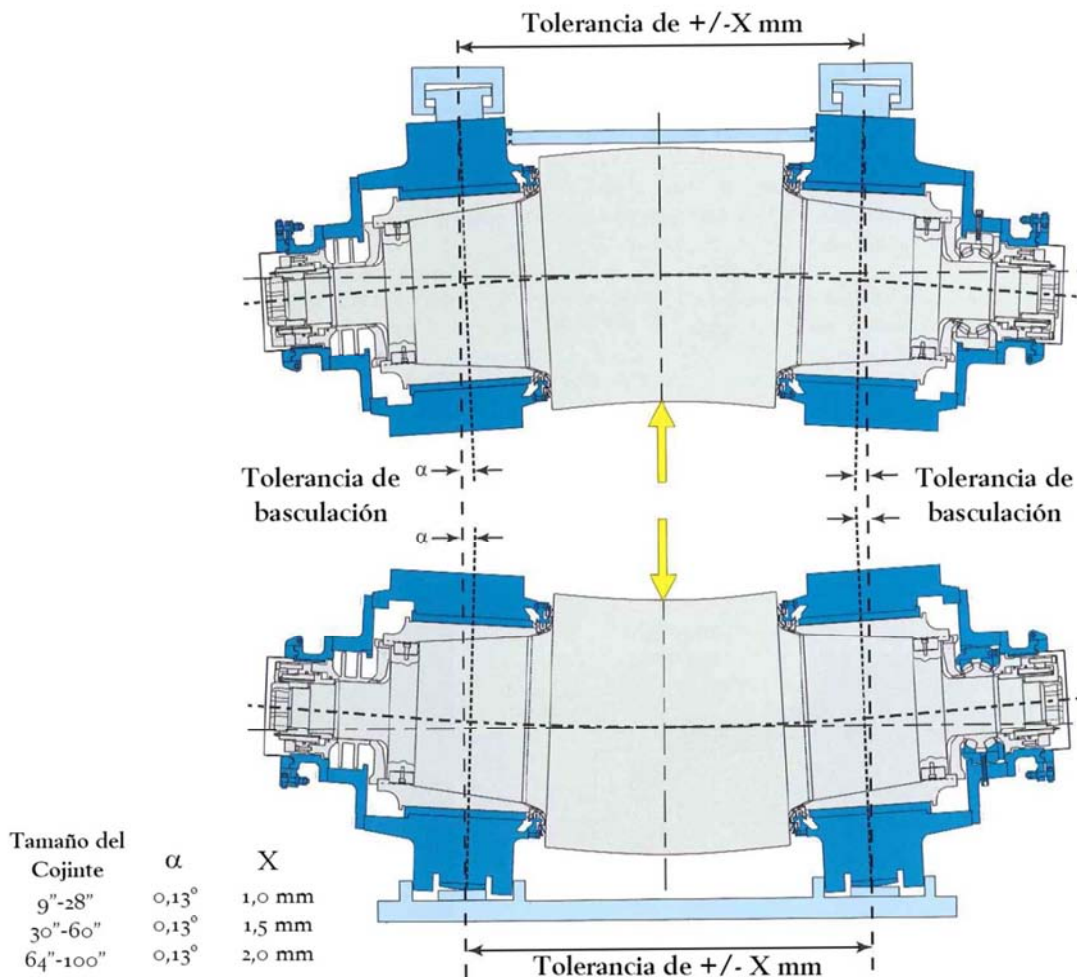


Figura 3.16 Grado de libertad de los cilindros de trabajo.

Entre cada par de cajas adyacentes en las cuales la banda puede estar al mismo tiempo, los rodillos flexores están instalados para controlar el flujo de

masa y las tensiones de la banda. La tensión interna de la caja debe ser lo suficientemente grande para evitar sobresaturación pero lo suficientemente baja como para evitar que los cuellos de los cilindros entren en contacto o rotura de banda. El propósito original del rodillo flexor de regulación, Figura 3.17, en un tren de laminación es dirigir la banda dentro de un lazo de almacenaje de emergencia cuando el flujo de masa de metal entre dos cajas adyacentes estuviese temporalmente fuera de equilibrio. De hecho los rodillos de regulación también estabilizan un bajo nivel de tensión entre cajas para minimizar desviaciones en la anchura y en el flujo de masa entre cajas.

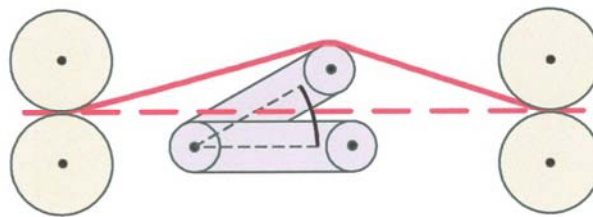


Figura 3.17 Rodillo flexor entre dos cajas de laminación

3.3 EQUIPOS DEL TREN TÉMPER DCR

Los diferentes elementos que componen el Tren DCR se agrupan en los siguientes bloques:

1. Equipos Lado Entrada
2. Equipos entre Cajas
3. Equipos Lado Salida

3.3.1 EQUIPOS LADO ENTRADA

El equipo de entrada del Tren se compone de los siguientes elementos:

- Viga galopante con cinco posiciones.
- Desflejadora en la cuarta posición de la viga galopante.
- Carro de alimentación giratorio.

- Estación de despunte.
- Carro de transporte de bobinas y medición de diámetro de bobinas lado de entrada.
- Dispositivo recogedor de bobinas residuales.
- Desbobinadora de cabeza de expansión doble.
- Compensación de la carrera de expansión.
- Regulación de centraje de banda.
- Transportador de cinta magnética.
- Cizalla de corte transversal.
- Rodillo anti-flutter.
- Bridas de tensión con guías de banda y rodillos de enhebrado.

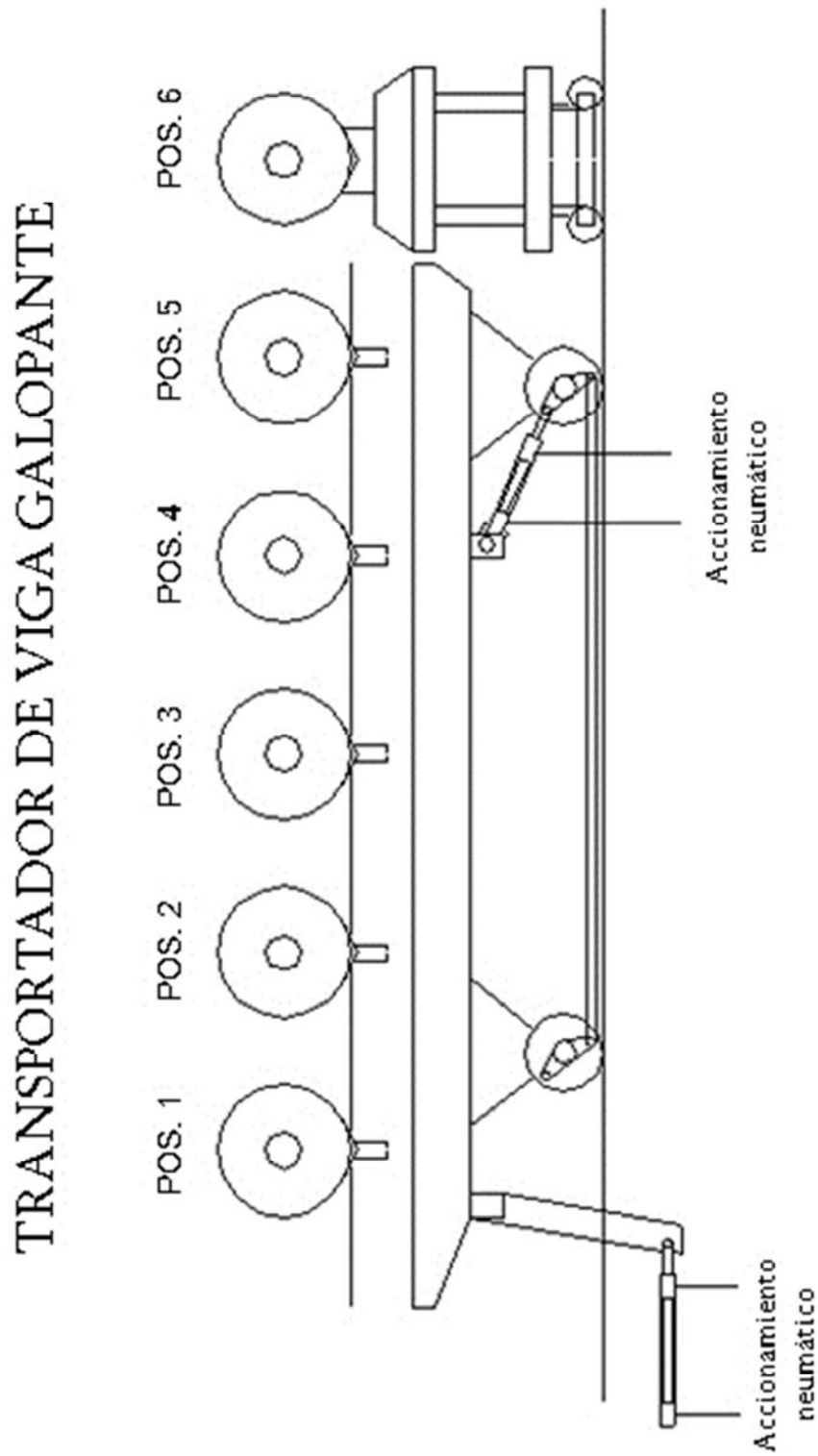


Figura 3.18 Transportador de Viga galopante

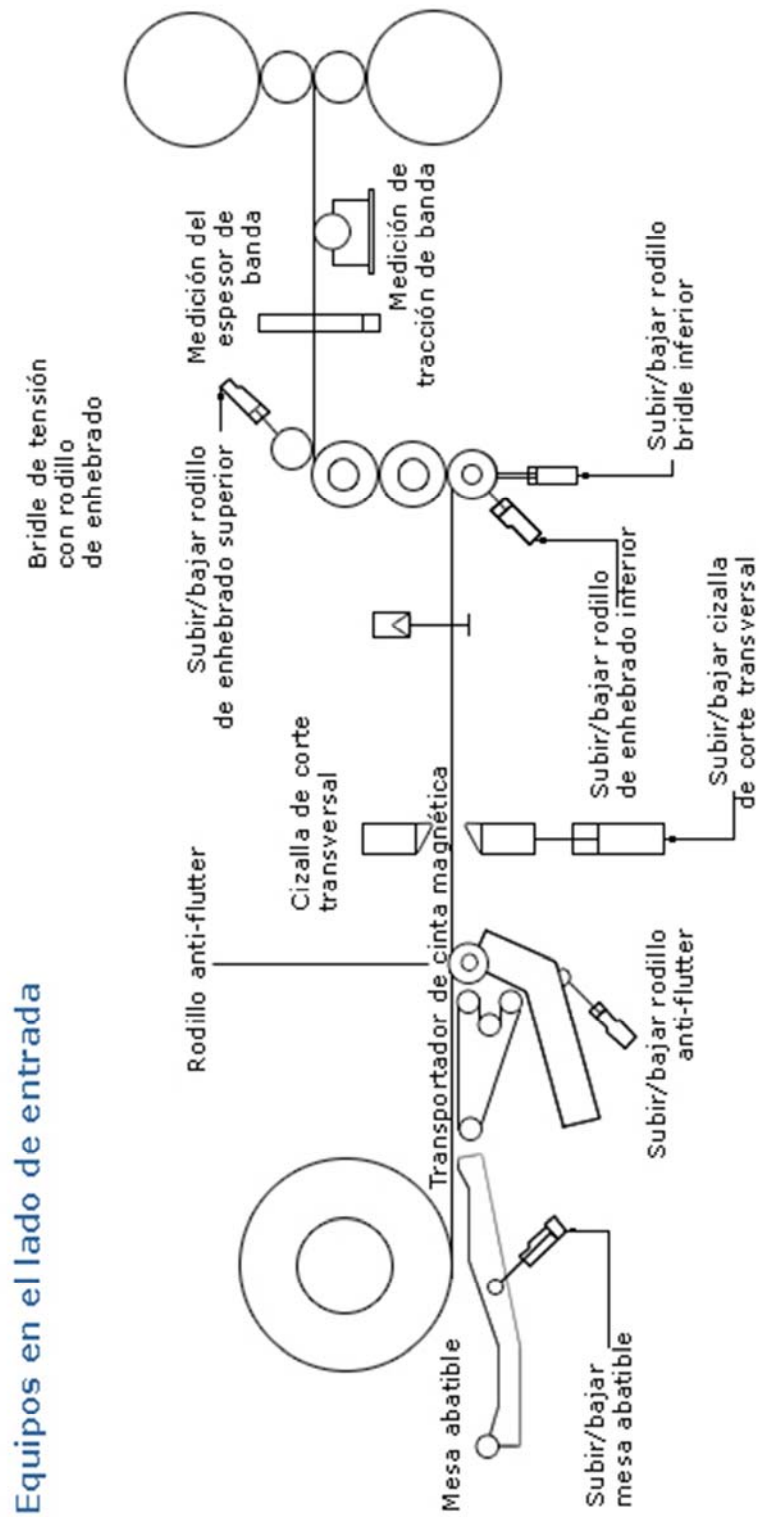


Figura 3.19 Equipos en el lado de entrada

3.3.1.1 DESBOBINADORA DE CABEZA DE EXPANSIÓN DOBLE

Elemento que se encuentra en la entrada del laminador. Cada cabeza de expansión esta accionada por un motor con rotor de jaula de ardillas trifásico. El motor dispone de un disco de freno y de pinzas de freno.

Se compone esencialmente de dos medio-bobinadoras, mecánicamente idénticas. Ambas mitades se pueden expandir, colapsar y desplazar hidráulicamente.

Para recibir la bobina ambas cabezas han de estar colapsadas y separadas una de la otra. Las cabezas de expansión se pueden volver a juntar una vez posicionadas correctamente (vertical y horizontalmente) mediante el carro de bobinas.

Nada más alcanzar cada cabeza de expansión la posición delantera se puede proceder a la expansión de los mandriles. A continuación el carro baja y retrocede.

De acuerdo con el valor prefijado desde la medición de ancho de bobinas se posiciona la bobina en el eje de la instalación. Ya puede comenzar el proceso de enhebrado.

Los mandriles colapsan y las cabezas de expansión se separan de nuevo después de desbobinar la bobina, una vez agarrada la bobina residual por la pinza de evacuación. Ahora el carro de bobinas puede entregar la siguiente bobina.

Las cabezas de expansión se deben desplazar conjuntamente mediante un cilindro hidráulico. Al acoger la bobina las cabezas se desplazan en sentidos opuestos. Y para el posicionado de la bobina en el eje de paso de banda, las cabezas de expansión se desplazan en la misma dirección.

Según el laminado y diámetro exterior de la bobina se fija la presión de expansión.

3.3.1.2 REGULACIÓN DE CENTRAJE DE BANDA

La desbobinadora dispone de una regulación de centraje de banda. Su función es centrar la banda en el eje de paso de banda, corrigiendo todas las espiras no alineadas sobre el canto y eliminando las desviaciones producidas

por bobinas recibidas con un centraje imperfecto. Un detector de cantos de banda óptico, registra la posición de la bobina en la zona de entrada. Los cilindros de desplazamiento de las cabezas de expansión actúan en la regulación del centraje de banda. Los valores obtenidos en ambas cabezas se carean y si se salen las desviaciones de un determinado rango se dispara la parada.

El centraje de banda se realiza durante el enhebrado.

3.4 DATOS TÉCNICOS DEL TREN

Los principales datos técnicos del Tren DCR están recogidos en la Tabla 3-1 y Tabla 3-2 Datos técnicos del tren (continuación).

DATOS TÉCNICOS DEL TREN DCR	
PRODUCCIÓN	
Temple seco + Temple húmedo	230.000 Tn/año
Doble reducción:	100.000 Tn/año

Tabla 3-3.

Tabla 3-1 Datos técnicos del tren

DATOS TÉCNICOS DEL TREN DCR		
Dimensiones de la banda		
Anchura de banda	Máx. 1.300 m	
	Mín. 600 mm	
Espesor de banda	Lado entrada	Máx. 0,60 mm
		Mín. 0,15 mm
	Lado salida	Mín 0,14 mm
Alargamiento de la banda:	Simple reducción	máx de 2%
	Temple húmedo	Entre 2% y 10%
	Doble reducción	Reducción en Caja 1: Máx. 40%
		Alargamiento en Caja 2: Máx. 1%

DIMENSIONES DE LA BOBINA	
Diámetro exterior	Máx. de 2.000 mm
	Mín. de 1.000 mm
Diámetro interior	Entrada: 420 mm
	Salida: 420 mm
Peso de bobina	Máx.:23 Tn

Tabla 3-2 Datos técnicos del tren (continuación).

DATOS TÉCNICOS DEL TREN DCR	
PRODUCCIÓN	
Temple seco + Temple húmedo	230.000 Tn/año
Doble reducción:	100.000 Tn/año

Tabla 3-3 Datos del tren

Dimensiones de cilindros de apoyo	Diámetro	Máx. 1.100 mm
		Mín: 1.000 mm
	Longitud de tabla	1.400 mm
	Alojamiento	Cojinetes Morgoil
Cilindros de trabajo diseño CVC	Diámetro	Máx. 560 mm
		Mín. 510 mm
	Longitud de tabla	1.600 mm
	Alojamiento	Rodamiento de rodillos
Cilindros de trabajo DR diseño CVC	Diámetro	Máx. 400 mm
		Mín. 360 mm
	Longitud de tabla	1.600 mm
	Alojamiento	Rodamiento de rodillos
Desplazamiento axial de cilindros CVC	± 100 mm	
Velocidad del Tren	Máx. 2.200 m/min	
Fuerza de laminación por caja	Máx. 12.000 kN	

3.4.1 SENSORES Y SISTEMAS DE CONTROL

Actualmente, en la mayoría de los trenes, son los cilindros de trabajo los que están accionados. Para transferir potencia a estos cilindros uno de los cuellos está provisto de caras planas (espada) que encaja perfectamente en el árbol de transmisión. Este va conectado por medio de engranajes a un motor de corriente continua. La mayoría de los trenes tienen los árboles de transmisión acoplados a una caja de engranajes que asegura que los dos cilindros giran a la misma velocidad. Los trenes modernos tienen doble transmisión. Así, la rotación de los cilindros debe sincronizarse por medio de tacómetros y circuitos de control. Además de potencias transmitidas por los árboles de transmisión pueden ser equilibradas en los dos motores.

- V_e Velocidad de entrada
- V_s Velocidad de salida
- V_R Velocidad periférica del rodillo de trabajo
- h_0 Espesor inicial a la entrada del tren
- h_e Espesor de entrada
- h_s Espesor de salida
- F_H Fuerza ejercida por el sistema hidráulico sobre el rodillo de apoyo
- F Fuerza ejercida por la banda sobre los rodillos de trabajo
- σ_e Tensión de entrada
- σ_s Tensión de salida
- T Par de laminación
- w Ancho bobina
- μ Coeficiente de rozamiento
- f Deslizamiento $\left(\frac{V_s - V_R}{V_R}\right)$
- r Reducción $\left(\frac{h_e - h_s}{h_e}\right)$
- M Masa por rodillo trabajo/apoyo
- B_m Amortiguamiento de la caja
- K_m Rigidez de la caja
- E Módulo elástico del acero
- L Distancia entre cajas
- K_t $\frac{\partial F}{\partial \sigma_e}$
- K_s $\frac{\partial F}{\partial h_s}$
- K_e $\frac{\partial F}{\partial h_e}$
- S_i Límite elástico de la banda en la caja i
- R Radio del cilindro
- R_m Radio modificado del cilindro

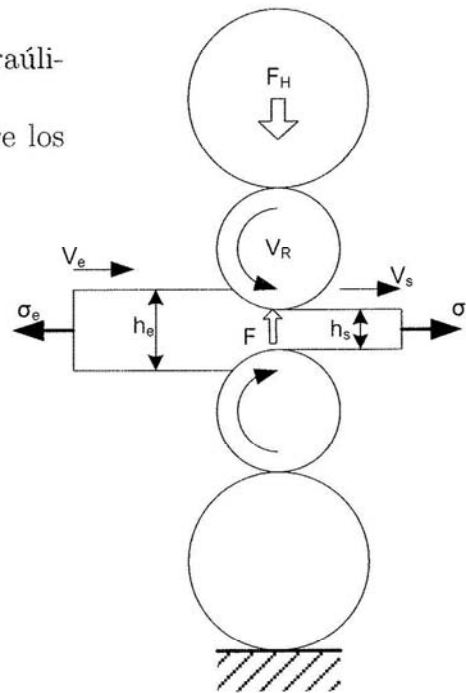


Figura 3.20 Parámetros del tren témpor

Hoy en día los trenes funcionan con la velocidad regulada, de tal forma que la velocidad del motor se mantiene lo más cerca posible de un estándar fijado, incluso bajo condiciones de carga, aceleración y deceleración muy variables. Una vez que el tren está preparado, debemos desenrollar la banda a procesar antes de que entre en la caja. Esta operación se lleva a cabo en desbobinadoras de cunas de rodillos o de mandril.

A lo largo del tren, nos encontramos con una amplia gama de instrumentos que incluyen amperímetros, indicadores de velocidad, tensiómetros, etc.

El laminado en frío de bobinas de acero es un proceso complejo bajo el prisma del control, derivado de la gran cantidad de parámetros existentes y de la dinámica e interacción de los mismos. A pesar de que en la práctica varios son los parámetros y estrategias de control utilizados, se pueden resumir en dos las variables objetivo fundamentales: el espesor de salida y la tensión entre cajas (a veces incluso la fuerza total). A su vez las acciones de control se llevarán a cabo sobre la abertura de cilindros y la velocidad de giro de los rodillos, siendo por tanto los actuadores fundamentales el sistema hidráulico de apriete y los accionamientos eléctricos del tren. Otra variable importante es el nivel de plenitud de la banda, aunque éste se considera de manera aislada [87].

Cada una de las cajas de laminación con sus tensiones y fuerzas forma un conjunto multivariable que se acopla a las demás cajas, vía instantánea a través de las tensiones, o con cierto retraso a través de la evolución del espesor.

En el trabajo de Bryant [7] se define un concepto fundamental para el posterior desarrollo de cualquier sistema de control: cualquier tensión o valor de espesor en el tren tándem podrá ajustarse sin afectar de manera significativa a las otras tensiones y espesores.

Mediante el uso de unos conceptos y simplificaciones fundamentales tales como: el desplazamiento (f), ecuación (3.1), relación entre la velocidad del rodillo (V_R) y la de la salida del área de mordida (V_s); la ecuación de continuidad de flujo másico (considerando ancho y densidad del material constante), Ecuación (3.2) que relaciona el producto velocidad (V) por espesor (h) en los diferentes puntos de la banda, especialmente a la entrada y salida; y la relación lineal (M) entre el espesor de salida (h_s) y la fuerza (F), para una abertura inicial (S_0) de cilindros, ecuación (3.3), se construyen las interrelaciones entre las diferentes variables fundamentales del proceso.

$$f = \frac{V_s - V_r}{V_r} \quad (3.1)$$

$$V_e \cdot h_e = V_s \cdot h_s = V \cdot h \quad (3.2)$$

$$h_s = s_o + \frac{F}{M} \quad (3.3)$$

Así aparecen expresiones que relacionan los cambios en las tensiones entre cajas y espesor a la salida de la banda con las variaciones de velocidad y gap (abertura cilindros), teniendo en cuenta todas las interacciones posibles con el resto de cajas (en [79] aparecen demostradas estas relaciones). Aunque esta aproximación presenta en la actualidad algunas carencias, sigue siendo un buen punto de partida para la comprensión del problema de control en este tipo de aplicaciones.

El control práctico de la tensión entre cajas puede llevarse a cabo a través de dos estrategias: el control por gap o por velocidad. En el control por gap se controla la variación de tensión a través del cambio en la abertura entre cilindros. Aprovechando la propiedad por la cual un cambio en el actuador de posición afecta en mayor medida a la tensión trasera que a la delantera, se suele plantear un control de tensión en base a la abertura de cilindros de la caja aguas abajo, ver Figura 3.21 con la alimentación hacia delante del tensiómetro, hacia el sistema hidráulico de posicionamiento (H). Sin embargo en el control de tensión por velocidad la tensión entre cajas es modificada a través del control sobre el regulador de velocidad de la caja anterior, ver por velocidad.

Donde la señal de tensión realimentará al regulador de velocidad del motor (M). La ecuación (3.4) describe como la diferencia de velocidades a la entrada y salida de cajas contiguas produce variaciones del valor de la tensión entre ellas (σ). Destacar que ambos controles pueden utilizarse de manera simultánea a fin de aumentar el rendimiento general del control de tensiones.

$$\dot{\sigma}_{i,i+1} = K(V_{ei+1} - V_{si}) \quad (3.4)$$

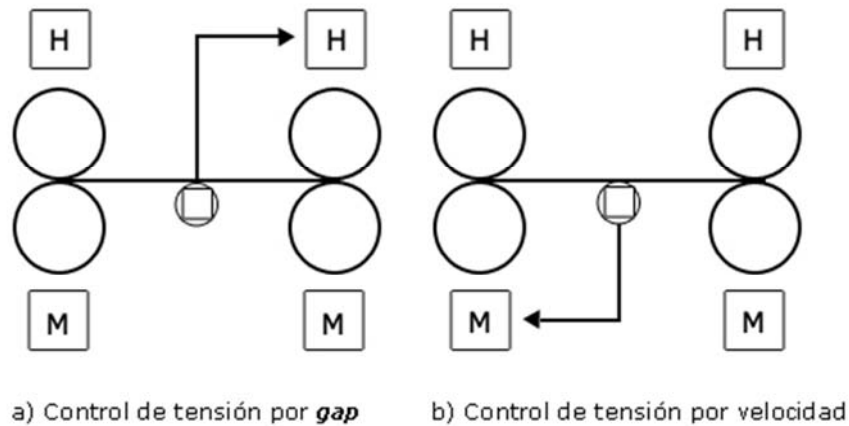


Figura 3.21 Control de tensión: a) por *gap* y b) por velocidad.

El control del espesor es algo más complejo, requiriendo de una serie de lazos que compensen los distintos acoplamientos que se dan en una supuesta modificación del espesor de salida de una caja. Se conoce como AGC (automatic gage control) al conjunto de sistemas encargados del control de espesor de la bobina a través del cambio en la abertura de cilindros. En un planteamiento clásico puede contener los siguientes lazos de control:

- El lazo esencial de ajuste de la abertura de los cilindros.
- Un control feedback del error de espesor.
- Un control feedforward del error de espesor.
- Un control de flujo de masas.

El sistema de ajuste del *gap* se encarga de controlar la abertura de los rodillos de trabajo. Es el sistema principal del AGC ya que la acción de control de mayor ajuste sobre el espesor se lleva a cabo con esta abertura entre rodillos. Desarrollado a fin de estimar el espesor de la banda pero sin requerir una medición directa, trata el castillete como un muelle que sufre una elongación según la carga aplicada. El sistema no es completamente rígido y por tanto las variaciones en el espesor así como los defectos de forma de la banda afectan a la posición del rodillo al “estirar” la caja. No se trata pues de controlar la abertura del rodillo de trabajo sino la fuerza aplicada a través de la posición del cilindro hidráulico de carga, ecuación (3.3). Dicho sistema hará uso de la lectura de

células de carga o medidas de presión, en caso de haber un sistema de apriete hidráulico, para estimar con exactitud la fuerza de laminación en juego.

El control feedback proporciona el modelo de control y medición más simple y universal. A través de una galga de rayos X (Figura 3.22) se estima el error de espesor de la banda (espesor salida medido-espesor salida objetivo) y se realimenta el lazo bien hacia los actuadores de posición o a los accionamientos de velocidad. Por ejemplo, es habitual realimentar el regulador de posición de la caja 1 desde una galga a la salida de dicha caja con muy buenos resultados en el rendimiento general. De la misma manera y en ciertas estructuras de control, una galga a la salida del tren suele realimentar los accionamientos de velocidad de algunas cajas aguas arriba a fin de mejorar el espesor. Es importante recordar que dicha medición se lleva a cabo después de que el material haya salido de la zona de contacto con los cilindros, lo que significa que ha habido un retraso entre la modificación del espesor y su medición. Este retraso afectará a la dinámica del control, limitando el ancho de banda del sistema. Este tipo de control es considerado lento aunque muy útil para eliminar errores con periodos prolongados.

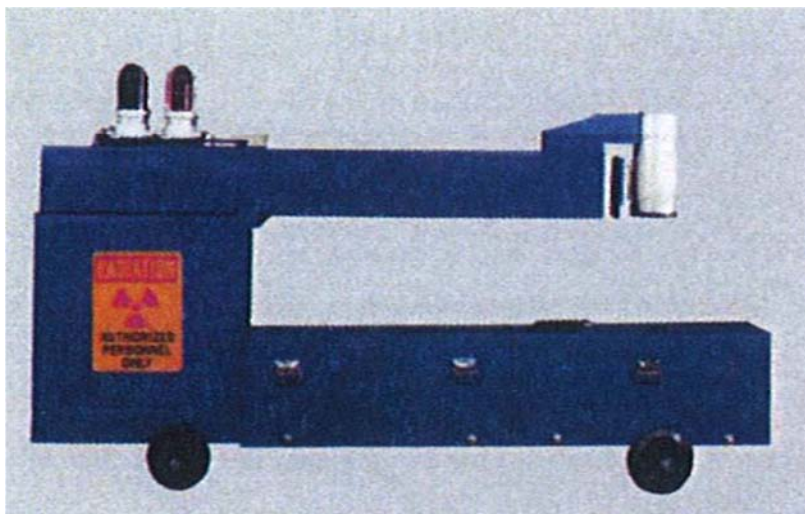


Figura 3.22 Galga de Rayos X

Con la introducción de un lazo feedforward se consigue un avance significativo en el rendimiento del sistema. La banda suele presentar variaciones de espesor cíclicas debido a procesos previos como la laminación en caliente. En general se hallan en una frecuencia que no puede ser corregida por el feedback siendo necesarios nuevos lazos de control. Un planteamiento clásico consiste en medir el espesor de la banda que entra y ajustar la posición del cilindro de carga basado en esta señal previa, para después, tras la

compensación por el retraso en el transporte, ajustar las velocidades de las cajas aguas abajo.

La disposición perfecta de un lazo feedback sería colocar el dispositivo de medición de espesor en la ventana del laminador y de esta forma, obtener una realimentación instantánea de la acción de control. Sin embargo no es práctico medir el espesor de la banda directamente en la mordida por diversos motivos técnicos. No obstante, sí es posible extraer una medida instantánea del espesor de salida siempre que esté basada en otras magnitudes medibles.

Estos sistemas se conocen por el nombre de control de flujo másico. Como en el laminado en frío no se da ninguna expansión lateral del material, se asume un flujo de masa constante a lo largo de la banda, pudiéndose expresar este como el producto de la velocidad por el espesor en cada uno de esos puntos, ver ecuación (3.2). Por tanto basta con medir la velocidad de entrada y salida de la banda, así como el espesor de entrada para determinar el espesor de salida. Sin embargo este proceso requiere mediciones exactas de las velocidades a la entrada y salida así como del espesor de entrada, sólo posibles a través del uso de sofisticados sensores no siempre disponibles.

Un modo de explotación de este control implica mantener un valor del flujo de masas en una caja para, en otra, a través del control de velocidad, mantener el espesor constante. Es habitual la designación de una llamada caja piloto cuya velocidad no se ajusta por los mecanismos típicos de control y sirve como referencia para el resto de cajas. Con la medida del espesor de salida de esta caja piloto será posible gobernar la velocidad de las otras cajas para un espesor determinado. Otro modo de explotación consistirá en calcular el espesor de salida de la primera caja para después hacer un seguimiento del mismo a través del resto del tren, calculando así el espesor de salida de cada caja a través de la ecuación de continuidad en combinación con medidas exactas de la velocidad de salida de cada caja.

Es incluso posible contemplar en el bucle todos los factores molestos del laminador (coeficientes de fricción,...), obteniendo un lazo de control muy robusto capaz de hacer frente a situaciones fuera de las condiciones óptimas de funcionamiento (aceleración, deceleración, cambios de tensión,...).

En la Figura 3.23 puede observarse el diagrama simplificado del sistema de control de un tren Tándem. Puede observarse como el control de la tensión desde la caja 2 a la 4 (T_{12} , T_{23} y T_{34}) se lleva a cabo a través de una doble estrategia de control por gap/ velocidad. Parece además, que la acción de

control de las cajas aguas abajo se reparte entre las anteriores, mejorando el reparto de tensiones. Mención aparte es el control de la tensión entre las cajas 4 y 5 (T_{45}) donde el sistema parece estar preparado para un control muy fino con realimentaciones a la caja delantera y trasera, sin duda alguna motivado por la importancia de la calidad del producto en la etapas finales del proceso.

El control de espesor en esta instalación se lleva a cabo mediante estrategias de feedback, feedforward y control de la apertura de cilindros, utilizando galgas de rayos X para la medición del espesor a la entrada de la caja 1 y a la salida de la caja 1,2 y 5 (esta última dispone de una doble galga para medidas redundantes). En las cajas 4 y 5 existe un lazo de realimentación (FB5) SISO donde se ajusta la velocidad y posición del gap, en base al error de espesor medido a la salida del tren. Este lazo junto con el de tensiones son los encargados de eliminar las desviaciones del error y de asegurar la calidad del producto final. En la caja 1 se dispone de otro lazo de realimentación (FB1) que actúa sobre el gap. Este tipo de lazos es de respuesta lenta y está indicado para variaciones con un periodo largo, habituales de los procesos anteriores. Cabe recordar que en este sistema la caja piloto es la número 4, gobernando a partir de ésta el resto de la instalación. El sistema dispone de 3 lazos feedback además de una estrategia feedforward en las cajas 1, 2 y 3. El de la caja 1 (FF1) se alimenta de las lecturas de la galga a la entrada del tren y actúa sobre el sistema hidráulico de dicha caja, mientras que los de 2 y 3 (FF2 y FF3) lo hacen además sobre la velocidad de la caja anterior a fin de preservar la continuidad de masa.

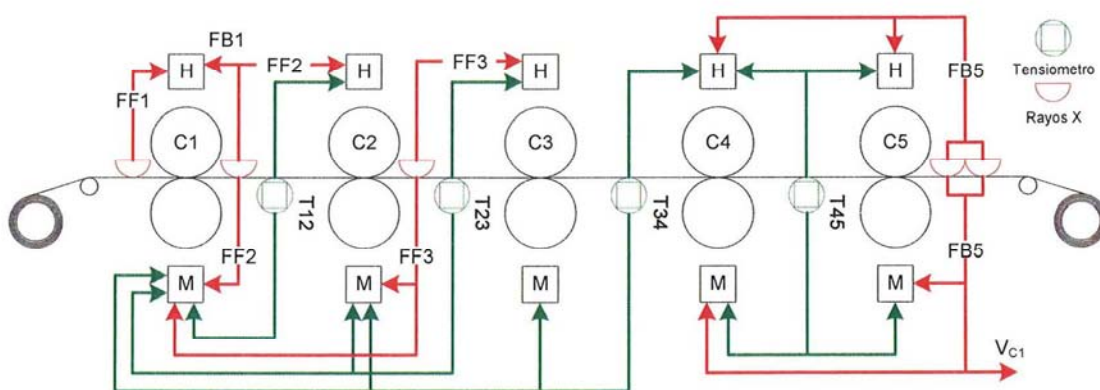


Figura 3.23 Diagrama simplificado con los diferentes lazos de control del tren, sensores y actuadores (H, sistema hidráulico; M control motores).

A través de los apuntes anteriores se describe una aproximación básica a los lazos de control habituales de un sistema de laminación en frío así como las ecuaciones físicas que los gobiernan. En la actualidad existen mecanismos más complejos de control: H^∞ [63]; sistema MIMO con observador [49];... Sin embargo los elementos mencionados forman el núcleo de funcionamiento de la mayoría de los trenes actuales en marcha.

3.5 SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Existen diferentes y complejos sistemas de estudio de un tren de laminación en frío, Tándem y Témpér. A continuación se detallan algunos de ellos contemplados a la hora de enfrentar el estudio de este trabajo:

3.5.1 SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y MINERÍA DE DATOS SOFTDETECT

El sistema softdetect se desarrolla como mecanismo de generación e implementación en tiempo real de modelos basados en datos, independiente además de la aplicación o línea industrial asociada. Pensando para trabajar en entornos multivariados altamente complejos, la aplicación posee una serie de herramientas avanzadas que permiten el estudio de grandes conjuntos de datos mediante técnicas de minería de datos. En este trabajo el equipo fue utilizado en una instalación de laminación en frío sobre un tren Témpér.

Desde la adquisición misma de los datos al uso final de un modelo sobre el proceso, el usuario dispone en todo momento de completa información sobre el conjunto de datos y una biblioteca con las funciones de análisis más variadas y útiles. Uno de los objetivos claros es el de permitir llevar a cabo un proceso de análisis de manera rápida, sin la necesidad de una etapa de exportación de datos a otros sistemas, para una posterior aplicación de una metodología de extracción de información (KDD).

3.5.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El sistema se vertebra en torno a tres bloques con las siguientes funcionalidades:

- Adquisición de datos y monitorización on-line.
- Análisis de datos off-line para preparación de datos y extracción de características.

- Gestión de modelos y reglas generados.

3.5.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS Y MONITORIZACIÓN ON-LINE

La aplicación on-line adquiere información de señales muestreadas a través de tarjetas de adquisición propias del sistema softdetect y de variables del ordenador de proceso de la planta. La lista de variables de proceso incluye: número de bobina, tipo de material, ancho de la bobina, temperaturas, indicadores de calidad,... Las analógicas incluyen: velocidad en cada caja, fuerzas de laminado, vibraciones,... La lista completa de variables se encuentra disponible en el anexo A.

En términos de hardware el equipo se compone de un ordenador dedicado y varias tarjetas de adquisición dentro de un armario especial de protección para ambientes industriales agresivos. El ordenador está equipado con tres tarjetas de adquisición para la captura de las señales de campo y una serie de filtros para evitar posibles problemas de aliasing, además cuenta con interfaces de red para su correcta integración en el esquema de comunicaciones de la planta

Básicamente la herramienta posee dos modos de funcionamiento: el funcionamiento en vacío y el modo normal. El modo vacío permite obtener información sobre excentricidad y otras condiciones generales, de los rodillos y el tren, sin la influencia de la banda siendo procesada. Este tipo de información proporciona la “huella dactilar” de los nuevos rodillos en el inicio de una campaña de laminación. Gracias a esta aplicación los técnicos encargados de la operación pueden seguir el comportamiento de los rodillos de trabajo a lo largo de su vida útil. El objetivo del modo normal es la monitorización del estado del tren. Se lleva a cabo a través de la adquisición de variables durante el proceso mismo de laminación. Los principales indicadores de validez aquí vigilados, dentro de las variables disponibles en este modo de funcionamiento, son el espesor de la banda (señal analógica) y el rango de tolerancia $\pm 0,3\%$ (señal del ordenador de proceso).

Las señales de campo son procesadas en bloques y calculado para cada uno de ellos los valores de media, valor eficaz y valor eficaz en bandas de frecuencia. Además se pueden crear nuevas variables a través de la combinación de las existentes mediante operadores algebraicos. La información mostrada en tiempo real por la aplicación de monitorización es:

- Señales en el dominio del tiempo.

- Señales en el dominio de la frecuencia (FFT).
- Estadísticos básicos (media, desviación, máximo, mínimo).

La aparición de la ventana principal se muestra en la Figura 3.24. Esta ventana muestra el espectro de las fuerzas (lado operador, lado motor y total) y la vibración de la caja seleccionada con etiquetas con las frecuencias características de los rodillos y sus múltiplos. Los valores de medias, desviaciones y máximos/ mínimos aparecen al lado de las gráficas. En la figura 2.11 se observa un ejemplo de la aplicación mostrando las señales de campo simultáneamente en el tiempo y en frecuencia.

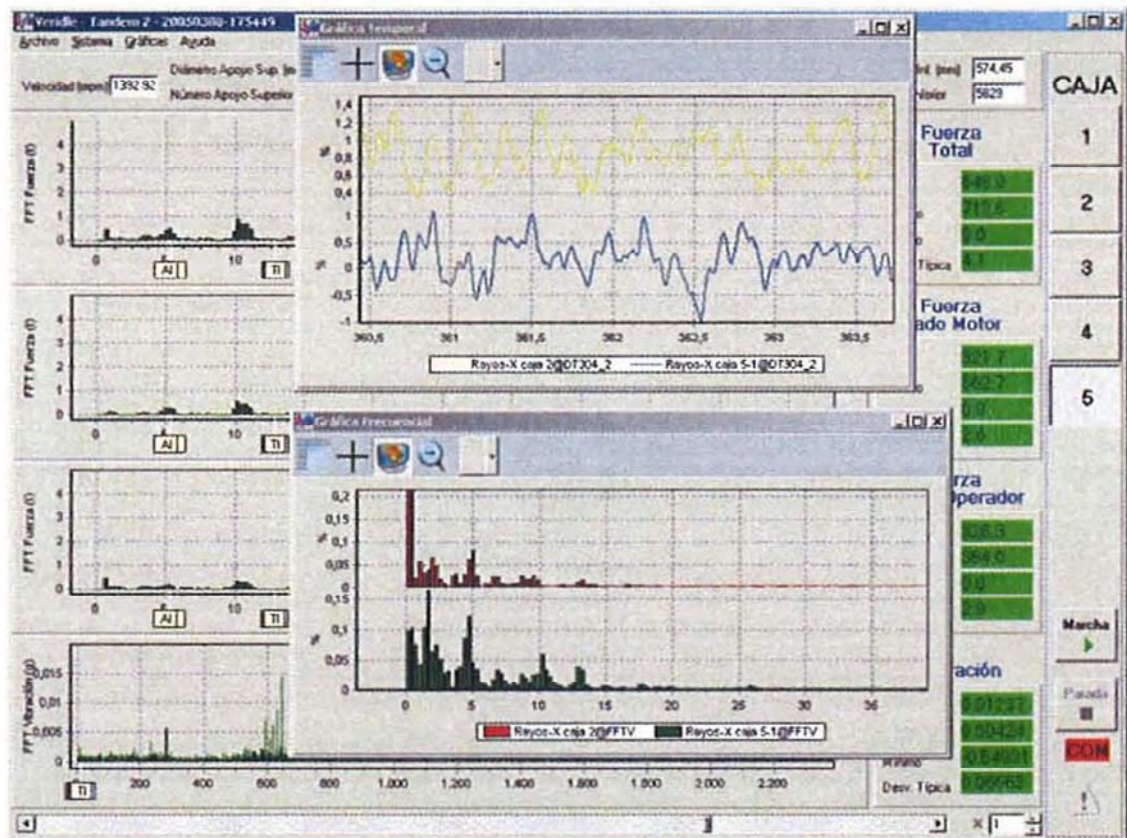


Figura 3.24 Ventana principal de la aplicación de adquisición con ventanas secundarias.

3.5.2.2 ANÁLISIS DE DATOS OFF-LINE

La aplicación de análisis de datos off-line está dedicada al análisis de los datos adquiridos por la aplicación on-line. El objetivo de esta herramienta es la

definición de características que contengan la mayor información posible sobre los posibles estados de funcionamiento del tren Tándem.

Este proceso comienza con la selección de las bobinas y variables a tener en cuenta. En esta fase el usuario puede seleccionar el valor representativo de cada variable (media, valor eficaz, valor eficaz en bandas de frecuencia,...) o cualquier combinación algebraica de las mismas. La aplicación se diseñó con las miras puestas en la aplicación de procedimientos de data mining visual. Sobre esta idea se implementaron varias técnicas de visualización: representación temporal, diagramas de dispersión de puntos, tablelens, pdfscatterplot (diagramas de dispersión con la densidad de probabilidad incorporada mediante colores), PCA (análisis de componentes principales), gráficos de correlación y mapas auto-organizados (SOM).

En todo momento se tiene información visual completa sobre los datos analizados. Por ejemplo, en cada gráfico, la bobina a que se refiere cada punto puede ser identificada con un color y un símbolo diferentes. Además los ejes y el resto de parámetros de visualización son altamente configurables, permitiendo una gran versatilidad a la hora del análisis, ver Figura 3.25 donde se muestra una ventana principal de la aplicación de análisis mostrando un mapa de distancias (arriba izda.), seis mapas de componentes (drcha.), una dispersión de puntos y una temporal.

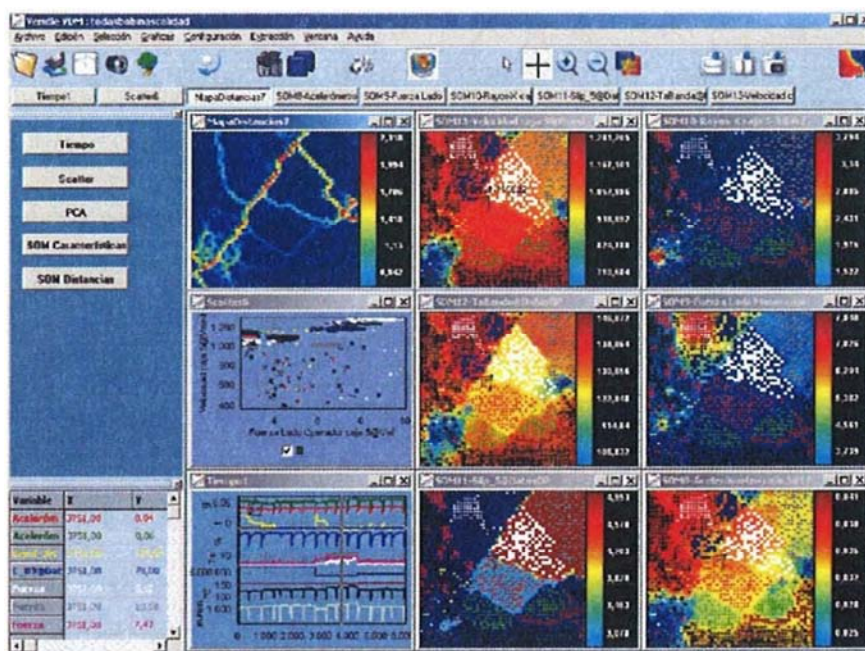


Figura 3.25 Ventana principal de la aplicación de análisis

3.5.2.3 APLICACIÓN DEL GESTOR DE MODELOS

Esta aplicación se diseña para la generación y gestión de modelos a partir de las características y datos obtenidos con ayuda de las aplicaciones anteriores. Combina dos clases de modelos: modelos a partir de la reducción de la dimensión (SOM) y modelos basados en reglas.

El uso de las aplicaciones anteriores habrá permitido establecer una serie de características que definan estados de funcionamiento de la planta en estudio a través de la generación de un SOM. Es misión del gestor darle la categoría de modelo a través de la definición de las diferentes condiciones de funcionamiento, Figura 3.25. La Figura 3.26 muestra la ventana principal del gestor de modelos mostrando algunos mapas de componentes, un mapa de distancias umbralizado (arriba izda.) y otro corriente.

El gestor de modelos permite almacenar y cargar en la aplicación on-line los modelos por él definidos. El modelo así cargado contiene la configuración necesaria para definir un punto de funcionamiento en tiempo real representando el estado instantáneo del proceso. Mediante la representación gráfica de este punto de funcionamiento sobre el mapa del modelo definido será posible analizar la evolución del proceso sobre las diferentes condiciones de funcionamiento del tren previamente definidas, así como orientar a la identificación de otras nuevas. De igual manera es también posible visualizar gráficamente, sobre la aplicación on-line, el valor de los residuos, ver Figura 3.27.

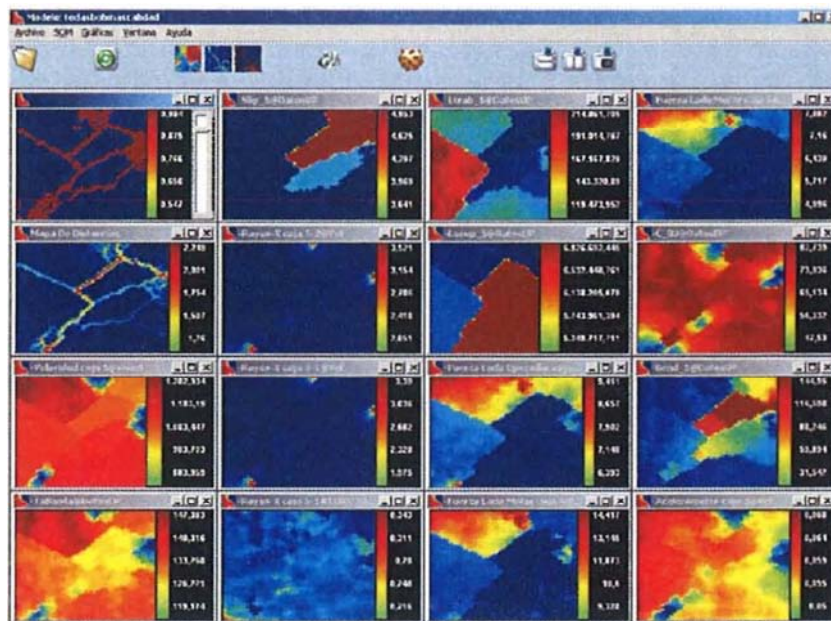


Figura 3.26 Ventana principal del gestor de modelos.

La muestra la monitorización del tren con modelo SOM. Se observa sobre la ventana de adquisición: ventana de residuos (izda.), mapa de estados (arriba drcha.) y una representación temporal (abajo drcha.).

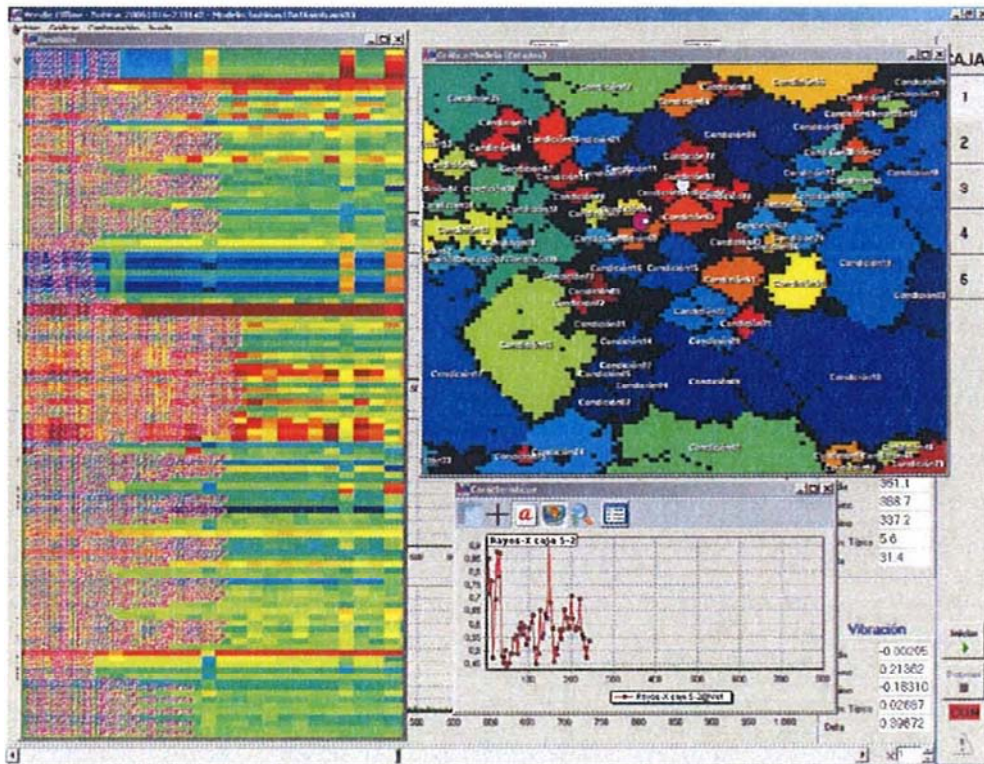


Figura 3.27 Monitorización del tren con modelo SOM.

CAPÍTULO 4

MODELOS DE TRENES DE LAMINACIÓN

4 MODELOS DE CONTROL

4.1 INTRODUCCIÓN

Para analizar el defecto superficial de pliegue debemos conocer el sistema de control del segundo proceso de laminación en frío para la fabricación de la hojalata, tren témpor, los diferentes modelos de regulación y su clasificación:

- Modelo estático
- Modelo dinámico

A continuación estudiaremos los diferentes tipos de regulación y control existentes de un tren témpor para poder atender a los siguientes puntos:

- Tener una visión general de los mecanismos de control del proceso.

- Saber en qué consiste el sistema de defecto.
- Conocer los modos de operación del tren.
- Conocer el mecanismo de regulación del tren.
- Y finalmente tener en cuenta los elementos diferenciales que hacen difícil este control.

4.2 MODELADO DE TRENES DE LAMINACIÓN EN FRÍO

La laminación de metales ha sido una de las primeras actividades industriales del hombre moderno. Desde los primeros intentos, en la antigüedad, de obtener láminas de metales preciosos a los procesos actuales en trenes tándem, muchas han sido las aplicaciones y diferentes tecnologías utilizadas. Sin embargo, a pesar de ser un procedimiento tan común, aún hoy es un área de investigación importante plagada de interrogantes. En muchas ocasiones los nuevos avances realizados en el área plantean nuevos y más complejos retos.

Los actuales sistemas de laminación son fruto de la evolución constante de la técnica. La gran heterogeneidad de elementos que los conforman (refrigeración, lubricación, sistemas de potencia,...) hacen necesario la interacción de diferentes mecanismos de control para asegurar una producción de calidad. Todo este desarrollo se basa en el modelado físico del proceso de reducción de espesor del material. De esta manera las complejas interacciones durante el aplanado entre el material, rodillos, lubricantes, etc,... han de ser correctamente definidas para lograr resultados óptimos.

Los tipos de modelos aquí referidos son de carácter analítico, donde una serie de expresiones matemáticas relacionan diferentes aspectos y parámetros involucrados en la laminación. Las principales variables de control en este proceso son la fuerza de laminación aportada por los rodillos de trabajo y el tiro o tensión a la que se somete a la banda, siendo la variable objetivo es espesor de salida del material.

Tres son los grandes elementos que interactúan en el proceso de laminación: el material a laminar, el lubricante y los rodillos de trabajo. El comportamiento exacto de cada uno de ellos es extremadamente difícil de describir con exactitud. Por ello se llevan a cabo una serie de simplificaciones y asunciones que son las bases de los diferentes modelos de laminación. Muchos de estos modelos requieren un aparato matemático inviable para su implementación en sistemas

industriales y sin embargo paseen una incuestionable utilidad a nivel conceptual. Otros modelos, por otro lado, se desarrollan atendiendo a la eficiencia computacional y a unos buenos resultados prácticos.

Cada uno de los elementos críticos de la laminación tiene su propia problemática en el proceso de modelado. El material a laminar, en un proceso de laminación en frío, va a experimentar una importante reducción de espesor a una velocidad muy elevada. Esta particularidad hace que algunas propiedades mecánicas del mismo (en especial el límite elástico,...) varíen respecto a los valores propios de los ensayos normalizados. Además durante el proceso mismo de laminación el material experimentará diferentes estados de deformación (elástico, plástico, fluencia,...) que son por un lado difíciles de modelar y por otro complejos de delimitar. Esto y otras características secundarias convierten el modelado del material en un reto importante.

En cuanto a la lubricación de la laminación, el problema estriba en estimar el estado de fricción. En primer lugar es necesario conocer qué elementos se ven implicados en el área de mordida, pudiendo considerar solo la interacción banda-material o también la introducción de un lubricante y sus propiedades asociadas entre ambos. Por otro lado, muchos modelos consideran un estado friccional al que le corresponde un único valor de razonamiento. Las primeras preguntas surgen en cuanto a cómo calcular ese valor y si de verdad es constante en toda el área de mordida. Se acepta mayoritariamente la existencia de un punto neutro en el área de mordida donde las velocidades de rodillo y banda se igualan, estando el resto del área dominada por una mezcla de fricción y deslizamiento. Nadai [58] propone un modelo con tres condiciones de fricción diferentes:

- Un coeficiente de fricción constante
- Un valor de la tensión tangencial (τ) derivada del rozamiento constante
- Un valor de fuerza friccional relacionada con la velocidad de deslizamiento.

Los estudios más actuales consideran características hidrodinámicas en la lubricación, basándose en el fenómeno por el cual al aumentar la velocidad del proceso, menos fuerza de laminación es requerida.

Los rodillos de laminación plantean también una serie de cuestiones importantes. A pesar de que los modelos iniciales tratan al rodillo como un sólido rígido indeformable parece claro que los mismos están sometidos a un

determinado perfil de presiones que; forzosamente, deforman su perfil circular. En este sentido los intentos por describir con exactitud la forma del rodillo en el área de mordida, han llevado a ciertos autores a plantearse dos cuestiones. Por un lado, cómo es exactamente el perfil de presiones que el rodillo experimenta en el área de mordida, y por otro, cómo deforma el mismo al área de contacto de laminación. No se debe olvidar que evaluar correctamente el área de contacto banda-rodillo es vital para modelar las condiciones de rozamiento del proceso, ya que ambos aspectos están íntimamente relacionados. Por suerte parece haber un amplio acuerdo sobre el uso del trabajo de Hitchcock [54] para el cálculo de un diámetro equivalente, en el modelado del rodillo deformado.

4.2.1 MODELOS ESTÁTICOS

Los primeros modelos de interés científico fueron publicados por Von Kármán [55] durante el año 1925. En ellos se definen los parámetros fundamentales de la teoría de laminación: ángulos, fuerzas de rozamiento, presiones de laminado, reducción, límite de elasticidad del material,... A través de una ecuación diferencial se establece un modelo que se apoya sobre ciertos supuestos y simplificaciones del proceso y el material. Las simplificaciones de partida, adoptadas posteriormente por muchos otros autores, incluyen:

- La banda de acero constituye un medio continuo sin cambios de propiedades bruscos.
- Las propiedades mecánicas o bien no se alteran a pesar de la deformación sufrida o bien lo hacen de una manera predecible a lo largo de toda el área de contacto.
- El proceso de laminado (presión sobre la banda) es homogéneo durante la deformación plástica del material. En general se considera que las secciones planas se mantienen planas tras la laminación.
- En el proceso de compresión no se da deformación lateral, es decir, no se altera el ancho inicial de la banda. De esta manera el mecanismo de laminado puede ser estudiado como un proceso de dos dimensiones.
- Se supone una distribución uniforme del lubricante a lo largo del área de mordida entre banda y rodillos. Ésta es una de las asunciones más críticas, ya que en realidad las características de rozamiento dependen de la lubricación. Por otro lado la capa de lubricante puede no ser homogénea a lo largo de la mordida, variando las propiedades de fricción en la misma.

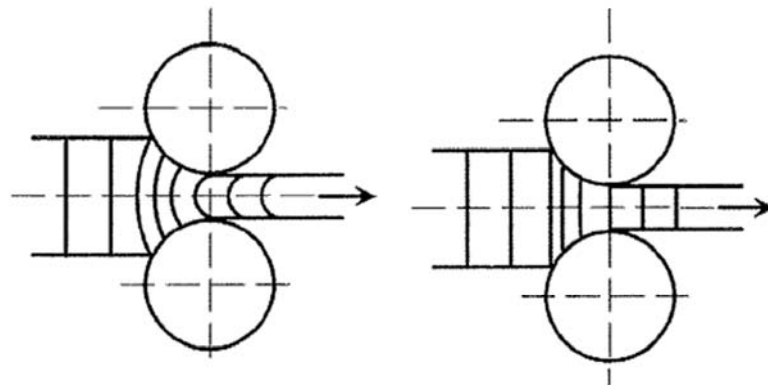


Figura 4.1 Compresión no homogénea y homogénea.

- En la mayoría de las teorías se suponen los rodillos completamente rígidos, de ahí la consideración de un radio constante en el área de mordida. Trabajo posteriores [48] suponen la deformación elástica de los mismos que afecta a la forma de la curva de mordida. En la ecuación (4.1) se encuentra esta expresión, donde se tiene en cuenta el coeficiente de Poisson (ν), la fuerza de laminación (F), el ancho de la banda (w), el módulo elástico del material E y la diferencia entre el espesor de entrada y el de salida (Δh).

$$R_m = R \left(1 + \frac{16 (1 - \nu^2) \frac{F}{w}}{\pi E \Delta h} \right) \quad (4.1)$$

- La ecuación (4.1) estima la deformación elástica en el radio de un rodillo
- El ángulo de contacto entre el rodillo y la banda se supone muy pequeño, es decir, el tamaño del rodillo es muy grande en comparación con el espesor de entrada de la banda.
- La aceleración de la banda en la mordida es despreciable, debido a que la energía presente en este proceso es despreciable en comparación a la necesaria para la deformación del material.
- Los efectos térmicos en la laminación en frío son despreciables a pesar de que durante la deformación la temperatura en el área de mordida asciende

sensiblemente. Esta simplificación ayuda a suponer muy poco variable al límite elástico del material así como las características de lubricación durante la laminación.

La operativa de estos modelos es muy típica. El objetivo final es casi siempre obtener el valor de fuerza del sistema de apriete y de par sobre los rodillos, necesarios para llevar a cabo un proceso de reducción en unas condiciones dadas. El mayor esfuerzo estriba en alcanzar una expresión que describa con exactitud el perfil de distribución de presiones en el área de mordida. Una vez definido será necesario un proceso de integración de la expresión para lograr el cálculo de fuerza y par. Obviamente, de la complejidad de la expresión de la distribución dependerá la posibilidad del proceso de integración y con ello de resolución del modelo. En este sentido es habitual la asunción de simplificaciones de diferente naturaleza, de tal manera que sea posible el cálculo de la integral en unas condiciones de tiempo y recursos apropiados a los fines de un proceso real.

4.2.1.1 EL MODELO DE VON KÁRMÁN

El modelo de Von Kármán [55] sienta las bases de muchos trabajos posteriores. El modelo describe la distribución de presiones a lo largo del área de contacto (mordida) asumiendo un coeficiente de rozamiento (μ) constante. Este modelo asume una distribución de presiones en la mordida, ecuación (4.8) y la ecuación (4.9), donde se alcanza un máximo en el denominado punto neutro (N). En la misma figura es posible definir el ángulo de mordida (θ_i) y el ángulo neutro (θ_n).

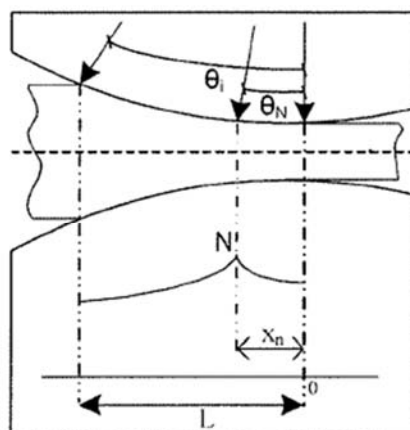


Figura 4.2 Distribución de presiones según Von Kármán del tipo friction-hill.

Como se observa en la ecuación (4.10), existirá una distribución de presiones (P) a lo largo del área de contacto entre banda y material (área de mordida). Tomando una sección infinitesimal de la banda, la fuerza, de carácter radial, soportada por este elemento será la ecuación (4.2).

$$P \frac{dx}{\cos \theta} \quad (4.2)$$

La componente horizontal de esta fuerza que se opone a la entrada de la banda quedará por tanto $P \tan \theta dx$.

Por otro lado en el área de contacto se producirá una fuerza normal a la presión radial existente derivada del rozamiento. Teniendo en cuenta μ como el coeficiente de rozamiento del proceso, esta fuerza será la dada por la ecuación (4.3).

$$\mu P \frac{dx}{\cos \theta} \quad (4.3)$$

Este tipo de modelos se calculan sobre una sección del ancho total de la banda, siendo por tanto las fuerzas manejadas de carácter específico.

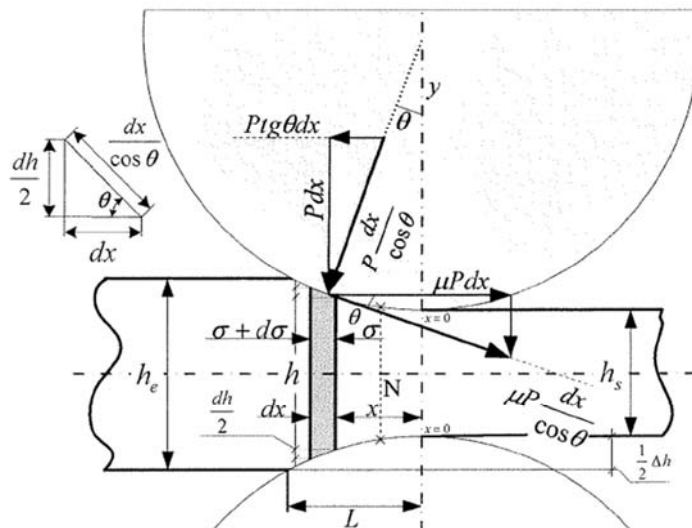


Figura 4.3 Diagrama de fuerzas durante el proceso de laminación.

La componente horizontal de la misma, responsable en cierta manera del estirado de la banda, quedará $\mu P dx$.

Dichas fuerzas horizontales producen sobre las caras del elemento infinitesimal unas fuerzas de compresión, designadas $(\sigma + d\sigma)$ en la cara mayor $(h+dh)$ y (σ) en la cara menor (h) . Al resolver el equilibrio horizontal de fuerzas y asumiendo el trabajo de dos rodillos de laminación se obtiene la ecuación (4.4).

$$2P \tan \theta dx \mp 2 \mu P dx = (\sigma + d\sigma) (h + dh) - h\sigma \quad (4.4)$$

Destacar el signo variable (F), que hará referencia a la zona considerada en el cálculo respecto al punto neutro. Se supone que en el punto neutro la banda se mueve a la misma velocidad que el rodillo, desarrollándose un punto de no deslizamiento. Por lo tanto y debido al propio proceso de reducción la banda irá más lenta que el rodillo en la zona desde la entrada al punto neutro y más rápido desde el punto neutro hasta la salida. Esto significa que las fuerzas de rozamiento antes y después del punto neutro tendrán sentidos opuestos, generando el cambio de signo antes referido.

Agrupando términos en la ecuación (4.4) se obtiene la ecuación (4.5), donde

$$P (\tan \theta \mp \mu) = \frac{d(\frac{h\sigma}{2})}{dx} \quad (4.5)$$

el signo de la ecuación dependerá de estar tomando la sección elemental a un lado o al otro del eje neutro de la mordida. Por otro lado y debido a consideraciones geométricas representadas por ecuación (4.6) , nos queda la expresión de la ecuación (4.7).

$$\frac{1}{2} \frac{dh}{dx} = \tan \theta \quad (4.6)$$

$$P \left(\frac{1}{2} \frac{dh}{dx} \mp \mu \right) = \frac{d(\frac{h\sigma}{2})}{dx} \quad (4.7)$$

Para la resolución de la ecuación diferencial es necesario expresar el término σ en función de P . El criterio de plastificación de Tresca describe la condición según la cual, un material dúctil, presentará fluencia en algún punto cuando el valor de la tensión cortante máxima alcance un valor límite correspondiente a la fluencia en un ensayo normalizado. Matemáticamente la ecuación (4.8) relaciona las tensiones principales σ_1 y σ_3 en un punto dado con el límite elástico del material (σ_c). En un proceso de compresión como el de laminación las tensiones principales serán las fuerzas de compresión verticales por un lado (término $P(1 \pm \mu \tan \theta)$) y las tensiones horizontales por otro (σ). Sustituyendo se obtiene la ecuación (4.9).

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_c}{2} \quad (4.8)$$

$$P(1 \pm \mu \tan \theta) = \sigma_c + \sigma \quad (4.9)$$

Además y como se menciona con anterioridad, ya que los ángulos de entrada son muy pequeños el término $\mu \tan \theta$ es depreciable quedando $P = \sigma_c + \sigma$. Sustituyendo en la ecuación (4.7) resulta finalmente la expresión de la ecuación (4.10), piedra angular de las teorías clásicas de laminación, que relaciona los parámetros más importantes en la laminación con los términos P y x , variables a resolver.

$$\frac{P}{2} \frac{d_h}{d_x} \mp P \mu = \frac{d \left(\frac{h}{2} (P - \sigma_c) \right)}{d_x} \quad (4.10)$$

Smith en [95] evoluciona el modelo anterior de tal manera que en vez de asumir un radio constante de laminación propone un arco parabólico de contacto entre banda y rodillo (supone por tanto cierta deformación del rodillo), ver Figura 4.4, cuya expresión viene dada en la ecuación (4.11). Esta descripción analítica del arco de mordida debe ser introducida en la ecuación (4.7) para su posterior resolución.

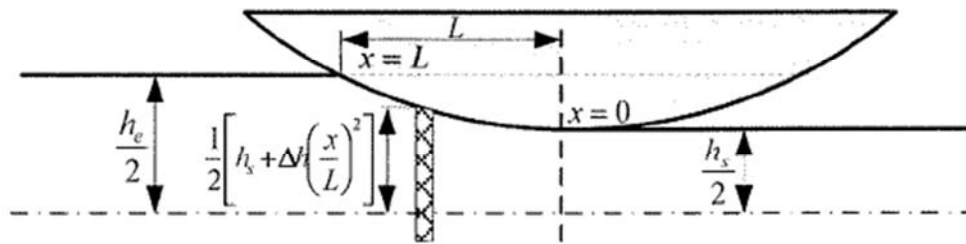


Figura 4.4 Geometría considerada teniendo en cuenta la deformación del rodillo en el modelo de Smith.

$$\frac{h}{2} = \frac{1}{2} \left[h_s + \Delta h \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

Sustituyendo la ecuación (4.11) y su derivada sobre la expresión anterior ecuación (4.10) y tras la reordenación de términos, resultará la ecuación (4.12).

$$\frac{d\left(\frac{P}{\sigma_c}\right)}{d\left(\frac{x}{L}\right)} = \frac{\frac{2 \Delta h}{h_2} \left(\frac{x}{L} \mp \frac{P L \mu}{\sigma_c \Delta h} \right)}{1 + \frac{\Delta h x^2}{h_2 L^2}} \quad (4.12)$$

Este tipo de modelos es de compleja resolución, más aún si se considera la época de su formulación, sin apenas ningún tipo de ayuda computerizada. Los primeros intentos de resolución fueron a través de herramientas gráficas, calculando punto a punto la expresión obtenida. Mediante este mecanismo Trinks en [91], sobre el trabajo de Smith, obtuvo una serie de curvas, que relacionaban la presión ejercida durante la laminación con otros factores como espesor de entrada, límite elástico del material, ángulo de mordida,...etc.

4.2.1.1.1 MODIFICACIONES A LA ECUACIÓN DE VON KÁRMÁN

Desde el modelo de Von Kármán varios autores comenzaron a asumir ciertas simplificaciones que permitieron integrar y resolver más fácilmente la ecuación de distribución de presiones. En esta línea Tselikov [67] propone un modelo donde supone que el ángulo de mordida θ_i es contante e igual a la mitad del ángulo de entrada de la banda. Cabe relatar que la asunción de Tselikov es válida solo para ángulos de contactos pequeños, tradicionales en la laminación

de bandas muy finas. Así el autor partiendo de la ecuación (4.4). Alcanza la ecuación fundamental de distribución de presiones las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15), donde los términos ξ y S_1 son constantes.

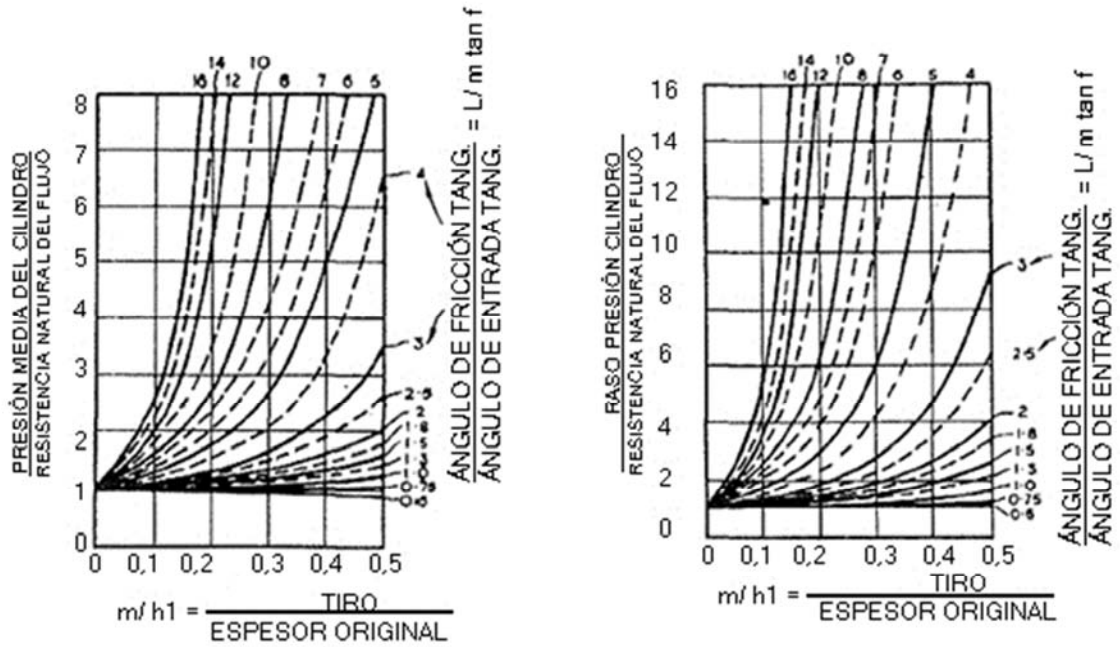


Figura 4.5 Curvas de Trinks para la resolución gráfica del modelo basado en Von Kármán. [55]

$$P^- = \frac{S_1}{1 + \xi} \left[\left\{ \frac{P_e}{S_1} (1 + \xi) - 1 \right\} \left(\frac{h_e}{h} \right)^{1+\xi} + 1 \right] \quad (4.13)$$

$$\xi = \frac{\tan(\tan^{-1}\mu - \theta)}{\tan \theta} \quad (4.14)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_c}{1 + \mu \tan \theta} \quad (4.15)$$

Posteriormente el autor lleva a cabo la integración de estas expresiones en la ecuación (4.16) para el cálculo de la fuerza específica necesaria para el proceso de laminación. Así obtiene expresiones algebraicas simples (sin términos diferenciales) para un cálculo de diversos parámetros críticos como la fuerza de la laminación o la ubicación del punto neutro del proceso. Con la resolución de estas ecuaciones Tselikov [67] confeccionó una serie de diagramas, ver Figura 4.6, ilustrando el efecto de diferentes valores de coeficientes de fricción (μ), reducción de espesor y diámetro de rodillos, en la distribución de presiones (esta forma de distribución de presiones se conoce como friction-hill).

Ecuación correspondiente al área entre el plano de entrada y el punto neutro (P^*).

$$F = \int_0^L P (1 \mp \mu \tan \theta) dx \quad (4.16)$$

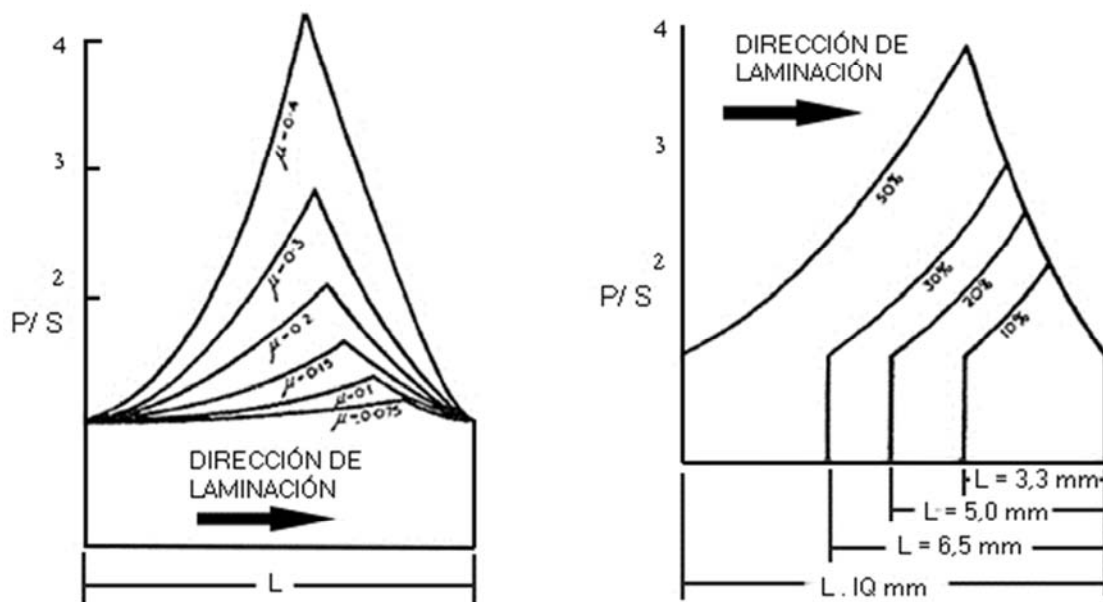


Figura 4.6 Distribución de presiones según Tselikov

Nadai [58] basándose en Von Karman lleva a cabo una evolución bastante interesante del modelo. En primer lugar introduce el concepto de tensiones externas sobre la banda, aumentando así la aplicabilidad del modelo sobre el

proceso de laminación en frío. Con este factor adicional el criterio de Tresca podrá escribirse como $P - (-\sigma) = \sigma_c$, donde las dos fuerzas principales serán la presión de laminación (P) y la tensión externa (σ), que deberán ser capaces de superar el límite elástico del material (σ_c) para llevar a cabo una deformación de la banda.

Además el autor asume la existencia de ángulos lo suficientemente pequeños tal que permiten $\tan \theta = \theta = x/R$. Combinando todas las simplificaciones anteriores sobre la ecuación básica de laminación ecuación (4.5) el autor formula las ecuaciones (4.17), (4.18), (4.19) y (4.20).

$$(1 + z^2) \frac{d_y}{d_z} - \left(\frac{2}{\gamma \sigma_c} \right) \tau = 2 z \quad (4.17)$$

$$y = \frac{P}{\sigma_c} \quad (4.18)$$

$$\gamma^2 = \frac{2 h_2}{D} \quad (4.19)$$

$$z = \frac{2 x}{\sigma R} \quad (4.20)$$

En este planteamiento es sin duda el término relacionado con la tensión tangencial (τ), propio de las fuerzas de rozamiento, una de las mayores aportaciones del autor. En su trabajo define tres posibles modos de fricción, resolviendo la ecuación para dichos estados. Los modos considerados fueron:

- Coeficiente de fricción constante. Asume un valor de fricción constante a lo largo de toda el área de mordida. El autor calcula el efecto de las tensiones de entrada y salida sobre la distribución de presiones, aportando una visión sobre su relación con la posición del punto neutro y la fuerza de laminación. En la Figura 4.7 se observa el efecto de las tensiones de entrada/ salida sobre la distribución de presiones para una reducción y rozamiento constante dados.

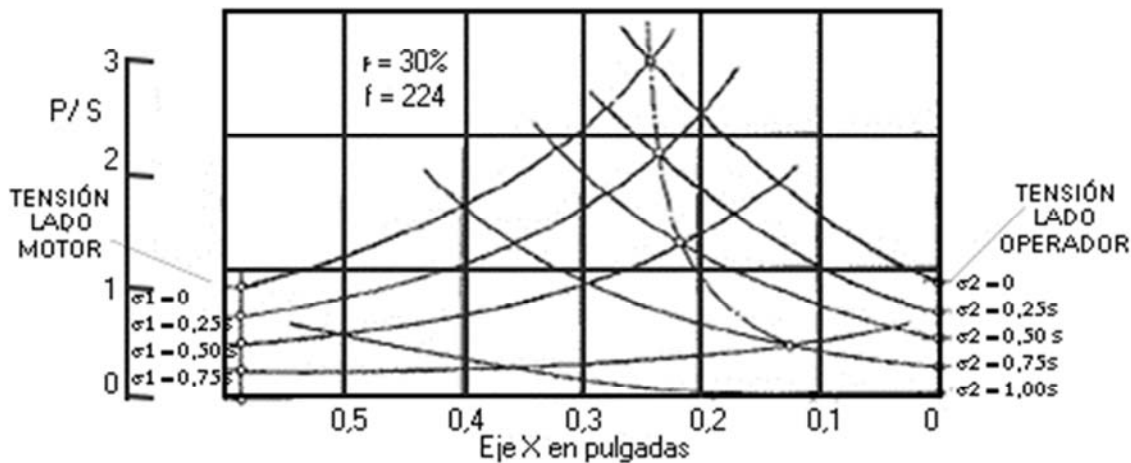


Figura 4.7 Distribución de presiones según Nadai

- Tensión tangencial constante. Se considera la tensión tangencial de rozamiento constante ($\tau = \tau_0$) - Esta expresión vuelve a generar un perfil de presiones similar a los hasta ahora descritos (friction-hill).
- Superficie de fricción proporcional a la velocidad de deslizamiento. Es sin duda ésta una de las mayores aportaciones de Nadai, al ser el primer intento de tener en cuenta la naturaleza variable de la superficie de fricción en el área de mordida. De acuerdo a Nadai la tensión tangencial es una función de la viscosidad del elemento lubricante (η), el espesor de la película de éste (δ) y la velocidad relativa entre banda y rodillos. La tensión tangencial debida al rozamiento quedará según la ecuación (4.21).

$$\tau = \frac{\eta (V_{banda} - V_R)}{\delta} \quad (4.21)$$

Sin embargo este estado ya no genera el pico característico de la distribución de presiones sino que reemplaza esta por una sola curva más suave. Además este punto neutro ya no coincide con la posición de máxima presión. En la Figura 4.8 se compara el perfil de presiones de los dos últimos casos donde la tensión de cortadura es constante (curva tipo friction-hill) y para un régimen de lubricación variable. Nótese el cambio de forma así como la ubicación del punto neutro.

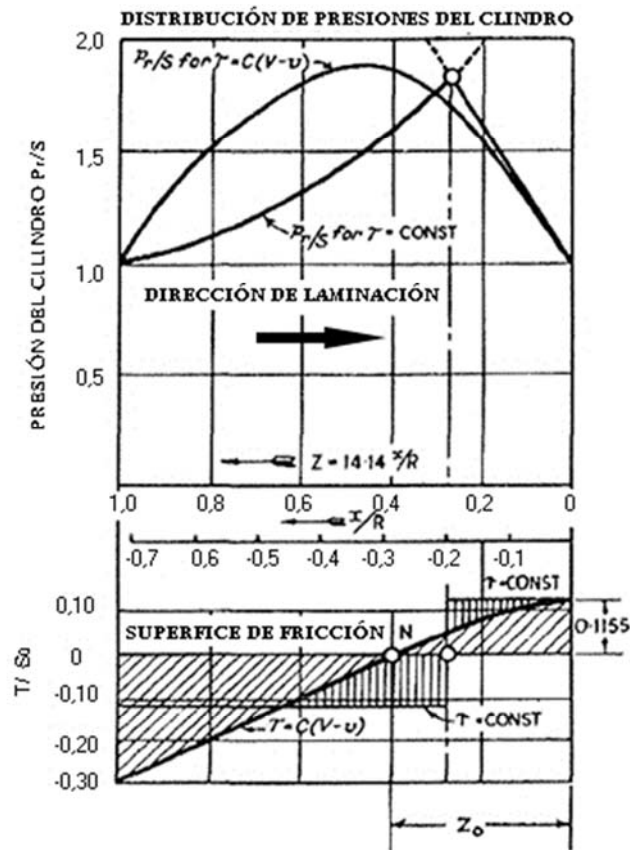


Figura 4.8 Distribución de presiones según Nadai

Los mayores inconvenientes de los modelos anteriores residen en las simplificaciones tomadas. En primer lugar parece probado que secciones verticales planas no se mantienen planas tras la laminación. Además la velocidad de reducción afecta al límite elástico del material, especialmente en la laminación en caliente. Obviamente el rozamiento está muy lejos de permanecer constante, siendo éste uno de los puntos más críticos. Por último parece necesario ser cautelosos con las simplificaciones sobre ángulos pequeños ($4^\circ - 5^\circ$), recomendadas en trenes de dos o cuatro cajas en materiales finos, pero no en el caso de laminación en frío en trenes tándem con diámetros de rodillos pequeños.

4.2.1.2 EL COMPLETO MODELO DE OROWAN

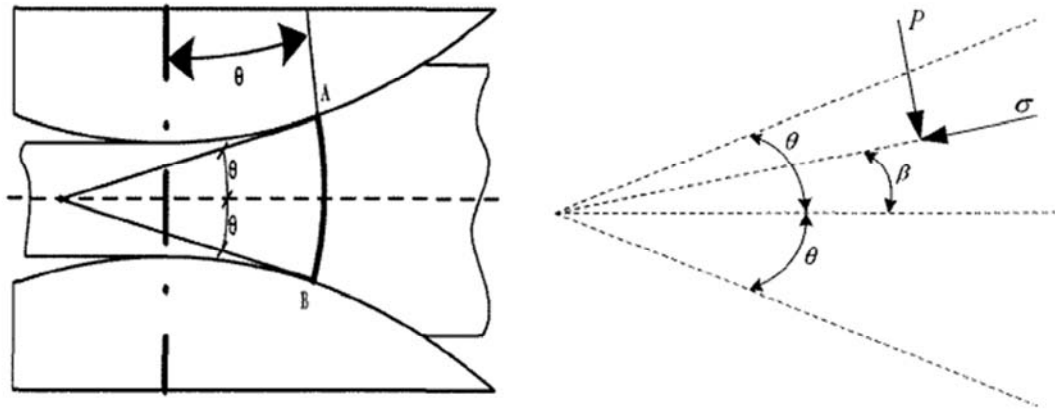
Uno de los estudios más completos llevado a cabo sobre la laminación es el desarrollo por Orowan. Su teoría evita la mayoría de las aproximaciones y simplificaciones que se habían venido tomando hasta ahora, permitiendo cualquier variación en los términos de límite elástico y rozamiento dentro del

arco de mordida. Además la asunción de deslizamiento de la banda en todo el arco de mordida excepto en el punto neutro se abandona, formulando a su vez un criterio que diferencia las áreas con deslizamiento de aquellas que no. Incluso añade factores para tener en cuenta la deformación propia de los rodillos de laminación. Destacar que esta teoría puede ser utilizada tanto para la laminación en frío como en caliente.

Pero principalmente esta teoría tiene en cuenta el problema de la falta de homogeneidad en la deformación, lo que conlleva abandonar la idea de que secciones planas se mantienen planas durante la laminación, ver figura 3.4. Orowan se apoya en los trabajos sobre compresión plana de Prandtl [59] (compresión mediante planos paralelos) y Nadai [58] (compresión mediante planos ligeramente inclinados) para desarrollar expresiones que ajusten mejor la distribución de tensiones en este tipo de casos. Mediante la adopción de los resultados de Nadai sobre compresión plana, Orowan define para un punto de una sección cilíndrica (ver Figura 4.9 (a)) a un ángulo β de la línea central del material (ver Figura 4.9 (b)), el estado tensional de dicho punto como (3.13). Resaltar que estos trabajos se concibieron par aun contacto estático entre piezas, mientras que el autor lo supone aplicable para el caso de deslizamiento. Además estas expresiones consideran flujo en dirección al vértice, mientras que el autor las generaliza también para flujo en sentido contrario.

$$\sigma = P - \sigma_c \sqrt{1 - \left(\frac{2\mu P}{\sigma_c}\right)^2 \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2} \quad (4.22)$$

Con la distribución de tensiones definida, Orowan toma secciones cilíndricas (ver Figura 4.9(a)) para el desarrollo de su modelo, abandonando así la idea de que secciones planas permanecen planas después de laminación. En la ecuación (4.23) se muestra la ecuación diferencial resultante para un caso con deslizamiento (se obvia el caso de contacto estático), donde además de los términos habituales aparece el diámetro (D) de los rodillos y el ancho de la banda (w).



(a) Secciones cilíndricas elementales (b) Compresión mediante planos no paralelos.
para el cálculo del modelo. Paralelos.

Figura 4.9 Asunciones del modelo de Orowan.

$$\frac{d_F}{d_\theta} = P \frac{D}{h} (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) + D \sigma_c \omega (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (4.23)$$

Sin embargo el completo modelo de Orowan tiene serios inconvenientes que lo han alejado de una utilización masiva. En general su resolución conlleva una labor tediosa y compleja. La obtención de la distribución de presiones, fuerzas y pares de laminación se convierte en un proceso largo y difícilmente asumible para una aplicación práctica. De hecho el autor solo llevó a cabo dos grupos de cálculos para la comparación con otros estudios, de carácter experimental, de la época. Además y a pesar del esfuerzo en la aproximación a la distribución de presiones en el área de contacto, parece que ésta aún no es completamente representativa de las verdaderas condiciones en la mordida. De cualquier manera el autor pasa por haber presentado la más completa y exacta de las teorías generales de laminación.

La formulación del modelo de Orowan abona la creación de mucho otros que tratan de conjugar fidelidad al proceso real con una menor dificultad operacional. Bland y Ford establece sin duda uno de los más utilizados a nivel práctico. Formula una ecuación de equilibrio ecuación (4.24) basada en la de Orowan pero sustituyendo el diámetro del rodillo por el radio modificado de Hitchcock (Rm) y la tensión tangencial (τ) por el término clásico de rozamiento dependiente de la fuerza normal o radial en ese punto (μP). Además y para el cálculo de la

tensión principal acude al caso clásico de compresión plana con planos paralelos.

$$\frac{d_F}{d_\theta} = 2 P R_m (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (4.24)$$

Este modelo genera una distribución de presiones tipo friction-hill, donde se puede distinguir dos zonas bien diferenciadas (limitadas por el punto neutro) con un sentido opuesto de las fuerzas de rozamiento. En la ecuación (4.25) se anota la expresión que define la distribución de presiones en la zona del punto neutro al plano de salida (P^+), donde (σ_c) hace referencia al valor del límite elástico en las diferentes zonas de la mordida y h al valor del espesor en cada punto del área de mordida. De la misma manera el autor propone una simple ecuación algebraica para el cálculo del ángulo neutro.

$$P^+ = \frac{\sigma_c h}{h_s} \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{cs}} \right) e^{\mu H} \quad (4.25)$$

$$H = 2 \sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \arctan \left(\sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \theta \right) \quad (4.26)$$

La fuerza específica total ejercida (F) resultará de la integración del producto de esa presión radical por el radio del rodillo ecuación (4.27). Para simplificar Bland y Ford asumen el límite elástico del material (σ_c) como una media del valor a lo largo del área de mordida, ecuación (4.28).

$$F = R_m \bar{\sigma}_c \left[\int_0^{\theta_N} \frac{h}{h_s} e^{\mu H} d\theta + \int_{\theta_N}^{\theta_i} \frac{h}{h_e} e^{\mu (H_i - H)} d\theta \right] \quad (4.27)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\int_0^{\theta_2} \sigma_c d\theta}{\theta_i} \quad (4.28)$$

Basado parcialmente en el trabajo anterior de Orowan está el de Sims [8]. Destacar que la teoría de Sims sirve como base para los compendios de datos publicados por el B.I.S.R.A. (British Iron and Steel Research Association) que hasta hoy día son utilizados como base para el cálculo de cargas en los procesos de laminación de productos planos. En comparación con Orowan, Sims asume la simplificación de ángulos de contacto pequeños ($\sin \theta = \tan \theta = \theta$). Toma la ecuación de éste para el caso de contacto estático y supone deformación plana con planos inclinados además de un valor constante del límite elástico del material a lo largo de todo el área de mordida (similar al cálculo de la ecuación (4.28)). El autor, siguiendo el mismo mecanismo que todo los anteriores, desarrolla una expresión diferencial para el cálculo de la distribución de presiones en el área de mordida. Posteriormente resuelve el mismo en dos expresiones diferenciadas según la zona elegida (anterior o posterior al punto neutro). A continuación integra esta distribución de presiones para alcanzar una expresión de la fuerza total de laminación, suponiendo que para ángulos pequeños la presión radial es igual a la vertical. Tras este proceso de integración el autor define una expresión ecuación (4.31) para la fuerza específica de laminación (F). En la misma aparece el término que es una de las

$$\bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \quad (4.29)$$

aproximaciones más simples al cálculo de la fuerza de laminación, que propone como fuerza a ejercer el límite elástico del material ($\bar{\sigma}_c$) por una estimación básica de la longitud efectiva de laminación

$$(\sqrt{R_m \Delta h}) \quad (4.30)$$

Cabe destacar que esta aproximación es recurrente en muchos mecanismos simplificados de cálculo. Por otro lado el término Q_p es un factor dependiente del radio del rodillo, el espesor de salida y la reducción, que materializa la contribución de las fuerzas de fricción y de la no homogeneidad en la deformación. Bland y Ford llevaron a cabo pruebas experimentales sobre el modelo de Sims, alcanzando una diferencia entre ambos modelos de en torno a un 2%.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \cdot Q_P \left(\frac{R_m}{h_s}, \tau \right) \quad (4.31)$$

Otro trabajo interesante fue el de Jortner donde resolvía el comportamiento de la laminación a través de la interacción de dos modelos por separado. Por un lado trata el problema de la deformación de los rodillos de trabajo, generando un modelo que describe la deformación de dos cilindros que soportan un par de presiones P diametralmente opuestas y concentradas en una pequeña área. Por otro lado y a través de la teoría de Orowan, Jortner considera la existencia de varias zonas bien diferenciadas donde el material pasa de un comportamiento elástico a otro plástico, ver Figura 4.10, generando las expresiones apropiadas según consideremos una u otra región. Para la resolución del modelo el autor ajusta los resultados de ambos submodelos mediante un proceso iterativo de tal manera que coincidan una serie de condiciones de contorno. Así, y partiendo de una situación en la que los rodillos son perfectamente circulares y con una deformación uniforme de la banda, se alcanza una solución de compromiso de ambos modelos. Los resultados logran una gran exactitud comparados con modelos de otros autores, si bien los cálculos son prolongados en el tiempo y el factor de tensiones externas parece no estar bien modelado.

4.2.1.3 MODELO DE COSSE Y ECONOMOPOULOS

Destacar el modelo de Cosse y Economopoulos [13] de gran complejidad. Con un planteamiento similar al de Jortner, las simplificaciones son reducidas al mínimo teniéndose en cuenta el comportamiento elástico y los cambios en las propiedades mecánicas que experimenta el material, derivados de múltiples aspectos (velocidad de deformación por ejemplo). Al igual que el modelo de Jortner se trata de un proceso iterativo que trata de relacionar las complejas ecuaciones de deformación de la banda con las del rodillo. Una de las características más importantes de este trabajo es la posibilidad de existencia de dos puntos neutros en caso de laminaciones muy finas (puntos donde la velocidad relativa entre banda y material es cero).

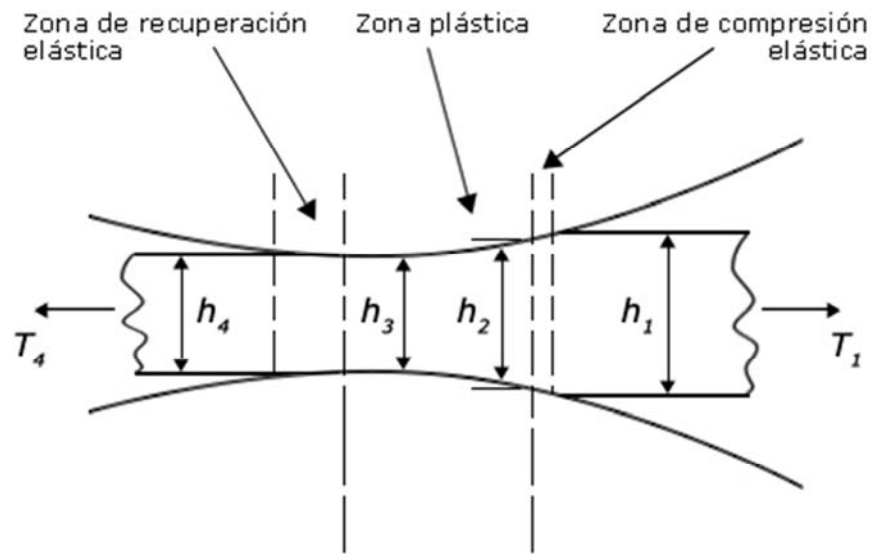


Figura 4.10 Zona de deformación elástico-plásticas según Jortner

4.2.1.4 MODELOS COMPUTACIONALMENTE EFICIENTES

Los modelos anteriores tienen un gran valor conceptual pero son de limitada aplicabilidad por su complejidad. En este sentido varios autores proponen abandonar el método clásico mediante la integración de la curva de distribución de presiones, para adoptar un mecanismo de cálculo directo mediante expresiones aritméticas más simples. Ekelund en 1927, propone la ecuación (4.32) para el cálculo de la fuerza específica de laminación, teniendo en cuenta $\bar{\sigma}_c$ como el límite elástico medio, R_m como el diámetro deformado del rodillo, μ el coeficiente de rozamiento y los términos h_e y h_s los espesores iniciales y finales.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \left(1 + \frac{1,6 \mu \sqrt{R_m \Delta h} - 1,2 \Delta h}{h_e + h_s} \right) \quad (4.32)$$

Esta simple ecuación genera buenas aproximaciones a los resultados reales dentro de un elevado rango de condiciones de laminación (tipos de material, carga,...), con un coste operativo mínimo. El autor contempla además la adición de nuevos términos para corregir aspectos específicos del proceso de laminación.

Bland y Ford [6] proponen una expresión simple para la fuerza de laminación sin considerar fuerzas de rozamiento ecuación (4.33). Los autores proponen introducir el efecto del rozamiento a través del término f_3 , dependiente de la reducción (τ) y del parámetro a , ecuación (4.34). El valor de la función f_3 se puede obtener de manera gráfica mientras que el término $\bar{\sigma}_c$ se calcula como se indica en la ecuación (4.28). De nuevo se plantea un proceso iterativo ya que la deformación del rodillo según Hitchcock es función de la fuerza específica de laminación, siendo necesario ajustar ambos términos. Sims por un lado y Lianis y Ford por otro desarrollaron métodos gráficos para la resolución de estos cálculos.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \quad (4.33)$$

$$a = \mu \sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \quad (4.34)$$

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \cdot f_3(a, \tau) \quad (4.35)$$

Existen técnicas que aportan un enfoque distinto al problema de la estimación de la fuerza y par de laminado, llevando a cabo lo que se podría llamar un mecanismo basado en datos. Básicamente consiste en llevar a cabo una serie de laminaciones con unos parámetros bien determinados (reducción, tipos de material,...), que serán utilizados como patrones para un proceso posterior de comparación e interpolación. Cook y Parker [12] proponen laminaciones en condiciones muy controladas de una serie de bobinas patrón y en una única caja de laminación. Con los datos tomados construyen una serie de curvas con los valores de fuerza necesarios según las diferentes condiciones de laminación (reducción, espesor inicial y diámetro de rodillos,...). Estas gráficas se utilizan como base para el cálculo de la fuerza de laminación para otras combinaciones diferentes. Para su uso en instalaciones de varias cajas los autores enfocan el proceso como un reparto de la energía total necesaria entre las diferentes cajas de la instalación. Esta metodología ha generado muy buenos resultados en situaciones donde la laminación está altamente controlada (gran homogeneidad de espesores de entrada, de calidad y de tamaño de los rodillos).

Técnica muy similar es la de Davies donde se calcula la presión media de laminación como cociente entre la fuerza y el área de contacto (asumiendo no deformación en los rodillos), para un material dado y bajo un amplio rango de reducciones y espesores de entrada. Los resultados se plasman también en una serie de curvas, ver Figura 4.11, utilizadas para el cálculo posterior de otras situaciones de laminación. Aunque similar, este método aboga por el cálculo in situ en la propia instalación no como el anterior, teniendo su utilidad cuando sólo se dispone como equipamiento de propio sistema de laminación y las posibilidades de control y estudio del proceso son limitadas.

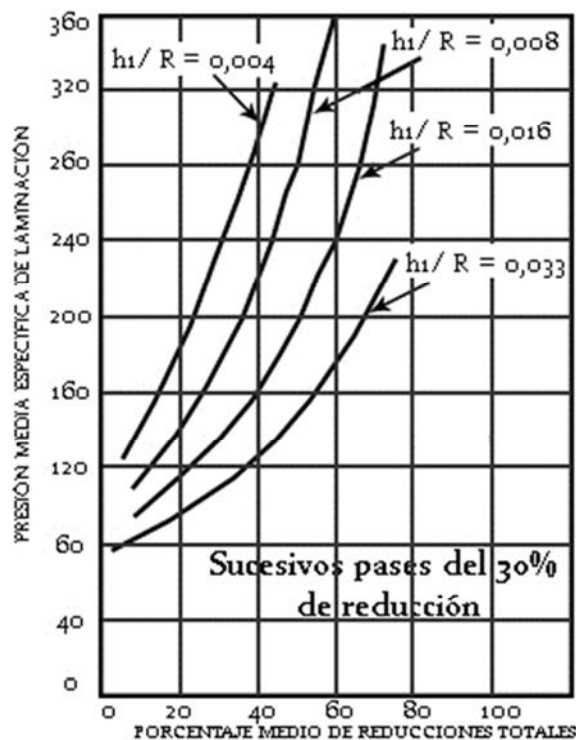


Figura 4.11 Gráficas del método de Davies

Para completar esta pequeña descripción de los modelos de laminación desarrollados a lo largo del tiempo, es necesario nombrar algunos de los intentos de Roberts. Hasta ahora se habían presentado modelos donde o bien se asumía una distribución de presiones de la forma friction-hill o bien una más suave (típico de un carácter del rozamiento variable). Este autor presenta uno de los modelos más simples donde supone una distribución de presiones uniforme a lo largo del área de mordida, ver Figura 4.12. El cálculo de la fuerza específica de laminación (F) se lleva a cabo como el producto del límite elástico (σ_c) por una longitud efectiva de contacto, ecuación (4.36). Dicha longitud efectiva (L_e)

será la suma de la longitud de contacto si el rodillo fuera perfectamente rígido (l_p), más la longitud si tenemos en cuenta la deformación elástica del mismo pero en ausencia de fricción (l_E), más la deformación del mismo teniendo en cuenta rozamiento entre banda y la bobina (l_F). En la expresión (4.38) se desarrollan estos términos, donde α es el inverso de la reducción.

$$F = \sigma_c L_e \quad (4.36)$$

$$L_e = l_p + l_E + l_F \quad (4.37)$$

$$L_e = \sqrt{R \Delta h} + \alpha \sqrt{\frac{2 F R}{E}} + \frac{\alpha^2 \mu R F (2 - \tau)}{E h_e (1 - \tau)} \quad (4.38)$$

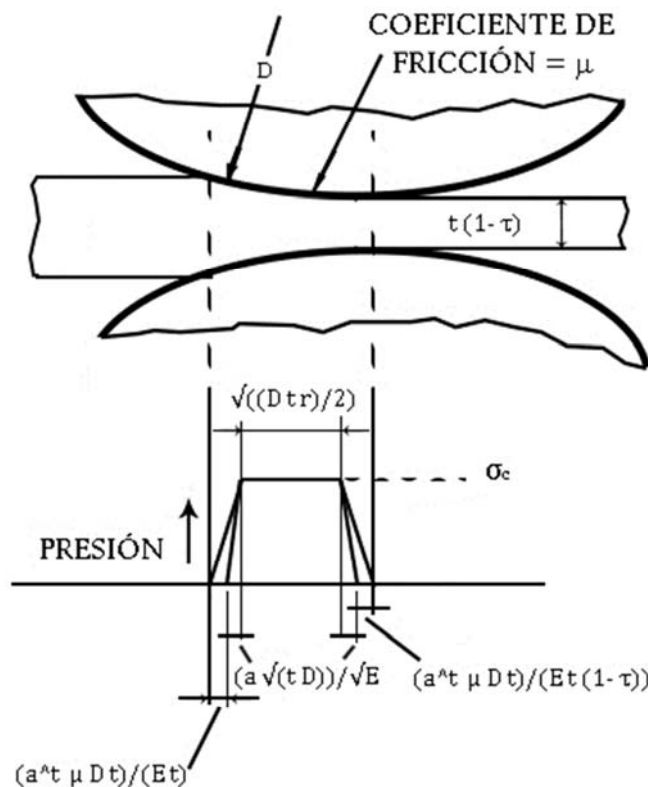


Figura 4.12 Distribución de presiones constante según Roberts y las 3 longitudes efectivas.

Además el autor modela el término σ_e con la expresión (4.39) donde el primer término parte del límite elástico para un valor de reducción $r/2$, es decir una reducción media, mientras que el segundo término introducirá el estado tensional externo.

$$\sigma_c = 1,155 \sigma_{c_{r/2}} - \left(\frac{\sigma_e + \sigma_s (1 - \tau)}{(2 - \tau)} \right) \quad (4.39)$$

El mismo autor asume de nuevo una distribución de presiones tipo friction-hill en [86] a la vez que abandona algunas simplificaciones sobre la longitud efectiva del área de laminado o del cálculo del estado tensional del material.

4.2.2 MODELOS DINÁMICOS

Los modelos físico presentado hasta ahora están orientados al cálculo estático de magnitudes de laminación, es decir, relacionan todas las variables del proceso para un instante dado. Este tipo de modelos, además de su indiscutible valor conceptual, son de gran utilidad para el diseño de la instalación y para el establecimiento de las condiciones iniciales del proceso (valores de configuración o preconfiguración). Sin embargo pueden no resultar muy útiles (por complejidad sobre todo) si se pretende el estudio dinámico del proceso, es decir, tratar de describir el comportamiento de los parámetros de laminación ante pequeñas variaciones en las variables del proceso.

Hessenberg propone uno de los primeros modelos de este tipo 4.41 y 4.42. Éste y prácticamente la totalidad de este tipo de modelos se apoyan sobre la ecuación de continuidad aplicada al flujo de material entre cajas. Dado que en ningún momento se retiene material entre cajas se cumplirá la ecuación (4.40), donde el producto de velocidad (V) y espesor (h) del material será constante para cualquier caja e igual al cociente entre flujo de material (U) y ancho del mismo (B).

$$V_1 h_1 = V_2 h_2 = \dots = V_n h_n = \frac{U}{B} \quad (4.40)$$

Se pueden expresar los cambios sobre el punto de funcionamiento dado como la ecuación (4.41), donde según Hessenberg para pequeñas desviaciones, ecuación (4.42).

$$(V_1 + \Delta V_1)(h_1 + \Delta h_1) = \dots = (V_n + \Delta V_n)(h_n + \Delta h_n) = \frac{U + \Delta U}{B} \quad (4.41)$$

$$\left[\frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta h_1}{h_1} \right] = \left[\frac{\Delta V_2}{V_2} + \frac{\Delta h_2}{h_2} \right] = \dots = \left[\frac{\Delta V_n}{V_n} + \frac{\Delta h_n}{h_n} \right] = \frac{\Delta U}{U} \quad (4.42)$$

Es necesario por tanto el cálculo de la sensibilidad de los términos h y V ante perturbaciones y cambios en las variables fundamentales del proceso, ecuación (4.43) y ecuación (4.44). Donde ΔD representa cualquier perturbación en una caja de laminación, pudiendo ser principalmente por cambios en el espesor de entrada (Δh_e) o por variaciones del gap (separación entre rodillos) (Δs).

$$\frac{\Delta h_s}{h_s} = \frac{1}{h_s} \left[\frac{\delta h_s}{\delta D} \Delta D + \frac{\delta h_s}{\delta \sigma_e} \Delta \sigma_e + \frac{\delta h_s}{\delta \sigma_s} \Delta \sigma_s + h_e \frac{\delta h_s}{\delta h_e} \frac{\Delta h_e}{h_e} \right] \quad (4.43)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{V} \left[\frac{\delta V}{\delta D} \Delta D + \frac{\delta V}{\delta \sigma_e} \sigma_e + \frac{\delta V}{\delta \sigma_s} \sigma_s + h_s \frac{\delta V}{\delta h_s} \frac{\Delta h_s}{h_s} \right] \quad (4.44)$$

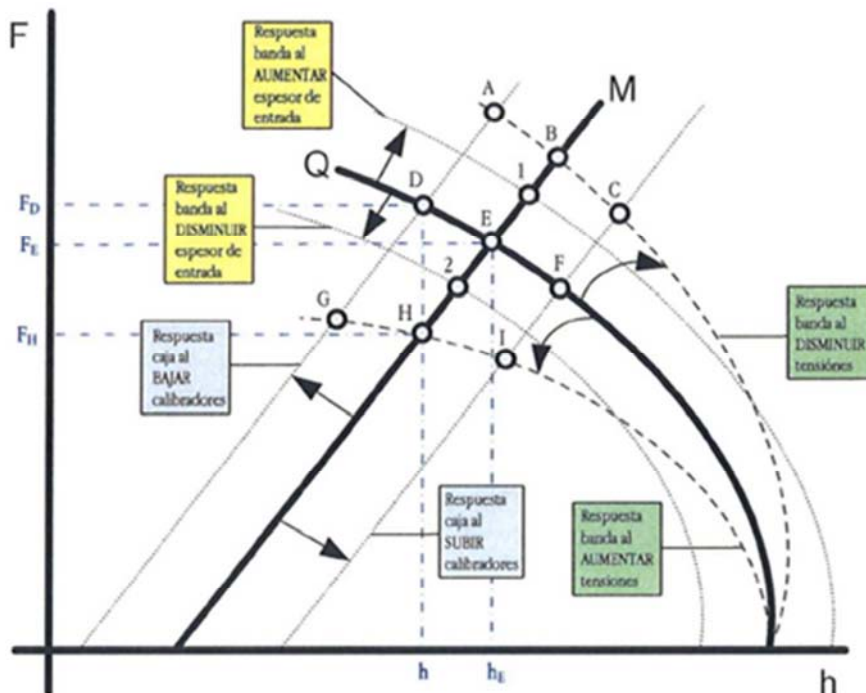


Figura 4.13 Efectos sobre el equilibrio caja-material de un proceso de laminado en frío

En general los coeficientes que describen las variaciones de h y V tendrán que ser cuantificados correctamente, siendo ésta la máxima dificultad del proceso de cálculo. Para tal fin es necesario contar con modelos que relacionen

las variables anteriores y así poder evaluar las derivadas parciales pertinentes. Por ejemplo, los coeficientes que relacionan las variaciones del espesor se extraen de la interacción entre la caja de laminación y el material laminado. Esta interacción es fácilmente explicable en la Figura 4.13 donde se observan dos gráficas principales, la que representa el comportamiento de la caja de laminación (M) y la que describe al material siendo laminado (Q) para diferentes valores de fuerza de laminación (eje vertical, F) y espesor de salida (eje horizontal, h). La respuesta elástica del tren (M) se ve desplazada según el cambio del entrehierro o abertura entre cilindros: desde la curva BEH inicial a la curva CFI al aumentar la separación o hasta la curva ADG al disminuirla. Por otro lado se observa el comportamiento de la banda (Q) al variar las tensiones de tiro de la misma: con un giro a la derecha (disminución de tensiones, nueva curva ABC) o uno a la izquierda (aumento de tensiones, nueva curva GHI). Otro factor importante para las variaciones del espesor final son las irregularidades en el propio espesor a la entrada de la caja laminadora. Este fenómeno afecta a la curva plástica del material (Q) desplazándola a la derecha al aumentar el espesor de entrada (punto 1) o a la izquierda si disminuye este (punto 2).

Este tipo de gráficos son utilizados en la industria como elementos de ayuda para la toma de decisiones por parte del personal encargado del control de la instalación. De esta manera, si desde unas condiciones estables (FE y hE) definidas por las curvas DEF y BEH se pretende pasar a un espesor más bajo h, se pondrán tomar alternativas: por un lado, disminuir la distancia entre cilindros desplazando M hasta definir la nueva curva ADG donde el punto D viene dado por un valor de fuerza de laminación FD mayor que el anterior FE y un espesor h menor: por otro lado la opción sería aumentar el tiro de la banda hasta que Q se desplace a la curva GHI y genere un nuevo punto de equilibrio H caracterizado por el menor espesor de salida h pero también por una menor fuerza de laminación FH.

De la misma manera y para el resto de coeficientes será necesario contar con modelos similares de fuerza de laminación para la relación entre espesores y tensiones y modelos de par para las cuestiones relacionadas con la velocidad y el desplazamiento. Hessenberg y Sims desarrollan expresiones propias para estos cálculos y así, una vez desarrolladas las expresiones para una caja, extenderlas a cualquier combinación de cajas ampliando el número de ecuaciones del sistema. Desgraciadamente la complejidad de estos modelos crece con el aumento de cajas de laminación. Otro modelo interesante y quizás el más ampliamente utilizado es el publicado por Misaka en 1968 [66], muy cercano al modelo anterior de Hessenberg y Jenkins. Misaka propone una serie

de expresiones que tienen en cuenta las variaciones de diferentes parámetros (tensiones frontales y traseras, espesores de entrada, variaciones en la abertura de los cilindros, velocidad, límite elástico del material y rozamientos) y compone un sistema de ecuaciones para la resolución de las condiciones de funcionamiento de un tren de cinco cajas. El autor lleva a cabo una aplicación práctica del algoritmo y obtiene los valores de los coeficientes de variación de un tren real de laminación.

Por último mencionar la existencia de estudios orientados al desarrollo de modelos que evalúen los estados transitorios del proceso. Los modelos anteriores pretenden explicar los cambios de variables, pero no hacen especial referencia a la dinámica propia del cambio, a la velocidad de transición entre un estado y otro. En una laminación a alta velocidad este tipo de estudios es importante ya que la longitud de material afectado por el estado transitorio puede llegar a ser apreciable. Las características dinámicas en este caso, además de apoyarse en los factores anteriores, ceden especial protagonismo a la efectividad de los sistemas de lubricación y a las prestaciones de los propios sistemas de control. Dentro de esta área destacar los trabajos de Arimura, Kamara y Saito [3] que con la ayuda de computadores especiales acoplados al sistema llevaron a cabo estudios a fin de mejorar el rendimiento de un AGC (automatic gage control). Trabajo similar fue llevado a cabo sobre un AGC de un tren con accionamientos hidráulicos y descrito por Watanabe y Takahashi en [104].

4.3 MODELOS DE REGULADOR DE ESPESOR PARA UNA CAJA DE LAMINACIÓN

El diseño de un regulador de espesor para una caja simple de laminación es el primer paso fundamental para el desarrollo de una valoración de los problemas más importantes asociados al diseño del sistema de control de un tren de laminación (Bryant (1973), Edwards (1978)).

El enfoque adoptado inicialmente considera la derivación de un modelo de proceso, el cual habilita el efecto de una perturbación a ser calculada, y después extiende el modelo para incluir una corrección de control vía controlador de posicionamiento de la distancia entre cilindros de trabajo (entrehierro, roll-gap, roll-bite, mordida). Esto debe de ser la regulación del motor de un tornillo sin fin o un pistón hidráulico, aunque solo el sistema hidráulico es el adecuado para alcanzar un nivel de funcionamiento y precisión requerido para los trenes de laminación modernos.

Las ventajas relativas de varios diseños de control alternativos serán consideradas y brevemente comentadas en sus implementaciones. Se puede observar una breve presentación en el punto 4.7.

A continuación se explican los conceptos clave en términos de la teoría convencional de laminación y de diseño de sistemas de control.

4.3.1 MODELOS DE PROCESO Y CONTROL

Para evaluar la efectividad del diseño de un sistema de control y para desarrollar un diseño satisfactorio en primera instancia, es necesario identificar los peores casos de perturbaciones que puedan ocurrir y estimar su efecto en las variables de salida. Para una caja simple, las perturbaciones que están presentes pueden ser convenientemente divididas en dos categorías: aquellas que afectan al comportamiento del entrehierro, a través de entradas independientes para un análisis del entrehierro y las que alteran directamente la distancia entre los cilindros de trabajo. Ejemplos de lo anterior incluye: Espesor y dureza de entrada, tensiones de entrada y salida y el coeficiente de fricción. Las perturbaciones en la distancia entre los cilindros de trabajo suelen ser debidas generalmente a la expansión térmica de los cilindros, efectos de la película de los cojinetes, excentricidad de los cilindros y más común, errores de configuración y control.

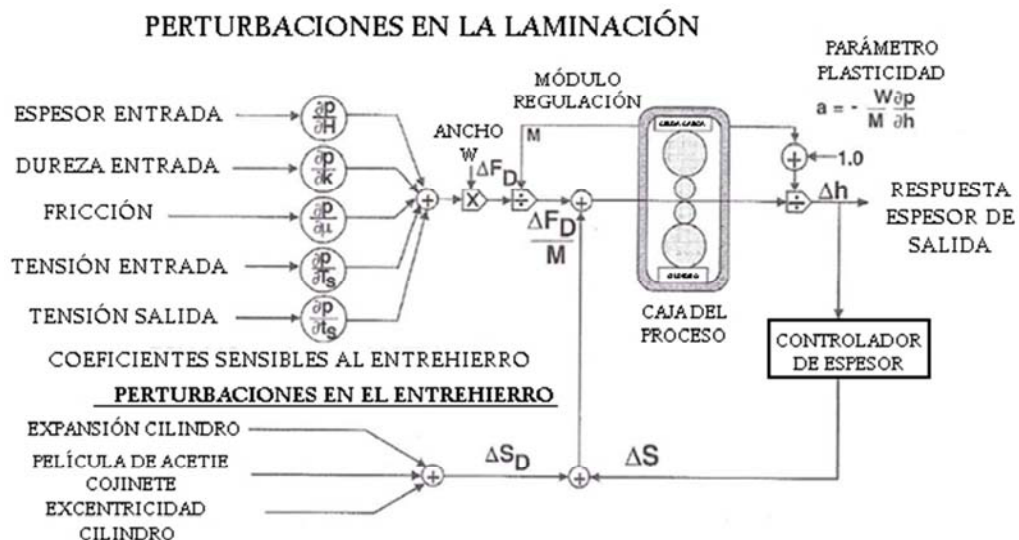


Figura 4.14 Ecuaciones del control de espesor de una caja simple.

El comportamiento de las perturbaciones en el entrehierro pueden ser representadas mediante una expresión lineal de alteraciones que combina el

producto de cada perturbación y su coeficiente de sensibilidad para estimar la perturbación global de la fuerza de laminación ΔF_D la cual podría ocurrir si el espesor de salida fuese alterado (ecuación (4.45)). Esto es:

$$\Delta F_D = W \left[\frac{\delta P}{\delta H} \Delta H + \frac{\delta P}{\delta T_s} \Delta T_s + \frac{\delta P}{\delta t_s} \Delta t_s + \frac{\delta P}{\delta \mu} \Delta \mu + \frac{\delta P}{\delta k} \Delta k \right] \quad (4.45)$$

Prácticamente, la respuesta a este aumento de fuerza causa una alteración de la posición de los cilindros de trabajo de tal forma que la distancia entre ellos y en consecuencia el espesor cambia. La ecuación que describe el modelo de cambio de la fuerza total de laminación, incluyendo los efectos de ΔF_D y los cambios en el espesor de salida dados por la ecuación (4.46).

$$\Delta F = A F_D + W \frac{\delta P}{\delta h} \Delta h \quad (4.46)$$

La otra ecuación requerida para describir el punto de equilibrio operacional del tren de laminación es la ecuación de elasticidad del tren, la cual incluye la suma de perturbaciones del entrehierro ΔS_D y el control de corrección de salida de la posición del entrehierro ΔS . Esta ecuación es la (4.47), donde M es el

$$\Delta h = \Delta S + \Delta S_D + \frac{\Delta F}{M} \quad (4.47)$$

módulo del tren o muelle del tren, el cual es función de la anchura nominal de la banda y de la fuerza de laminación.

Las ecuaciones (4.46) y (4.47) pueden ser resueltas mediante eliminación de ΔF generando una expresión para el cambio de espesor de salida de un tren de laminación en respuesta a cualquier patrón de perturbaciones y controles. El resultado es ecuación (4.48), donde "a" representa el no dimensionamiento del

$$\Delta h = \frac{\Delta F_D/M + \Delta S_D + \Delta S}{(1 + a)} = \Delta h_D + \frac{\Delta S}{(1 + a)} \quad (4.48)$$

rango de la deformación de la dureza de la banda para la dureza del tren de laminación, ecuación (4.49).

$$\left[-\frac{W}{M} \frac{\delta P}{\delta h} \right] \quad (4.49)$$

Este rango será referido como el parámetro de plasticidad su valor dependerá del material y modelo de laminación. Valores típicos se muestran en la Tabla 4-1. Para bandas finas o trenes témpor se pueden alcanzar valores tan grandes como 50. Mencionar que el término de la ecuación (4.50), representa el cambio en la distancia entre los cilindros de trabajo en un tren vacío debido a un cambio en la fuerza ΔF_D . Es decir, ha sido convertido en forma de perturbación en el entrehierro.

$$\Delta F_D/M \quad (4.50)$$

Tabla 4-1 Dependencia del material y anchura de la plasticidad dimensional, parámetro 'a'.

MATERIAL	PROGRAMA - H1xhsxW (mm)		
	23,0x2,5x600	23,0x2,5x1000	23,0x2,5x1500
Acero caliente			
Pase 1	0,22	0,32	0,42
Pase 2	0,45	0,66	0,86
Pase 3	0,90	1,32	1,74
Pase 4	1,61	2,37	3,11
Pase 5	2,50	3,64	4,78
Al caliente			
Pase 1	0,10	0,15	0,20
Pase 2	0,13	0,20	0,27

Tabla 4-2 Dependencia del material y anchura de la plasticidad dimensional, parámetro 'a' (continuación).

MATERIAL	PROGRAMA - H1xhsxW (mm)		
	30,0x3,0x600	30,0x3,0x1000	30,0x3,0x1500
Al caliente			
Pase 3	0,22	0,33	0,45
Pase 4	0,32	0,48	0,65
Pase 5	0,58	0,85	1,14
Acero frío	2,2x0,3x600	2,2x0,3x1000	2,2x0,3x1500
Pase 1	1,47	2,14	2,80
Pase 2	0,99	1,45	1,90
Pase 3	1,50	2,19	2,86
Pase 4	2,29	3,33	4,36
Pase 5	4,43	6,45	8,44
Al frío	2,2x0,3x600	2,2x0,3x1000	2,2x0,3x1500
Pase 1	0,92	1,30	1,68
Pase 2	0,77	1,11	1,44
Pase 3	1,10	1,57	2,04
Pase 4	1,63	2,32	3,01
Pase 5	2,78	3,95	5,12

La ecuación (4.48) es de primordial importancia para comprender que ocurre en el control de una simple caja. Muestra en primera instancia que los errores de posicionamiento en el entrehierro son atenuados por un factor del tipo $1+a$ en términos absolutos, y en segunda instancia que el cambio de posición regulado, requerido para corregir un error medido Δh_D debido a perturbaciones, debería ser tal que su cambio de espesor neto sea cero, ecuación (4.51).

$$\Delta S = -(1 + a) \Delta h_D \quad (4.51)$$

Una presentación esquemática de la ecuación (4.48) se puede ver en la Figura 4.14.

El problema remanente es considerar los aspectos dinámicos del controlador de espesor los cuales proporcionarán la respuesta más estable y los mínimos errores.

Existe otra posibilidad de influenciar el espesor mediante deliberar cambios en las tensiones. Esto normalmente solo es factible para productos finos dado que los niveles de tensión cambian para alcanzar correcciones de espesor significativos y por el contrario está fuera del alcance de la capacidad de gestión de la bobinadora y desbobinadora. Cuando las tensiones son ajustadas, como en el caso de los trenes de fábrica de hojas de aluminio, son en combinación con una estrategia de control de fuerza que envuelve ajustes de posicionamiento del entrehierro.

4.3.2 ALTERNATIVAS DE CONTROL

Se han estudiado diferentes alternativas para el control del proceso témpor seleccionándose finalmente las siguientes:

- Regulador de espesor feedback.
- Regulador de espesor feedforward.
- Regulador de espesor mediante galgas.
- Compensación de la excentricidad de los cilindros.
- Regulador de flujo de material.
- Modelo basado en un regulador feedback.
- Control de la elongación en un proceso témpor.

4.3.2.1 REGULADOR DE ESPESOR FEEDBACK

Para un tren de una sola caja, el control se ve afectado por el cambio relativo de la distancia entre los cilindros de trabajo por un tornillo sin fin movido por un motor o un cilindro hidráulico actuando sobre los cojinetes de las ampuestas inferior o superior. Normalmente la posición relativa de las ampuestas se mide con respecto al castillete, lo normalmente conocido como posición del entrehierro. La separación entre los cilindros de trabajo no es igual a esta

medida debido a las deformaciones elásticas de los componentes de la caja que son de un grado de magnitud mayor que la tolerancia del control de espesor.

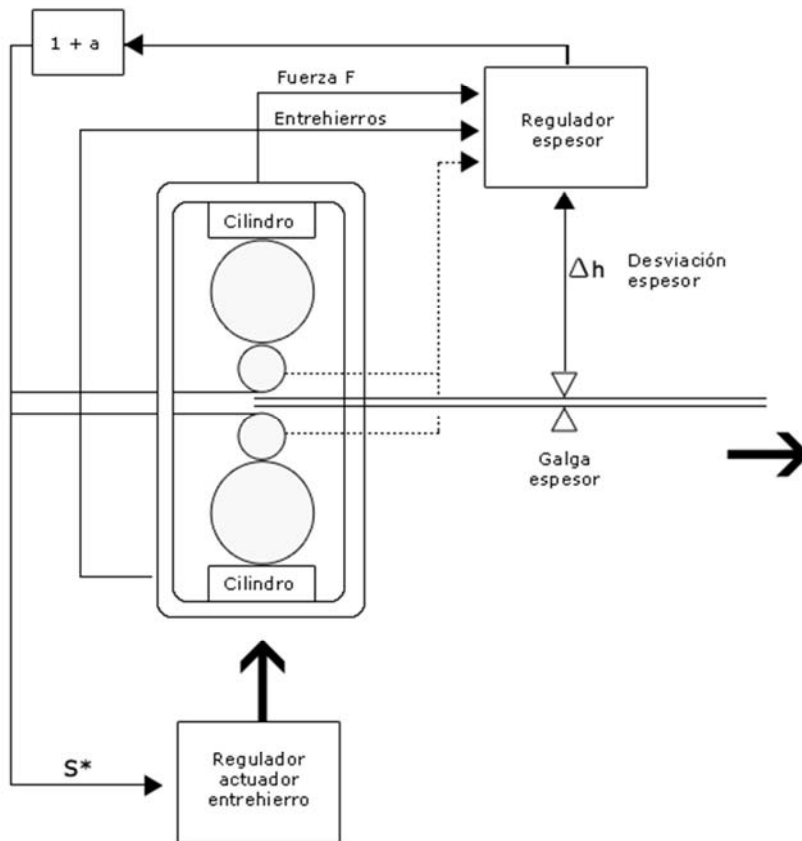


Figura 4.15 Regulador de espesor Feedback.

Esta forma de control del espesor es tal que un error en la medición del espesor después de la caja es procesado por un algoritmo de control, como se muestra en la Figura 4.15. La señal de salida es multiplicada por un producto (o programa) que depende de la ganancia $(1+a)$ para generar una corrección en el posicionamiento del entrehierro ΔS^* . Esta ganancia es necesaria para mantener una respuesta dinámica consistente y debería ser calculada como parte del cálculo de las recetas de ajuste del tren témpor.

El regulador de posicionamiento del entrehierro recibe señales de numerosas fuentes y genera una señal de referencia compleja a la que la posición medida llega y posteriormente regula. Una de muchas posibles configuraciones se muestra en la Figura 4.16.

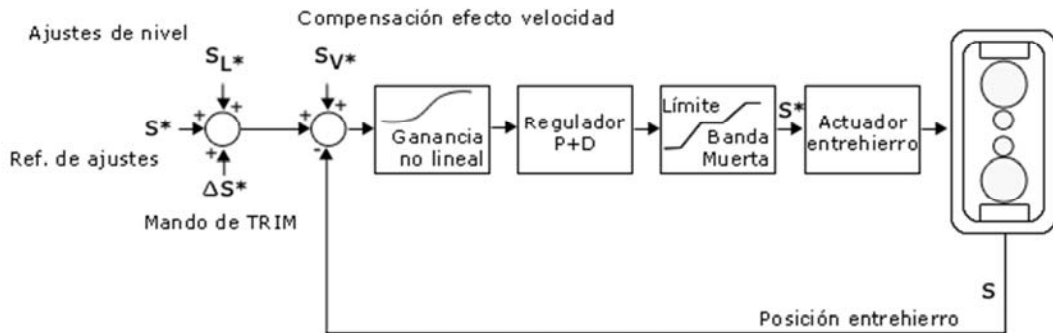


Figura 4.16 Sistema de control de la posición del entrehierro.

El regulador de espesor Feedback operando sobre la posición del entrehierro, Figura 4.15, no puede ser utilizado cuando se laminan bandas extremadamente finas, debido a la posibilidad de que entren en contacto los extremos de los cilindros de trabajo, fuera del ancho de banda. En este caso la acción de control es una combinación de ajustes de velocidad y tensión. En el esquema de control de Figura 4.17, las tensiones son ajustadas antes para posteriormente ajustar la velocidad de laminado. Los cambios en la velocidad afectan la lubricación hidrodinámica en el entrehierro y por consecuencia el coeficiente de fricción. Si la fuerza de laminación se mantiene constante, los cambios en fricción o tensión provocarán cambios en el espesor.

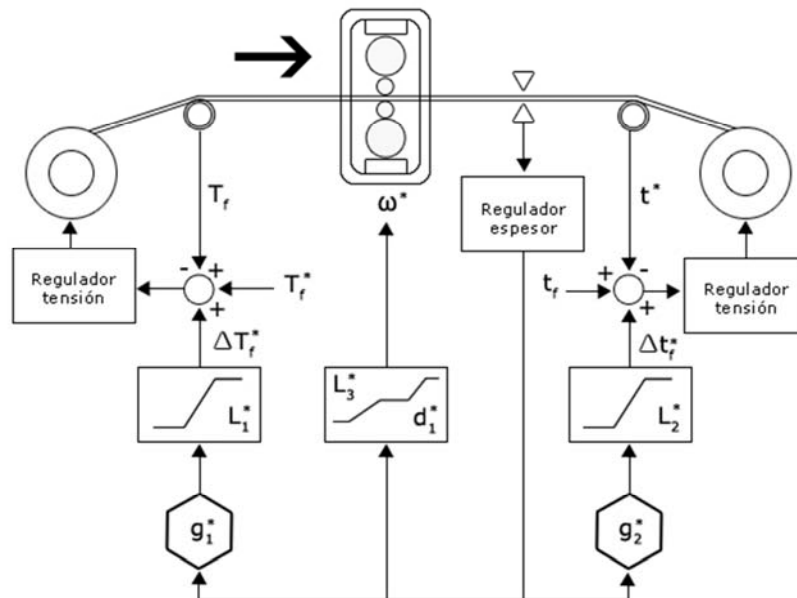


Figura 4.17 Regulador de espesor Feedback, para espesores finos.

El algoritmo de control puede tomar diferentes formas, desde una simple integral suma proporcional, del tipo (P+I), regulador convencional hasta un regulador digital con una compleja compensación del retraso. Esta última forma de regulador requiere que la ganancia de la integral varíe con la velocidad del tren en modo no lineal para compensar los efectos del retraso variable.

A menudo el control feedback simple tiene ventajas prácticas, sin embargo en esta aplicación en particular presenta notables desventajas en sistemas de regulación de posicionamiento hidráulico dado que el retraso en la medida de un cambio en el espesor para el tiempo de respuesta del actuador es mayor de 1,0. Esto significa que para dar estabilidad al lazo de regulación feedback, se debe utilizar una ganancia de control pequeña y el escalón del tiempo de respuesta de todo el lazo cerrado debe ser del orden de cuatro veces el valor del retraso.

Por esta razón otros tipos de sistemas de control se añaden para ganar rendimiento al lazo simple de regulación feedback. Los cuatro sistemas de control más comunes de mejora son:

- Control Feedforward.
- Control de galgas con compensación de excentricidad.
- Control de flujo de masa.
- Modelo basado en Feedback

4.3.2.2 REGULADOR DE ESPESOR FEEDFORWARD

La mayor causa de aparición de errores de espesor surge ante variaciones de espesor. Como consecuencia, una mejora sustancial en el comportamiento del regulador proviene de la instalación de un medidor de espesor a la entrada de la caja para incorporación de dicha medida en el regulador Feedforward. El espesor medido se guarda y se hace un seguimiento gracias a la ayuda del valor de velocidad de banda estimada, como se muestra en la Figura 4.18.

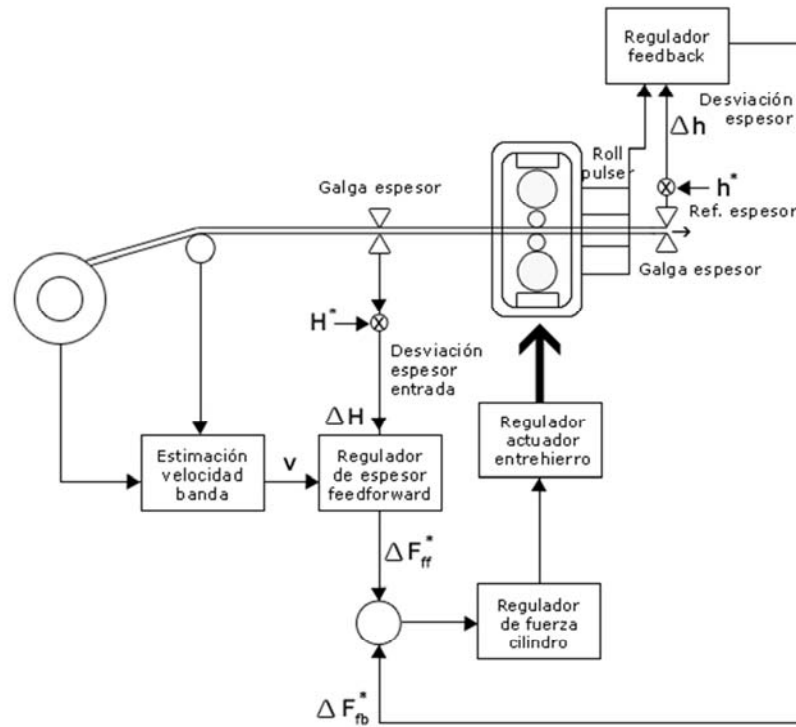


Figura 4.18 Regulador de espesor Feedforward

Las correcciones adecuadas se aplican justo antes de que la perturbación de espesor seguido alcance la caja de laminación. La corrección a aplicar debe ser una regulación de la posición ΔS^* o de la fuerza ΔF^* dependiendo del diseño del regulador de espesor feedforward. Las ecuaciones de control 1 y 4 se deben de combinar para calcular la compensación necesaria, con el resultado:

$$\Delta F^* = W \frac{\delta P}{\delta H} \Delta H \quad (4.52)$$

$$\Delta S^* = - \frac{W}{M} \frac{\delta P}{\delta H} \Delta H \quad (4.53)$$

Una desventaja del regulador de espesor Feedforward es que se centra en la exactitud de los valores del coeficiente de sensibilidad del entrehierro y de los de

$$\frac{\delta P}{\delta H} \quad (4.54)$$

espesor medidos a la entrada. Los valores de espesor medidos pueden ser poco precisos si la tensión no es suficientemente alta y el aspecto superficial de la banda es malo, como la presencia de cazuelas centradas en la banda. Estas cazuelas alteran la efectividad de la medición del espesor y conducen a errores esporádicos en la medida que se trasladan a la propia laminación de la banda. Otra desventaja que presenta este tipo de regulación es la ineficiencia frente a cualquier tipo de perturbación entrante que no sea el espesor. Por ejemplo, variaciones en la dureza no serían detectadas ni reguladas.

4.3.2.3 REGULADOR DE ESPESOR MEDIANTE GALGAS

Una mayor mejora conceptual en la regulación del espesor fue sugerida independientemente por Blain (1948) y Sims (1953) y giraba en torno a las galgas de espesor y la técnica de predicción del valor del espesor. Esta teoría permitió estimar el valor instantáneo del espesor de la banda a partir de las medidas de la fuerza y distancia entre los cilindros de trabajo usando un modelo para la deformación de la caja de laminación e incorporando un lazo de regulación interno que eliminase los retrasos inherentes a la propia medición del espesor aguas abajo. Esta técnica de la utilización de galgas para la medición del espesor es particularmente importante cuando el rango del tiempo de respuesta del actuador frente al retraso de la comunicación sea menor que 1. En el caso de trenes con actuadores hidráulicos, este rango normalmente varía entre 0.05 y 0.75 en la rampa de aceleración que va desde el enhebrado de la bobina hasta que alcanza la velocidad máxima de laminación. Esta técnica aunque aporta grandes ventajas en diferentes aspectos, tiene dificultades, incrementa los errores, a la hora de estimar el espesor de la banda frente a perturbaciones de excentricidad en los cilindros, desplazamientos en los cojinetes, efectos de la histéresis, dilatación de los cilindros y errores en el modelo de deformación de la caja.

Con excepción de la excentricidad de los cilindros y los efectos de la histéresis, el impacto de estos factores puede ser mitigado mediante el diseño de sistemas de control relativamente simples. La excentricidad de los cilindros tiene mayor relevancia dado que puede ser amplificada por el regulador mediante galgas e introduciendo de esta forma mayores errores en el espesor a lo largo de toda la banda, que sin tener dicho control. Es decir, el inicial potencial beneficio de instalar actuadores de respuesta rápida no se alcanza y los problemas se ven agravados en tanto en cuanto el espesor de la banda disminuye.

La diferencia en la respuesta de las galgas frente a perturbaciones de espesor o de dureza frente a excentricidades se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Respuesta de las galgas frente a perturbaciones

PERTURBACIÓN	CAMBIO DE FUERZA	CAMBIO DE ESPESOR	RESPUESTA DE LA GALGA
Aumenta la Dureza	Aumenta	Disminuye	Cerrar el entrehierro
Aumenta el espesor de Entrada	Aumenta	Disminuye	Cerrar el entrehierro
Disminuye el entrehierro debido a excentricidad	Aumenta	Disminuye	Cerrar el entrehierro

El espesor estimado $\Delta\hat{h}$ proviene de la utilización de la ecuación (3.3), asumiendo un valor teórico M para el módulo del tren y no incluyendo ninguna perturbación en el entrehierro que pueda ser modelada e ignorando el resto, resultando la expresión (4.55).

$$\Delta\hat{h} = \Delta S + \frac{\Delta F}{\hat{M}} \quad (4.55)$$

La estructura de un regulador de espesor incorporando galgas se muestra en la Figura 4.19. Este regulador tiene un lazo interno de regulación de las galgas que multiplica el error estimado del espesor $\Delta\hat{h}$ por la ganancia dependiente prefijada K_s para generar un actuador de referencia de velocidad para el entrehierro S^* (en vez de una referencia de posición como habíamos hecho antes). Esto proporciona la mayor estabilidad al control por galgas. Esta ganancia K_g se define por la expresión (4.56).

$$k_g = \frac{1 + a}{\left[1 + a\left(1 - \frac{M}{\hat{M}}\right)\right]} \quad (4.56)$$

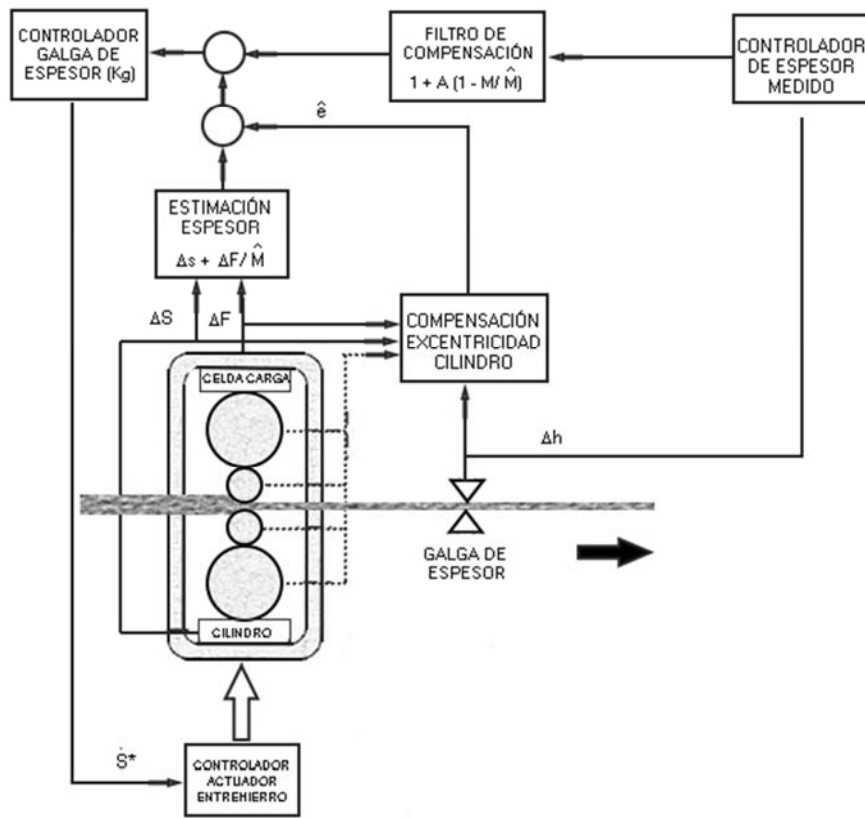


Figura 4.19 Sistema de Control de espesor mediante galgas con compensación de excentricidad de los cilindros.

En la figura 9 el término $(1 - M/\hat{M})$ es el módulo de error del tren, el cual normalmente es positivo y deseablemente menor que el 10%. El lazo de regulación feedback exterior basado en la medida de espesor Δh es todavía necesario para detectar y corregir perturbaciones a bajas frecuencias y errores debidos al módulo de error del tren. Los últimos errores son muy sensibles a M/\hat{M} como se demuestra calculando el factor de atenuación β para una perturbación de escalón debido a la acción del control de las galgas. El resultado es la ecuación (4.57).

$$\beta = \frac{(a + \frac{1}{\varepsilon})}{a + 1} \quad (4.57)$$

Donde ε viene dado por la ecuación (4.58).

$$\varepsilon = (1 - M/\hat{M}) \quad (4.58)$$

Esto nos muestra que si el módulo del tren estimado \hat{M} es igual a M , entonces el error en estado estable es cero para cualquier error de la fuerza ΔF_D . Desafortunadamente, este resultado no es verdad para errores del entrehierro, los cuales son amplificadas por un factor $(1+a)$ desde su valor del lazo abierto de $\Delta S_D / (1+a)$ a ΔS_D . Esto significa que cualquier error de excentricidad del cilindro presente en la pila de cilindros del tren cuatro será reproducido en la banda a no ser que algún tipo de compensación de excentricidad sea aplicado.

Otra manera de definir la efectividad de un regulador mediante galgas es comparando la dureza aparente del tren M^* , generada por el control feedback al valor natural M sin ninguna regulación presente. La relación entre M^* , M y β es el dado por la ecuación (4.59).

$$M^*/M = 1 + a(\beta - 1) \quad (4.59)$$

Las Figura 4.20 y Figura 4.21 muestran unas gráficas muy útiles que relacionan el factor de atenuación con el módulo de error del tren y con el ratio del módulo del tren equivalente M^*/M . Es importante denotar que un ratio del módulo del tren equivalente de 10, por ejemplo, solo reduce el error del espesor en un factor aproximadamente de 4, cuando a es 3.0. De todas formas, mientras que a aumenta, la atenuación alcanzada disminuye para un error del módulo del tren dado. Esto unido a la sensibilidad a las perturbaciones en el entrehierro explica porque el regulador mediante galgas no es apropiado para bandas finas y/o bandas duras, donde el a es grande.

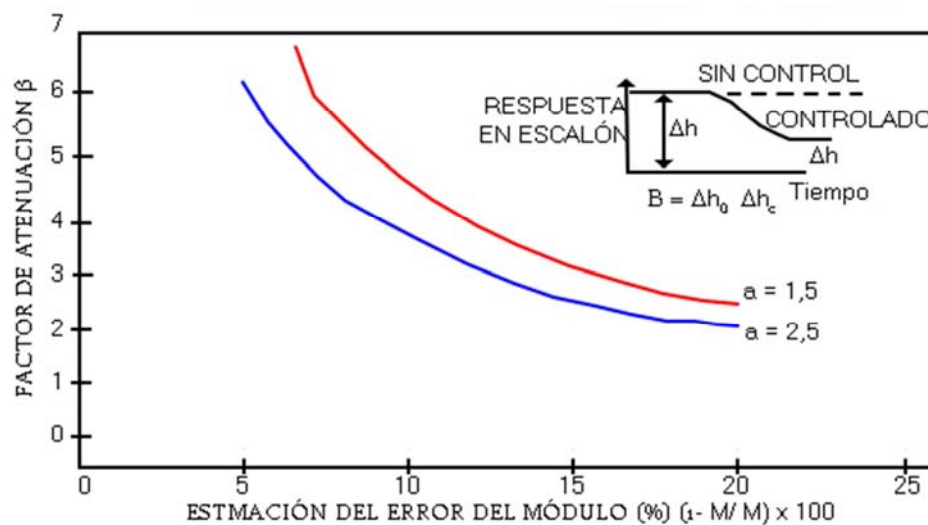


Figura 4.20 Factor de atenuación de las galgas como función del error del módulo del tren.

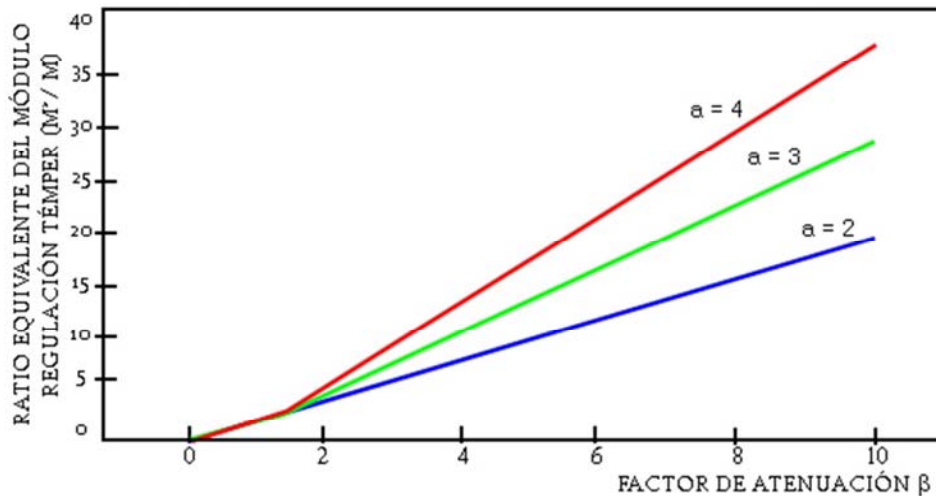


Figura 4.21 Efecto del módulo del tren en el Factor de Atenuación

4.3.2.4 COMPENSACIÓN DE LA EXCENTRICIDAD DE LOS CILINDROS

Las galgas dispuestas en las cajas de laminación de control de posicionamiento del entrehierro hidráulico requieren de algún tipo de compensación de la excentricidad de los cilindros. Ha habido numerosos estudios con el fin de estimar y compensar las perturbaciones de las excentricidades de los cilindros. Algunos sistemas han utilizado análisis espectrales de las señales de fuerza de laminación para detectar la periodicidad de la señal de excentricidad, asociada a cada cilindro, y después reconstruir la señal resultante de todas para ser compensadas. Un acercamiento más general y robusto es hacer uso de todas las señales relevantes disponibles (Edwards, 1987). Una antigua estimación de la señal de excentricidad se puede obtener la expresión (4.60).

$$\hat{\epsilon}(t - t_d) = \Delta h_m(t) - \left[\frac{1}{M} \Delta F_m(t) + \Delta S(t) \right] \quad (4.60)$$

Para obtener una estimación de la excentricidad en tiempo real, lo cual puede ser usado para su compensación, es necesario inicialmente construir “mapas” individuales de la excentricidad de cada cilindro, para luego recombinarlos en tiempo y fase adecuados. Estas excentricidades individuales de cada cilindro son separadas de la señal compuesta mediante un proceso conocido como filtrado periódico. Esto requiere de una precisión en los pulsos de tiempo en la rotación de los cilindros. Normalmente los pulsos los podemos obtener del motor

del cilindro de trabajo, siendo de más de 1.000 por revolución. Para una correcta sincronización, un pulso por revolución de cada cilindro de apoyo sería adecuado.

La estructura de un compensador de excentricidades de cilindros (REC) se muestra en la Figura 4.22. Una cuidadosa sincronización de las señales y una selección minuciosa del filtro son necesarias para evitar inestabilidades y posibles apariciones de problemas debido a la histéresis en el movimiento de las ampuestas.

El compensador de excentricidad de los cilindros mostrado en la Figura 4.22 puede ser utilizado en unión con cualquier tipo de regulador de espesor. En la Figura 4.23 se puede observar la mejora en el funcionamiento que se puede alcanzar usando un compensador de excentricidad de cilindros.

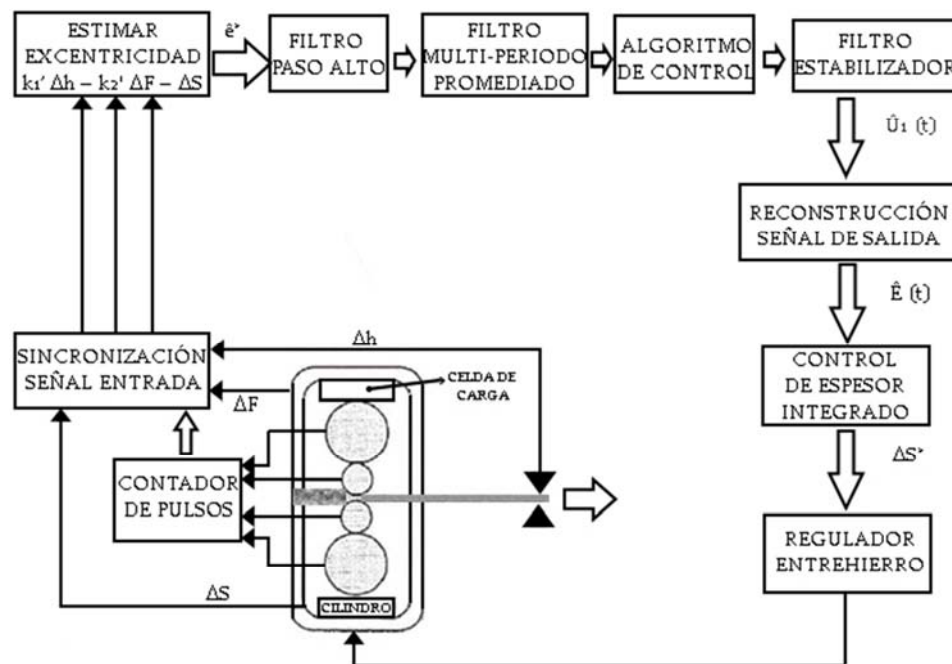


Figura 4.22 Estructura de un regulador de excentricidades.

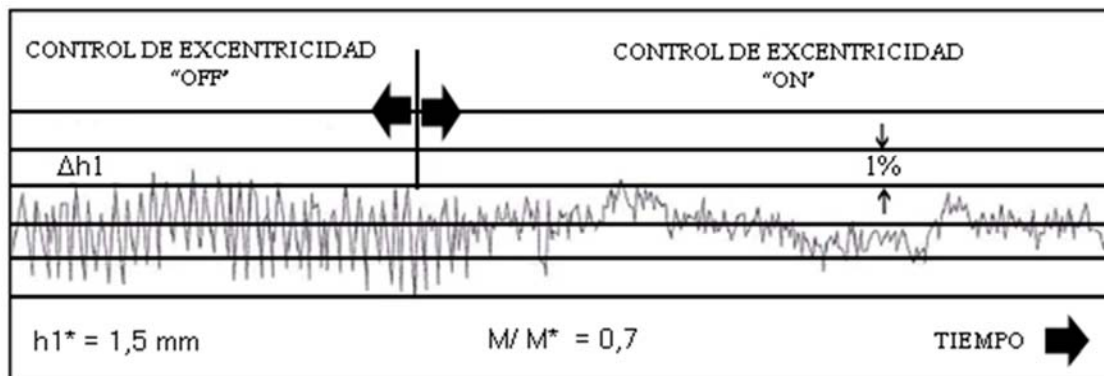


Figura 4.23 Resultados medidos de la Regulación de la Excentricidad.

4.3.2.5 REGULADOR DE FLUJO DE MATERIAL

El concepto de flujo de masa está basado en la premisa de moderno, motores regulados en velocidad digitalmente son muy precisos y si el flujo de masa que atraviesa la caja de laminación es constante y la velocidad de la banda a la salida de la caja es constante, el espesor de salida debe ser también constante. La Figura 4.24 muestra un dibujo esquemático de un regulador de espesor donde el espesor en el entrehierro es estimado a través de la ecuación (4.61).

$$\hat{h} = \frac{H_m V}{v} \quad (4.61)$$

Y se aplica un lazo de regulación feedback a la fuerza de laminación para asegurarse su regulación. La apertura o cierre de la distancia entre los cilindros de trabajo altera el espesor de salida y como consecuencia la velocidad de entrada para alcanzar el deseado flujo de masa. Se han conseguido excelentes resultados para este sistema tanto para sistemas de una sola caja, trenes reversibles, como en la primera caja de trenes de laminación en frío. Los buenos resultados de este sistema dependen de la fiabilidad de las medidas de espesor y velocidad. Proporcionar estas dos medidas es significativamente más caro que el sistema de medición por galgas.

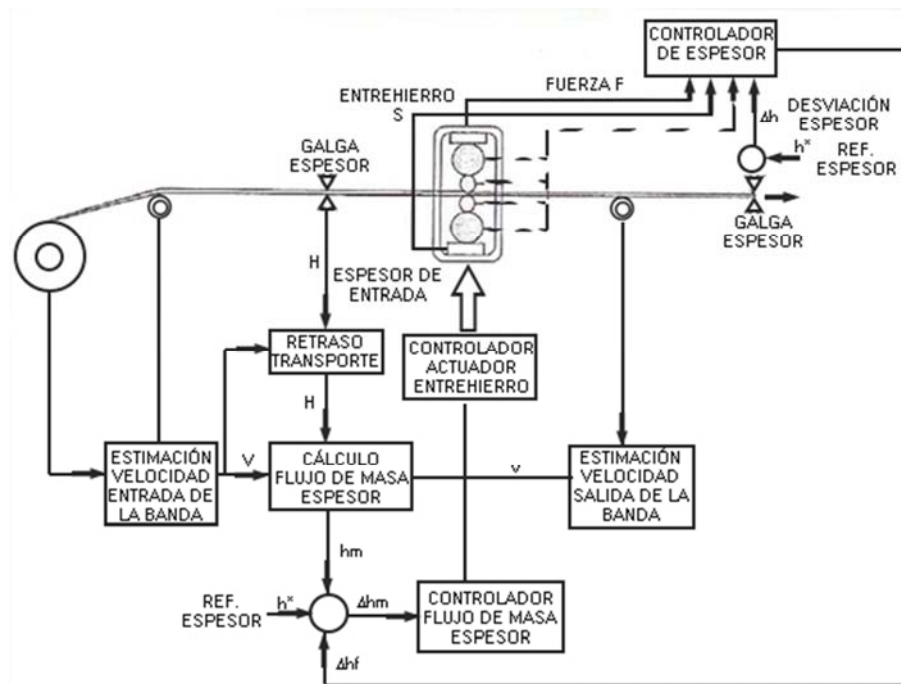


Figura 4.24 Regulador de espesor mediante flujo de masa

Aunque el control de excentricidad no es necesario su aplicación a un regulador de flujo de masa, como en el sistema de regulación mediante galgas, puede ser muy beneficioso.

4.3.2.6 MODELO BASADO EN UN REGULADOR FEEDBACK

Mientras que el regulador de espesor feedback convencional normalmente tiende a compensar el retraso variable en el lazo de regulación usando una ganancia integral dependiente de la velocidad. Esto no elimina el efecto del retraso, simplemente proporciona una respuesta consistente sobre el rango de velocidad del tren de laminación. La tecnología proporcionada por el modelo basado en un regulador feedback, por el contrario conocido como compensación del retraso de transporte o "Smith Predictor" proporciona un conocimiento sostenible eliminando el indeseable efecto del retraso en el transporte en el regulador dinámico.

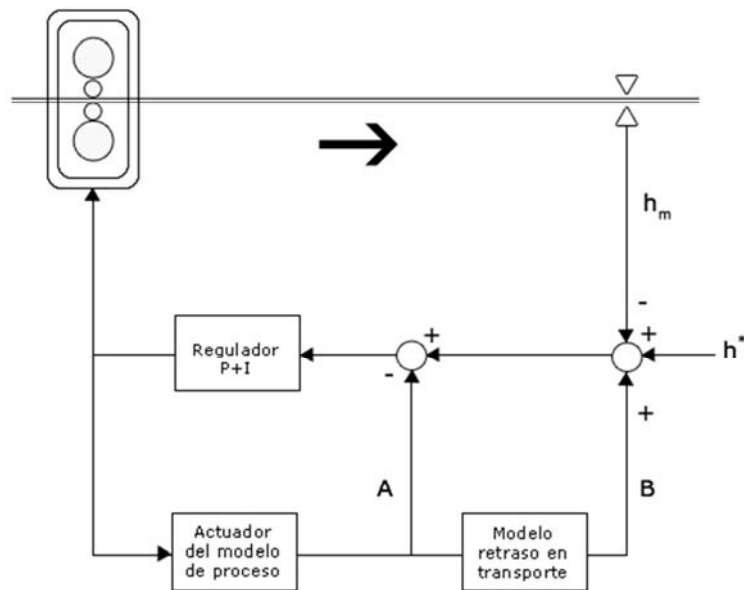


Figura 4.25 Modelo basado en el Control Feedback

La Figura 4.25 muestra la estructura de un modelo basado en un regulador feedback. Utilizando el modelo de actuador/ proceso, se añade el lazo de regulación (A) que cortocircuita el retraso en el transporte entre la caja de laminación y la medida de la galga. Esto permite al regulador feedback ser ajustado como si no hubiese retraso de transporte. La galga todavía proporciona una medida de las perturbaciones con retraso, pero los efectos de la acción de control lo enmascaran restando una salida del retraso del modelo de proceso (B). Esto proporciona un camino a la corrección de cualquier error de proceso.

El modelo basado en el regulador feedback es muy útil donde el retraso en el transporte es significativo comparado con el tiempo de respuesta del actuador. Los beneficios en el funcionamiento global están íntimamente relacionados con la calidad del modelo actuador/ proceso utilizado.

4.3.2.7 CONTROL DE LA ELONGACIÓN EN UN TREN TÉMPER

Merece la pena hacer referencia al control de elongación en un tren témpér y mostrar sus distinciones frente a un control de espesor dado que se suelen confundir ambos controles de ser iguales.

La elongación de la banda, también llamada extensión, se define por la expresión (4.62), donde L_0 , L son la longitud de entrada de la banda y la de salida, V , v son la velocidad de entrada y de salida de la banda y H , h son los espesores de entrada y de salida.

$$e = 100 \left(\frac{L}{L_0} - 1 \right) (\%) = 100 \left(\frac{v}{V} - 1 \right) = 100 \left(\frac{H}{h} - 1 \right) \quad (4.62)$$

Cuando la elongación se regula a partir de una elongación referencia, aparentemente el ratio H/h se mantiene constante y desviaciones de espesor entrantes permanecen en el espesor de salida.

En la Figura 4.26 se muestra un típico regulador de elongación. En la práctica la elongación se calcula partiendo del ratio entre la velocidad de entrada y salida de la banda. La velocidad de la banda se mide con dispositivos laser o con generadores de pulsos instalados en los deflectores de los rodillos.

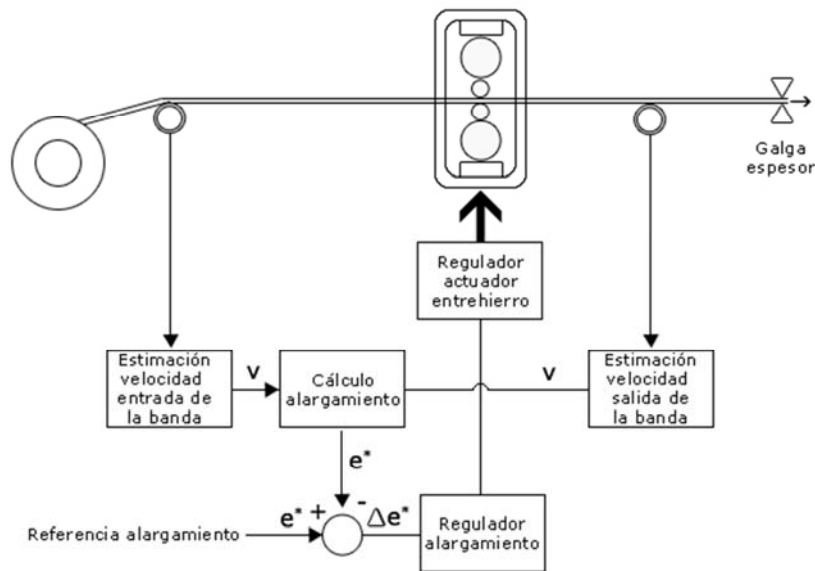


Figura 4.26 Regulación de Elongación

4.4 DETERMINACIÓN DEL MODELO DEL TREN

El modelo del tren es un parámetro importante para el cálculo de la ganancia del control de espesor vía posicionamiento del entrehierro y particularmente para el regulador mediante galgas. Es función de muchos componentes como se puede ver en la Figura 4.27. La fuerza aplicada a los cilindros de trabajo depende del ancho de banda, lo que significa que la deformación global o estiramiento es función de ambas magnitudes, fuerza F y ancho de banda W como se muestra debajo:

Ecuación (4.63) representa la expresión de alargamiento del tren con presencia de banda.

$$S_s(F, W) = S_0(F) + \Delta S_s(F, W) \quad (4.63)$$

La ecuación (4.64) nos da el alargamiento con el tren vacío.

$$S_e(F) = S_0(F) + \Delta S_e(F) \quad (4.64)$$

donde $\Delta S_s(F, W)$ = Alargamiento con dependencia del ancho de banda y presencia de banda, $\Delta S_e(F)$ = Alargamiento sin dependencia del ancho de banda y sin banda y $S_0(F)$ = Función del alargamiento del tren con independencia del ancho de banda.

Combinando las ecuaciones (4.63) y (4.64) nos da una ecuación (4.65) práctica para el alargamiento del tren con presencia de banda en términos de la curva de alargamiento del tren de laminación vacío más un término de corrección de la dependencia del ancho $S_w(F, W)$.

$$S_s(F, W) = S_e(F) + S_w(F, W) \quad (4.65)$$

De igual forma, el módulo del tren $M(F, W)$ para una caja con presencia de banda viene dado por la ECUACIÓN (4.66).

$$M(F, W) = \frac{-1}{\left[\frac{\delta S_e(F)}{\delta F} + \frac{\delta S_w(F, W)}{\delta F} \right]} \quad (4.66)$$

Resultados típicos se muestran en la Figura 4.28 para el efecto del ancho de banda en el alargamiento del tren y en el módulo del tren.

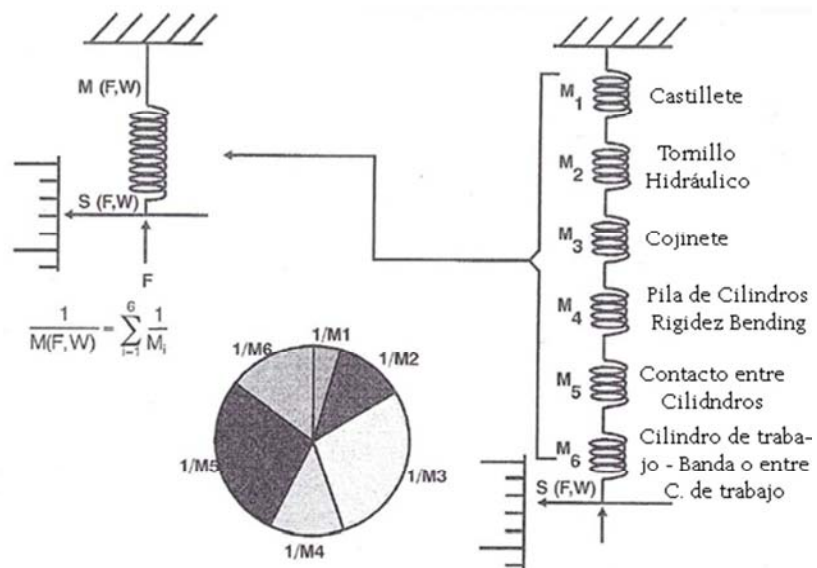


Figura 4.27 Componentes de desviación de una caja de un tren de laminación.

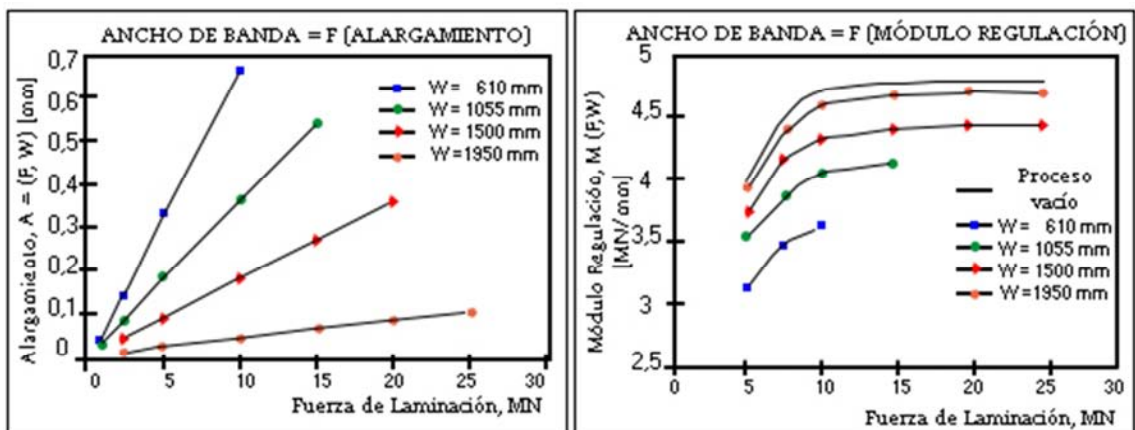


Figura 4.28 Efecto del ancho de banda en el alargamiento del tren y módulo.

4.5 COMPENSACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD

La tarea de cualquier regulador es facilitar en la medida de lo posible la predicción de una perturbación en tiempo real y cancelar antes de que ocurran mediante las medidas de los transductores. Esto es particularmente útil en sistemas de control de espesor feedback, los cuales tienen un retraso en la medida inevitable. Una fuente de perturbaciones predecibles es la excentricidad de los cilindros, ya comentada. Otro tipo de perturbaciones es la dependencia de la velocidad de laminación y engloba los efectos de la película de aceite de los cojinetes en la posición del entrehierro y los efectos del rango de tensión y temperatura en la fuerza de laminación (Figura 4.29).

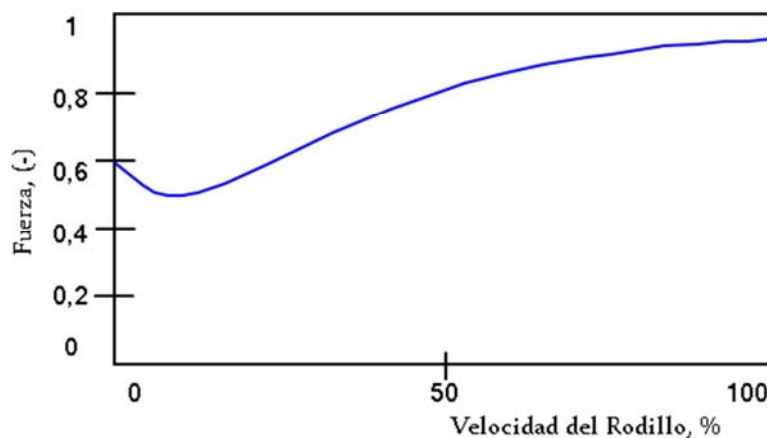


Figura 4.29 Efectos de la velocidad en la Fuerza del cilindro.

Los efectos de la película de aceite en los cojinetes pueden ser fácilmente medibles en un tren de laminación vacío, así como la función resultante, dependiente de la velocidad, implementada ya bien sea a través de una función analítica por aproximación o a través de una tabla de referencia. El término de corrección se introduce al regulador de posición del entrehierro.

Los efectos resultantes de la dependencia de la velocidad de la dureza efectiva de la banda son más complicados de modelar. Normalmente suele haber una interacción entre el rango de tensión y los efectos de la temperatura, cada una tiende a cancelar la otra, y en muchos casos no hay intento de compensación. En algunos casos, como en la doble reducción (DR), materiales recocidos, el efecto del rango de tensión puede ser dominante y muy significativo, con fuerzas de laminación crecientes por encima del 50% de la velocidad de enhebrado y hasta velocidad máxima. En esos casos el modelado de la influencia de la velocidad es de gran ayuda, proporcionando grandes

beneficios en las rampas de aceleración y deceleración del tren. Este ajuste de corrección normalmente se introduce en el lazo de regulación de la fuerza.

4.6 INTERACCIONES DE LAS TENSIONES

En el pasado el efecto de las interacciones entre las tensiones en la regulación del espesor en una simple caja se ha ignorado. Esto ha sido justificado en trenes de laminación de baja velocidad por la utilización de actuadores lentos. En trenes nuevos con actuadores rápidos y laminando a velocidades mucho mayores, los efectos de las tensiones pueden limitar seriamente los beneficios potenciales de los actuadores rápidos (Ueda et al 1990). El problema se plantea porque movimientos rápidos del entrehierro para corregir perturbaciones de espesor generadas en los transitorios de los cambios de tensión lo cual inhibe la corrección deseada de espesor (Figura 4.30). Esto no resultará salvo en un comportamiento óptimo del espesor, de lo contrario se generaran inestabilidades en la regulación.

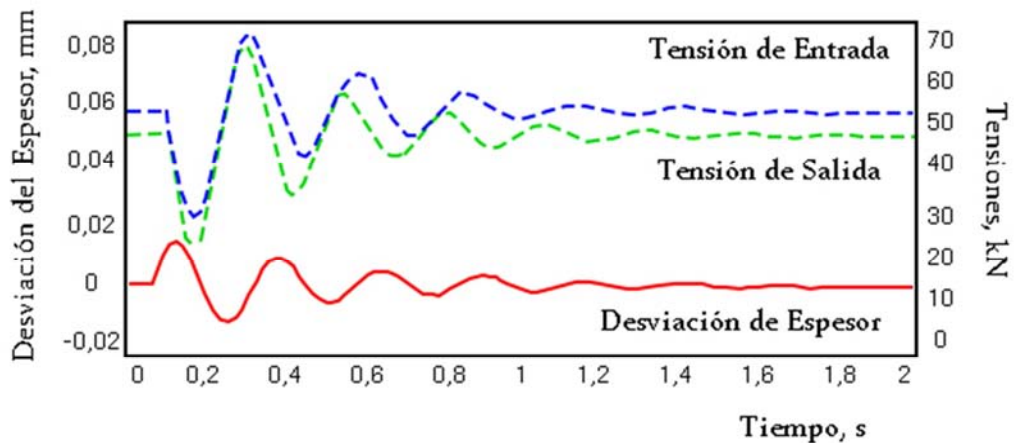


Figura 4.30 Resultados de la simulación que muestran una interacción adversa de tensión.

La regulación de tensión en cajas simples ha sido relegada a controlar el par aplicado a las bobinas, de forma que el par es proporcional al radio de la bobina. Los efectos de la inercia durante la aceleración y deceleración del tren se compensan normalmente mediante un lazo de regulación abierto, por el contrario, el sistema presenta un comportamiento pobre en el transitorio.

Interacciones de tensión adversas pueden ser reducidas utilizando control de tensión feedback desde los tensiómetros hasta los accionamientos de la bobinadora. Este acercamiento se ha visto dificultado por las medidas de tensión

poco fiables. Una alternativa es el empleo de esquemas de control no interactivos similar al normalmente empleado en trenes Tándem. Esto significa la creación de una señal de corrección de tensión correspondiente a la corrección del entrehierro, y que alimente el accionamiento de la desbobinadora/bobinadora en forma de recorte de la corriente o velocidad. En otros esquemas se fuerzan cambios de tensión, en la señal adecuada, para ayudar a controlar el espesor.

Mientras que variaciones de tensión incontroladas asociadas a movimientos del entrehierro tienen un efecto adverso en el espesor, es interesante denotar, que en la ausencia de acciones de control, deliberadas variaciones en la tensión como consecuencia de perturbaciones en la dureza actúan atenuando la variación de espesor.

4.7 DISCUSIÓN SOBRE LOS TIPOS DE REGULACIÓN

Por tanto, podemos concluir para los diferentes tipos de regulación analizados para un tren Témper y sus ventajas e inconvenientes podríamos resumirlos en los siguientes puntos:

4.7.1 REGULADOR DE ESPESOR FEEDBACK

- Implementación simple y robusta
- Error en estado estable cero.
- Respuesta lenta
- Requiere de compensación de ganancia de la velocidad
- Normalmente utilizado en combinación con otros reguladores

4.7.2 REGULADOR DE ESPESOR FEEDFORWARD

- Respuesta rápida con actuadores hidráulicos
- Opera con control de entrehierro o de fuerza
- Lazo abierto – requiere de estimaciones de parámetros precisas
- Sólo eficiente para perturbaciones del espesor de entrada

4.7.3 REGULADOR DE ESPESOR MEDIANTE GALGAS

- Rápida estimación de la galga de salida – evita retrasos en las mediciones
- Respuesta rápida con control hidráulico del entrehierro
- Control de perturbaciones de espesor y dureza
- Depende de las buenas estimaciones del módulo del tren
- Amplifica perturbaciones del entrehierro (eje. Excentricidad)

4.7.4 REGULADOR DE FLUJO DE MATERIAL

- Respuesta rápida con control hidráulico del entrehierro
- Lazo cerrado (no feedforward)
- Depende de medidas de espesor y velocidad precisas
- Más caro que el medidor de galgas
- Interpreta las perturbaciones en el entrehierro correctamente

4.8 CONCLUSIÓN SOBRE LOS TIPOS DE REGULACIÓN

En este estudio y dado que el núcleo duro de investigación y desarrollo gira entorno a la eliminación de una perturbación generada a la entrada de primera caja de un tren Témpér se determina la combinación del Regulador de espesor Feedback y de espesor mediante Galgas.

CAPÍTULO 5

EL PROCESO SIDERÚRGICO

5 ASPECTOS MECÁNICOS Y METALÚRGICOS DE PROCESOS DE LAMINACIÓN TEMPER.

Las funciones principales de un tren de laminación Témpér son especialmente Las funciones principales de un tren de laminación Témpér son especialmente importantes para los usuarios finales:

- Supresión del alargamiento al límite de fluencia o Palier.
- Transferencia de la rugosidad final a la superficie de la banda.
- Corrección de la planitud, si necesario.

En condiciones industriales, a menudo es difícil atender a estos diferentes objetivos principalmente por desconocimiento del mecanismo de supresión del alargamiento al límite de fluencia y transferencia de rugosidad.

Se ha desarrollado partiendo de la experiencia un modelo que previene la aparición de la estructura Piobert-Lüders e informa de los efectos de los principales parámetros de la supresión del Palier. Este modelo requiere del conocimiento de la deformación de los cilindros de trabajo directamente relacionado con la fuerza de laminación.

Es por eso que hay otro modelo que predice la fuerza de laminación el cual está basado en un método de deslizamiento que tiene en cuenta la deformación elástica del cilindro. El modelo estima la distribución del estrés en el entrehierro y, por integración, la fuerza de laminación.

En relación a la rugosidad final, los resultados experimentales muestran que la transferencia de rugosidad puede estar relacionada con parámetros mecánicos deducidos de la distribución del estrés en la banda.

A continuación se detalla:

- El modelo predictivo de la estructura de las bandas de Piobert-Lüders.
- El modelo de la fuerza de laminación
- Los resultados en la investigación sobre la transferencia de rugosidad.

5.1 MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA BANDA

5.1.1 INICIACIÓN AL MECANISMO DE ESTRUCTURA DE LA BANDA

La distribución de la deformación después del proceso Témper en un acero que presenta el Palier, es extremadamente heterogéneo y consiste en zonas alternativas no deformadas y con deformación plástica lo cual es similar a las líneas de Piobert-Lüders en probetas de ensayo.

Estas líneas se originan en el borde de la banda, paralelamente al eje de laminación y se propagan con una inclinación de 45° respecto al espesor de la banda, ver Figura 5.2 y Figura 5.1-2

- Son líneas discontinuas porque una deformación continua crearía un volumen deformado muy largo, tan largo como la deformación total sea menor que el alargamiento al límite de fluencia.

Estas líneas son inclinadas porque un choqueo transversal no puede cruzar la brecha elásticamente tan pronto como la deformación total exceda un 0,2%

La propagación de las líneas se muestra en la Figura 5.2 y en la Figura 5.2, la cual ilustra la configuración longitudinal, siendo similar a un esqueleto de pescado, también conocido como “fish-bone”.

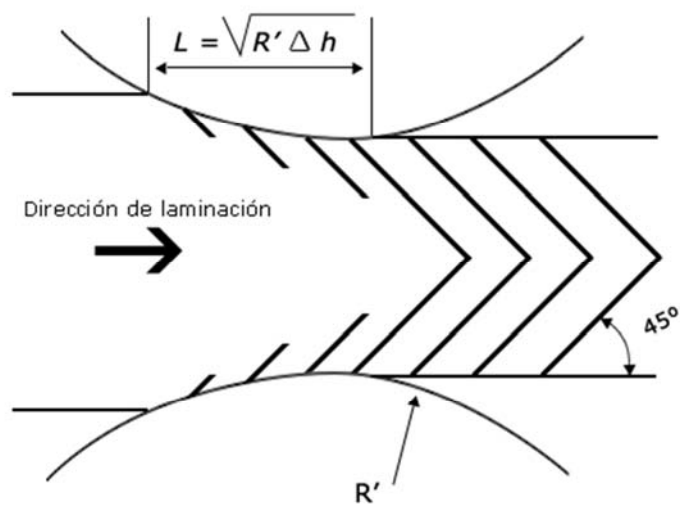


Figura 5.1 Propagación de las líneas a través del entrehierro, durante el proceso de temperizado.

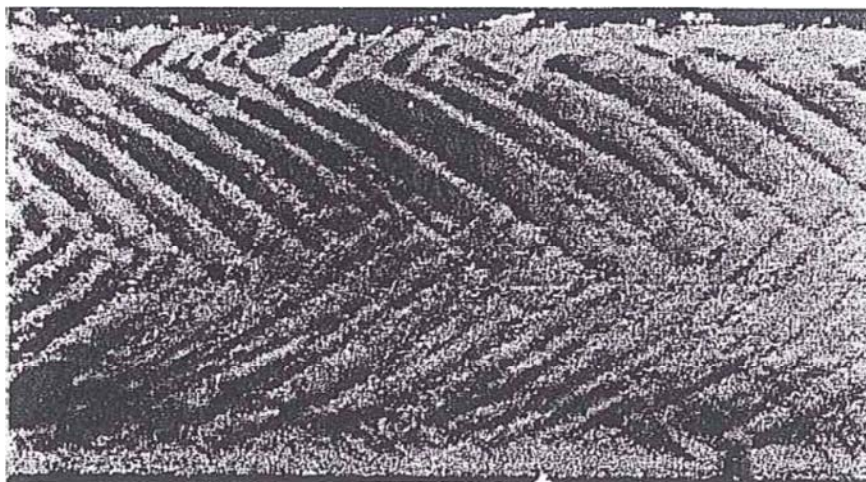


Figura 5.2 Líneas de Piobert-Lüders

5.1.2 RELACIÓN QUE DESCRIBE LA RED DE LÍNEAS

La red de líneas puede ser simplemente descrita con la razonable aceptación de que la red es única y periódica y que las líneas son idénticas en la banda.

Con ello la deformación final se puede expresar por la ecuación (5.1), donde n es el número de líneas, W ancho de banda, L longitud de contacto y ξ_P alargamiento al límite de fluencia o Palier.

$$\varepsilon = \frac{n W \varepsilon p}{L} \quad (5.1)$$

Y la distancia V entre líneas viene dada por la expresión (5.2).

$$V = \frac{L}{n} \quad (5.2)$$

Además la longitud de contacto viene dada por la expresión (5.3) relación clásica, donde R' radio del cilindro deformado, e espesor de la banda y ξ deformación.

$$L = (R' e \varepsilon)^{1/2} \quad (5.3)$$

La periodicidad de las líneas resulta de una relajación repentina cuando la deformación plástica ocurre, posteriormente la deformación elástica aumenta hasta que una nueva línea comienza. El espacio V puede estar consecuentemente correlacionado con la deformación elástica ξY en el límite elástico mediante la expresión (5.4)

$$V = (R' e \varepsilon y)^{1/2} \quad (5.4)$$

Introduciendo el criterio de Von Mises, nos queda la ecuación (5.5), donde ν la Relación de Poisson, E el módulo de Young, σ_Y límite de elasticidad, σ_T tensión

$$\epsilon_y = \frac{1 - \nu^2}{E} \left(\frac{2 \sigma_y}{\sqrt{3}} - \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \sigma_T \right) \quad (5.5)$$

Donde, dado que en la deformación plástica se mantiene el volumen, hay una reducción del espesor en ciertos sitios de la banda. Cada línea corresponde a una pequeña cazuela como se muestra en la Figura 5.3.

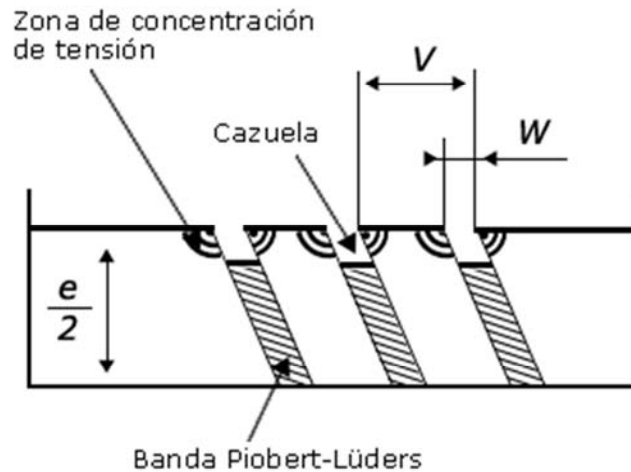


Figura 5.3 Detalle de una línea de Piobert-Lüders

La profundidad de la cazuela crece hasta que la línea alcanza la mitad de la banda, esta profundidad h es por lo tanto igual a la mitad del alargamiento al límite de fluencia, ecuación (5.6).

$$h = \frac{e \epsilon_p}{2} \quad (5.6)$$

5.1.3 PREDICCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL LÍMITE DE ELASTICIDAD

La aparición de cazuelas en la superficie de la banda modifica localmente el campo de tensiones. La concentración de tensiones introducida por estas

cazuelas se asimila a las creadas por muescas y puede ser evaluada por el coeficiente K_t , ecuación (5.7).

$$K_t = 1 + \left(\frac{2h}{W}\right)^{1/2} \quad (5.7)$$

Esta relación permite describir la evolución del límite de elasticidad; en particular la presencia de un mínimo del límite de elasticidad en la relación Límite de elasticidad-Alargamiento, [69].

Para deformaciones muy pequeñas, la profundidad h es pequeña y K_t es próxima a 1. Para deformaciones mayores, h aumenta rápidamente, y como consecuencia K_t , lo cual supone una disminución del límite elástico. Cuando las líneas de Piobert – Lüders, en el lado opuesto de la banda, se unen en el centro del espesor de la banda, la profundidad de la cazuela es máxima e igual a $(e \cdot \varepsilon \cdot p / 2)$ de la ecuación (5.6) y por lo tanto K_t alcanza igualmente su máximo, ecuación (5.8).

$$K_{t \max} = 1 + \left(\frac{e \varepsilon p}{W}\right)^{1/2} \quad (5.8)$$

Posteriormente la profundidad permanece constante y la deformación creciente se extiende a lo largo de la anchura de la banda W ; como consecuencia K_t se va haciendo menor y el límite de elasticidad aumenta.

5.1.4 DIAGRAMA FUERZA DE LAMINACIÓN – TENSIÓN

La supresión del alargamiento es una consecuencia directa de la evolución del límite de elasticidad. Según se ha descrito anteriormente el mayor descenso aparente del límite de elasticidad corresponde con el valor máximo de K_t . Esto es que la deformación correspondiente a $K_{t \max}$ es la deformación crítica ε_m necesaria para la supresión del alargamiento. Combinando la relación entre las ecuaciones (1) y (8), obtenemos la expresión (5.9).

$$\varepsilon_m = \frac{e}{V} \frac{\varepsilon^2 p}{(K_{t \max} - 1)^2} \quad (5.9)$$

Experimentalmente nos lleva a estimar en la mayoría de los casos un valor de $K_{t \max} = 1,3$.

Como el espaciado de las líneas V , dependen del radio deformado del cilindro, $\epsilon.m$ están relacionados con la fuerza de laminación y la tensión aplicada a la banda durante la laminación.

Esta dependencia se ve fácilmente en el diagrama fuerza-tensión. La Figura 5.4 muestra un ejemplo de una determinación experimental de dicho diagrama.

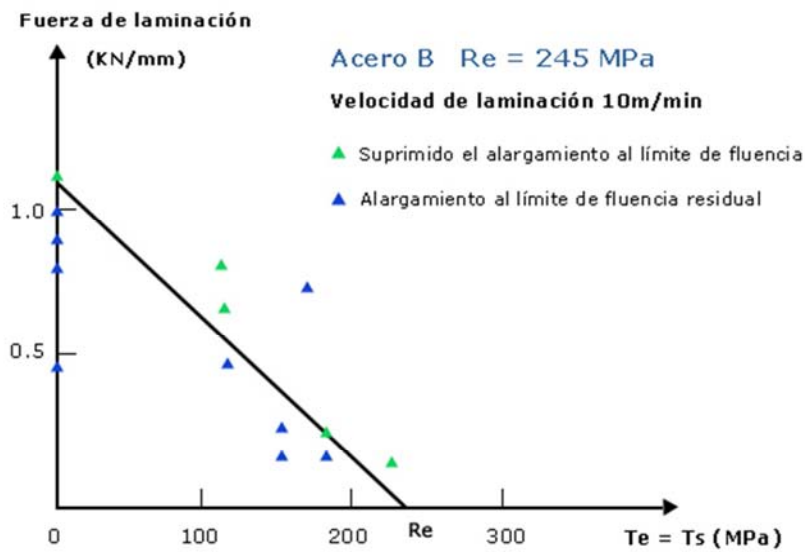


Figura 5.4 Determinación experimental del diagrama Fuerza de Laminación-Tensión

El diagrama puede ser generado para cada condición de laminación usando una receta/ modelo de fuerza de laminación.

5.2 MODELO DE FUERZA DE LAMINACIÓN

5.2.1 DESCRIPCIÓN DE UN MODELO

Los modelos utilizados usan el método clásico de deslizamiento, el cual ha sido probado como eficaz para problemas de la laminación en frío, [70]. Al asumir este método estamos considerando que la deformación es homogénea en cada sección. Esto está justificado incluso si la deformación se concentra en las líneas de Piobert-Lüders porque la deformación media varía constantemente en el entrehierro.

El metal se supone isotrópico y que tiene un comportamiento elástico-plástico perfecto siguiendo el criterio de tensión plana de Von Mises. El límite de elasticidad se considera constante, lo cual es razonable si tenemos en cuenta la pequeña deformación que tiene lugar en el tren témpor.

El entrehierro se clasifica en tres zonas sucesivas:

- Deformación Elástica
- Deformación Plástica
- Deformación Elástica

El final de la zona plástica corresponde con el mínimo espesor en el entrehierro. En la Figura 5.5 se representan las diferentes zonas en el entrehierro y la distribución de la tensión estimada en el modelo.

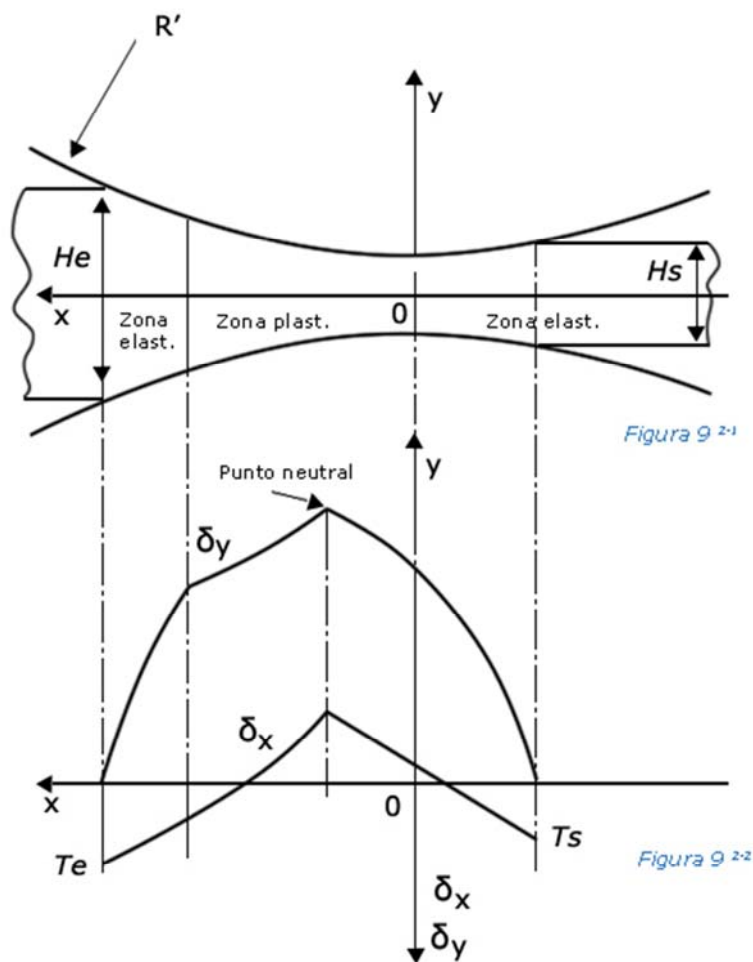


Figura 5.5 Zonas en el entrehierro y distribución de tensiones

La resolución es clásica, siendo los valores de tensión los valores restrictivos. Un método iterativo convergente es necesario dado que la deformación de los cilindros será gobernada por el método de HITCHCOCK, ecuación (5.10), donde R' es el radio del cilindro deformado, R radio del cilindro inicial, Δh reducción de espesor y F fuerza de laminación.

$$R' = R \left(1 + \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \frac{F}{\Delta h} \right) \quad (5.10)$$

El coeficiente de fricción entre el metal y el cilindro es un parámetro de ajuste.

Los resultados finales del modelo son la distribución de tensión en el entrehierro y, por integración, la fuerza de laminación F , véase Figura 5.5. Se deducen por lo tanto tres parámetros que describen la distribución de tensión, ecuaciones (5.11) y (5.12).

- Presión media PM

$$PM = \frac{F}{R' \theta} = \frac{\text{Fuerza Laminación}}{\text{Longitud de contacto}} \quad (5.11)$$

- Presión relativa media PMR

$$PMR = \frac{PM}{\sigma_y} = \frac{\text{Presión media}}{\text{Límite elástico}} \quad (5.12)$$

- Presión máxima en el entrehierro $PMAX$ (Presión en el punto neutro)

5.2.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO

Los resultados de este modelo han sido comparados con los resultados obtenidos con IRSID, tren de laminación en frío experimental. La figura 5 muestra la excelente correlación entre los datos experimentales y los calculados, en el caso de acero estándar de 1 mm de espesor laminado a dos diferentes velocidades.

La velocidad de laminación no tiene influencias directas sobre los cálculos, pero tiene un fuerte efecto sobre el límite de elasticidad, el cual ha sido

previamente estimado usando ensayos de tracción a diferentes rangos de tensión.

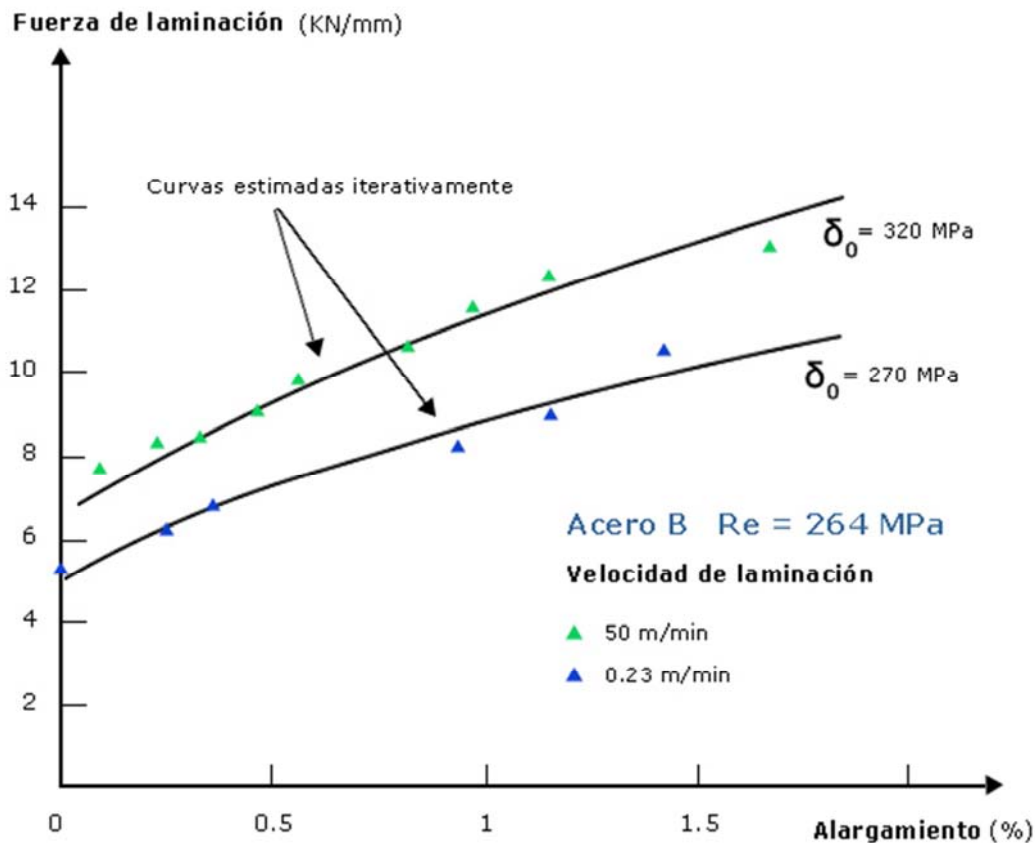


Figura 5.6 Comparación entre datos experimentales y calculados para un acero estándar de 1mm de espesor.

El mejor ajuste se obtuvo para un valor constante del coeficiente de fricción de Coulomb igual a 0,1, siendo coherente con las condiciones de laminación (laminación en seco, cilindros de trabajo con $0,2 \mu\text{m Ra}$). Para cilindros de trabajo de mayor rugosidad, se observa que el coeficiente de fricción Tresca alcanzaría resultados más eficientes.

Como conclusión, este modelo ha sido aprobado como muy satisfactorio para laminación de bandas finas en trenes témpor excepto para el caso de bandas muy finas en las que el modelo de HITCHCOCK es muy sencillo para describir las deformaciones de los cilindros.

5.3 TRANSFERENCIA DE RUGOSIDAD

El acabado superficial, en especial su rugosidad, para el caso de la hojalata, necesita ser controlado con precisión durante todo el proceso para poder lograr las especificaciones requeridas por el cliente y de esta forma no tener ningún problema en posteriores operaciones, como el pintado o barnizado.

Se han investigado los mecanismos que gobiernan la transferencia de rugosidad de los cilindros de trabajo a la superficie de la banda durante el proceso del tren tépmer, para dos acabados superficiales clásicos de los cilindros de trabajo, como son: rectificado y granallado [71].

5.3.1 CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES

Experimentos preliminares han demostrado que los parámetros normalmente utilizados para describir la rugosidad de la banda, todos convergen a los valores de rugosidad de los cilindros mientras que el alargamiento aumenta. Solo un parámetro por lo tanto es necesario para describir la variación de rugosidad con el alargamiento y se ha seleccionado el parámetro Ra, la transferencia viene dada por el ratio Ra banda/ Ra cilindro (R_{as}/R_{ar}).

La rugosidad de los cilindros rectificados es anisotrópica: periódica en la dirección transversal y muy igualada en la dirección longitudinal. Por otro lado, la rugosidad de los cilindros granallados es aleatoria e isotrópica. En consecuencia centramos nuestra atención en la rugosidad en la dirección transversal, siendo significativa en ambos casos.

En el terreno experimental, no se aplicó ninguna fuerza sobre los cilindros analizados salvo cuando dicho parámetro estaba siendo explícitamente tomado en cuenta.

5.3.2 EFECTO DE LAS PROPIEDADES DE LA BANDA

Los ensayos y análisis tuvieron lugar en aceros de bajo carbono (Acero A) y microaleados con bajo carbono (Acero B). La figura 6 nos muestra que la transferencia de rugosidad requiere de menor fuerza de laminación para el Acero A, con menor límite elástico. Este resultado confirma que la transferencia de rugosidad es un fenómeno identificativo, siendo su intensidad menor cuanto más blando sea el material a una determinada fuerza de laminación.

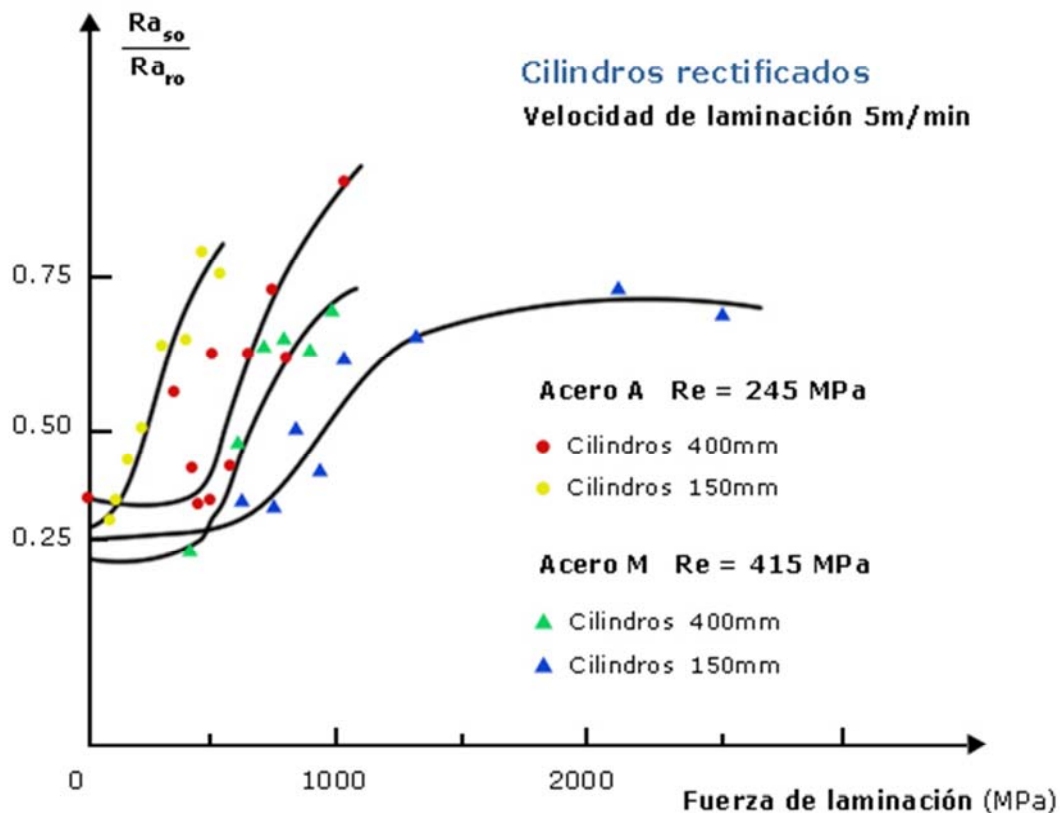


Figura 5.7 Influencia del límite de elasticidad y el diámetro del cilindro en la transferencia de rugosidad (cilindros rectificadas).

La Figura 5.7 muestra como el ratio de transferencia a una fuerza de laminación constante, aumenta a medida que el diámetro del cilindro disminuye.

La influencia del espesor de la banda estaba claramente establecida para un determinado alargamiento, la transferencia aumenta cuando el espesor disminuye, siguiendo las investigaciones de PANKIN y KRANENBERG [72].

La rugosidad inicial de la banda tiene una gran influencia en el mecanismo de transferencia. Se han analizado diferentes valores iniciales de rugosidad, entre 0,4 y 1,8. La Figura 5.8 muestra que las diferentes curvas convergen a 1 para el mismo valor de alargamiento, independientemente del valor inicial de rugosidad.

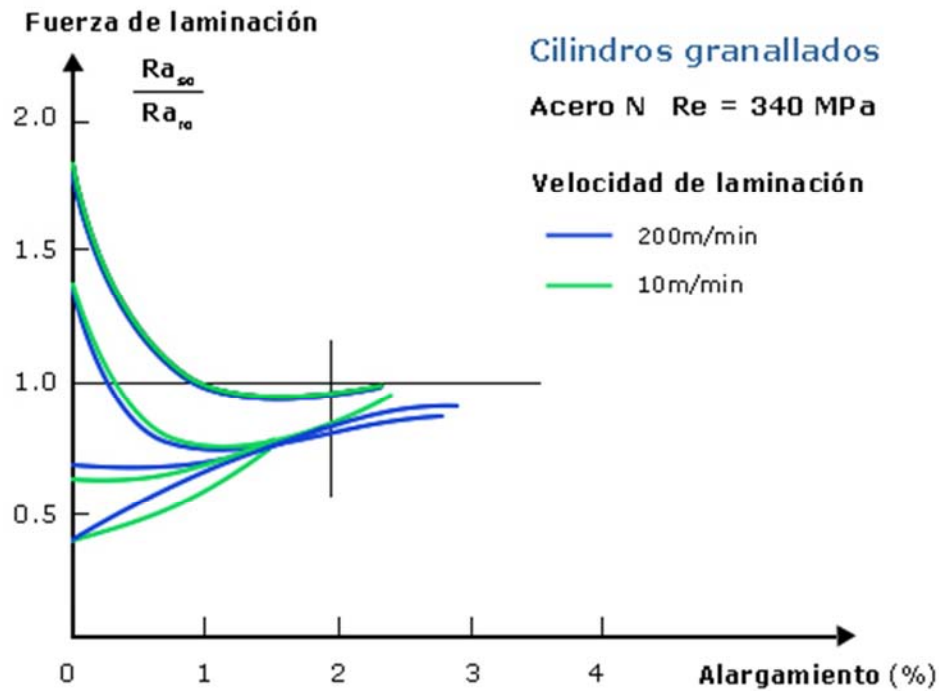


Figura 5.8 Influencia del valor inicial de rugosidad de la banda en la transferencia.

Si la rugosidad inicial es baja, la curva de transferencia aumenta continuamente. Por otro lado, si la rugosidad inicial es claramente mayor que la rugosidad del cilindro, el valor Ra en la banda primero desciende a un valor mínimo para posteriormente aumentar al valor Ra de los cilindros. En este caso, se elimina la rugosidad inicial de la banda antes de que la impresión de la rugosidad de los cilindros sea efectiva sobre la superficie de la banda.

5.3.3 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO

El efecto de la velocidad del proceso fue analizado en el rango de 10 a 800 m/min. Un resultado importante es que este parámetro no tiene efecto alguno en la transferencia con cilindros granallados. Se observó un pequeño aumento en el ratio de transferencia con la velocidad para cilindros rectificadas y un valor de rugosidad de la banda elevado.

El efecto del nivel de la tensión se estudió con los cilindros granallados, siendo la tensión de entrada y salida iguales. La Figura 5.9 muestra que para un determinado alargamiento, el ratio de transferencia disminuye cuando la tensión aumenta. Se puede apreciar como la rugosidad de la banda es isotrópica cuando el valor de la tensión varía.

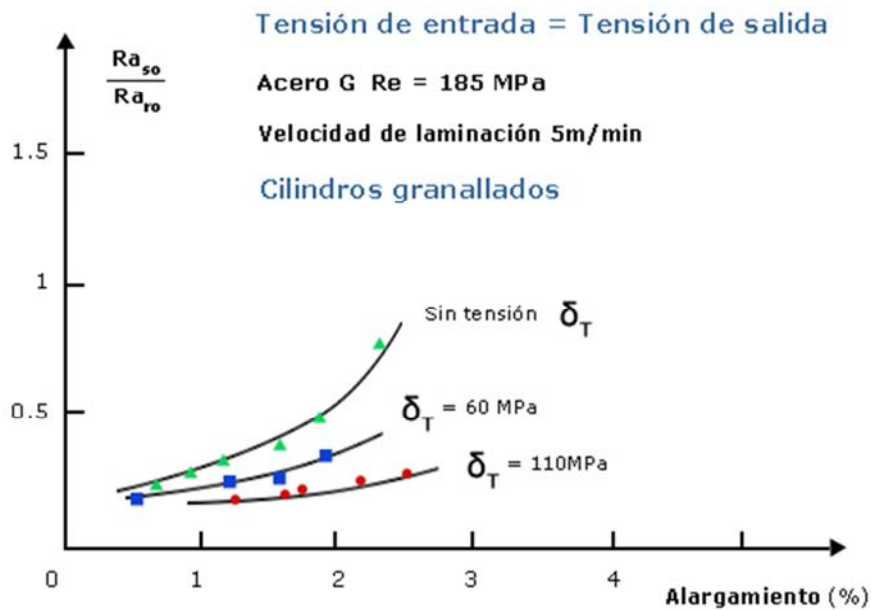


Figura 5.9 Influencia de una tensión de entrada equivalente a una de salida, en la transferencia de rugosidad.

En referencia al acabado superficial de los cilindros, la transferencia requiere de alargamientos menores con cilindros rectificados que con cilindros granallados, siendo el resto de condiciones de laminación similares (Figura 5.10).

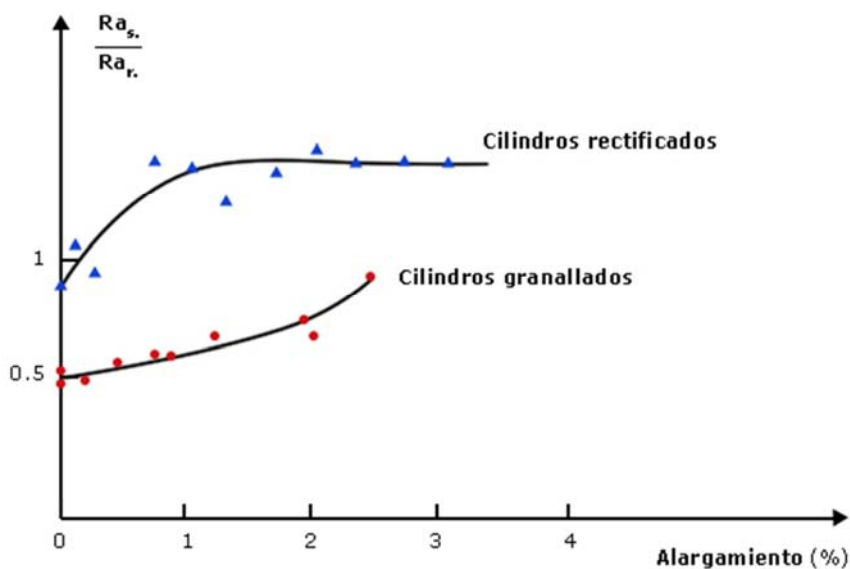


Figura 5.10 Comparación de transferencia de rugosidad entre cilindros rectificados ($Ra = 1,7 \mu m$) y cilindros granallados ($Ra = 2,0 \mu m$)

5.3.4 DISCUSIÓN

Para poder predecir y controlar la transferencia de rugosidad es necesario determinar las mejores variables físicas adaptadas a su descripción. Estas variables deben permitir la variación de las propiedades de entrada de la banda o parámetros del proceso para ser consideradas fácilmente.

Los anteriores resultados confirman que la transferencia de rugosidad es un proceso previsto que depende de la fuerza de laminación y de las tensiones verticales en el entrehierro. De hecho, para cilindros de trabajo pequeños, para una determinada fuerza de laminación, implica una menor longitud de contacto y por lo tanto mayor tensión vertical en el entrehierro. De igual forma, una disminución de las tensiones de laminación para un determinado alargamiento conlleva un aumento de la fuerza de laminación.

Se han analizado resultados experimentales como función de los tres parámetros PN, PMR y PMAX calculados por el modelo tratado.

Para cilindros granallados, PMAX parece ser el mejor parámetro a la hora de tener en cuenta los efectos de las propiedades de la banda. Como se muestra en la Figura 5.12, las curvas de transferencia son muy similares para ambos Aceros A y B y solo dependen de la rugosidad inicial de la banda. En relación a las condiciones de los cilindros, las curvas de transferencia dibujadas en relación a PMAX son prácticamente iguales para diferentes valores de tensión pero varían con el espesor de la banda (cuanto más delgada es la banda, mayor presión máxima es necesaria).

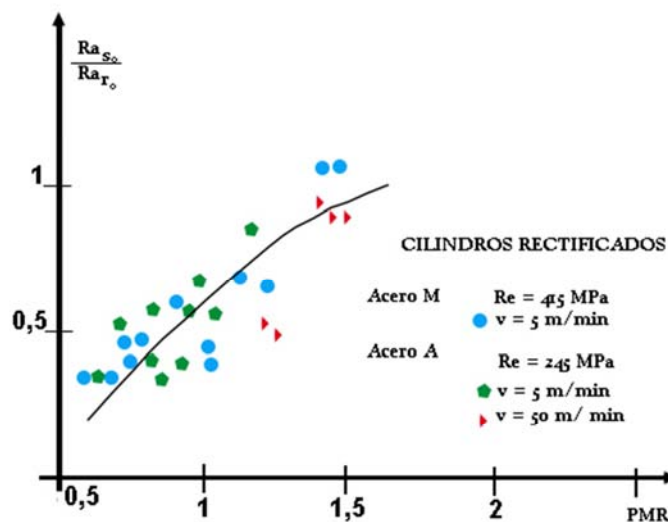


Figura 5.11 Modelización de la transferencia de rugosidad con la presión reducida media para cilindros rectificadas.

Para cilindros rectificados el parámetro PMR es el que mejor se adapta, como se puede ver en la Figura 5.11.

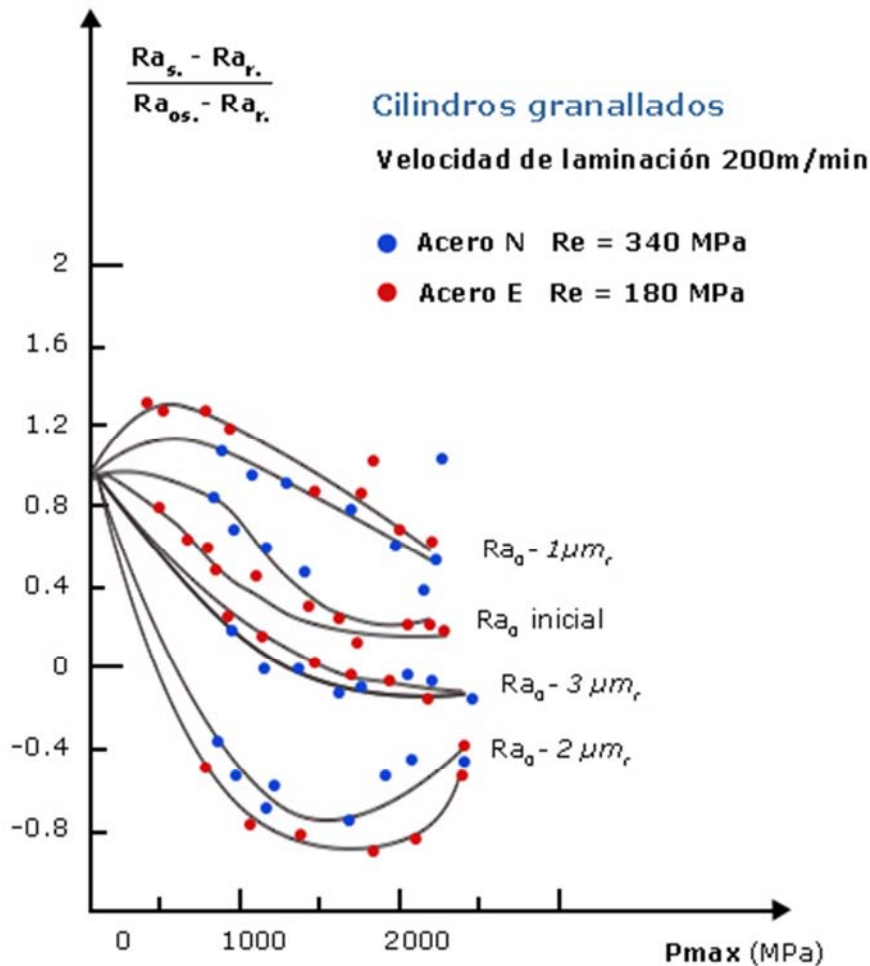


Figura 5.12 Modelización de la transferencia de rugosidad con la presión máxima para cilindros granallados.

Los resultados necesitan ser verificados para diferentes valores de rugosidad inicial de la banda. En la Figura 5.11 se aprecia que el parámetro PMR tiene en cuenta el efecto de la velocidad de laminación. Este resultado se puede explicar considerando que una variación de la velocidad de laminación es equivalente en un tren témpor a una variación inicial del límite de elasticidad de la banda si las condiciones de fricción entre los cilindros y la banda no varían.

En conclusión, los resultados obtenidos sugieren que la presión máxima PMAX para cilindros granallados y la presión reducida media PMR para cilindros rectificados son las variables adecuadas para describir la transferencia de rugosidad.

5.4 CONCLUSIÓN

Dentro de la cadena de procesos de producción de la hojalata, el proceso tren témper tiene una gran influencia en las propiedades finales de la banda. Una mejor comprensi3n y entendimiento del mecanismo que gobierna sus principales prop3sitos, en especial la eliminaci3n del palier o alargamiento al límite de fluencia y transferencia de rugosidad, requiere de una mejora de la regulaci3n industrial del proceso.

5.5 DATOS TÉCNICOS DEL TREN

Los principales datos técnicos del Tren DCR son:

5.6 DIMENSIONES DE LA BANDA

Anchura de banda:	Máx. 1.300 mm	
	Mín. 600 mm	
Espesor de banda:	Lado entrada:	Máx. 0,60 mm
		Mín. 0,15 mm
	Lado salida:	Mín 0,14 mm
Alargamiento de la banda:	Simple reducci3n:	máx de 2%
	Temple húmedo:	Entre 2% y 10%
	Doble reducci3n:	Reducci3n en Caja 1: M�x. 40%
		Alargamiento en Caja 2: M�x. 1%

5.6.1 DIMENSIONES DE BOBINA

Diámetro exterior:	Máx. de 2.000 mm
	Mín. de 1.000 mm
Diámetro interior:	Entrada: 420 mm
	Salida: 420 mm
Peso de bobina:	Máx.: 23 Tn

5.6.2 PRODUCCIÓN

Temple seco + Temple húmedo:	230.000 Tn/año
Doble reducción:	100.000 Tn/año

5.6.3 DATOS DEL TREN

Dimensiones de cilindros de apoyo:	Diámetro:	Máx. 1.100 mm
		Mín. 1.000 mm
	Longitud de tabla:	1.400 mm
	Alojamiento:	Cojinetes Morgoil
Cilindros de trabajo diseño CVC:	Diámetro:	Máx. 560 mm
		Mín. 510 mm
	Longitud de tabla:	1.600 mm
	Alojamiento:	Rodamiento de rodillos
Cilindros de trabajo DR diseño CVC:	Diámetro:	Máx. 400 mm
		Mín. 360 mm
	Longitud de tabla:	1.600 mm
	Alojamiento:	Rodamiento de rodillos
Desplazamiento axial de cilindros CVC:		± 100 mm
Velocidad del Tren:		Máx. 2.200 m/min
Fuerza de laminación por caja:		Máx. 12.000 kN

CAPÍTULO 6

EL DEFECTO SUPERFICIAL DE PLIEGUE

6 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

6.1 INTRODUCCIÓN/DEFINICIÓN

Se trata de un pliegue generado en el gap de la caja 1 del skin-pass.

Se encuentran todos los niveles de intensidad del defecto, desde una sombra que no alcanza a marcar los cilindros de trabajo hasta un pliegue laminado que genera rotura de banda. En comparación con el resto de fábricas, donde sólo aparecen pliegues laminados de alta intensidad, provocando marcas de cilindros y roturas de banda.

A continuación se muestran distintas imágenes de defectos, donde se pueden apreciar los distintos niveles del defecto a estudiar:



Figura 6.1 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 1

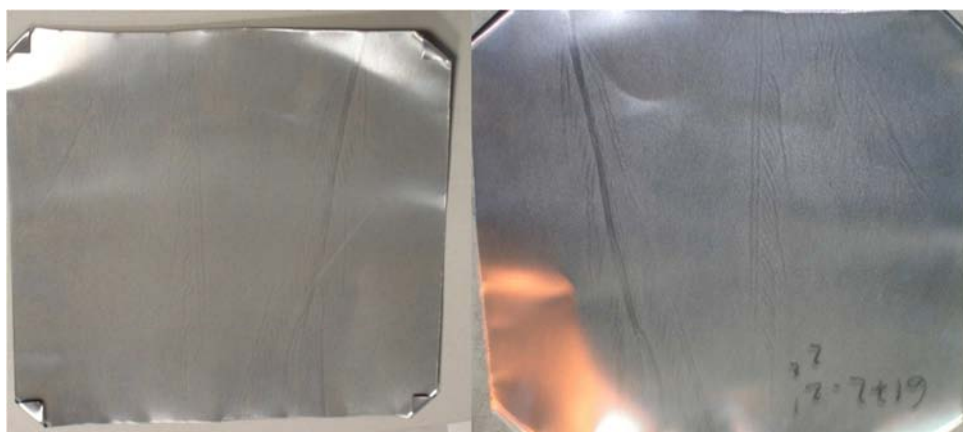


Figura 6.2 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 2



Figura 6.3 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 3



Figura 6.4 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 4

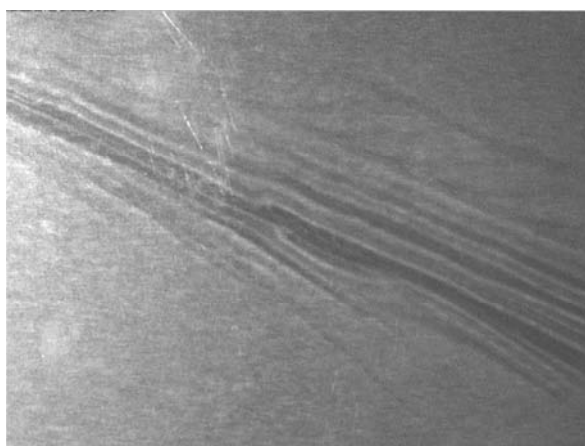


Figura 6.5 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 5

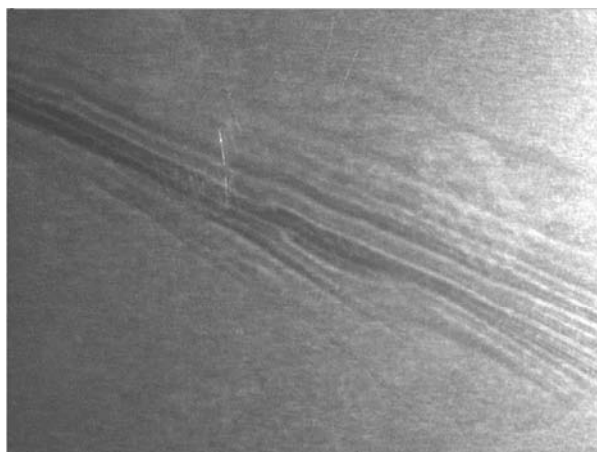


Figura 6.6 Defecto Flor de skin-pass. Muestra 6

6.2 ORIGEN Y ANÁLISIS INICIAL

En una valoración inicial del problema resalta su repercusión económica al ver la cantidad de años desde la detección del defecto, el efecto sobre el rechazo y por lo tanto sobre el rendimiento y producción de fábrica.

El defecto comienza a aparecer en el 2003 en el lado motor. Durante el año 2004 cambia al lado operador y a partir de 2005 aparece en el lado motor, comenzando entre los 50mm y 100mm del borde y penetrando hasta 300/400mm y en un ángulo aproximadamente de 30 grados sobre la dirección de laminación.

Según los datos analizados de las bobinas retenidas con destino chatarra desde el 2005:

- En el 80% comienza en el primer tercio de la bobina, continua en el segundo tercio un 23% y alcanza el último tercio en un 25%.
- En un 9% comienza el defecto en el segundo tercio de la bobina y continúa en un 5% hasta el final de la bobina.
- Y en 10% el defecto comienza en el último tercio de la bobina.

La causa habitual de este tipo de defecto es una distribución de tensiones no uniforme a lo largo del ancho de la bobina.

Parece ser que el origen es una combinación de causas entre las cuales destaca una actuación no correcta en el entorno del gap de caja 1 y una planitud deficiente a la entrada del tren.

Con respecto a la primera posible causa se ha actuado en los siguientes puntos del sistema:

- Comprobación de la línea de paso
- Fechas del anti-crimping de entrada a caja 1
- Flechas de los WR
- Alineación del WR y BUR

- Alineación y nivelación de los rodillos
- Rugosidad de los WR y anti-crimiping de entrada a caja 1.

6.3 IDENTIFICACIÓN

Atendiendo a la repercusión del defecto sobre la producción anual y al rendimiento de la instalación, el proceso de laminación, tren Témpér, se genera una base de datos para analizar toda la producción anual de la instalación e identificar y enmarcar el defecto.

Dada la gravedad del problema, como hemos podido observar en la evolución del rechazo en tanto por mil de toneladas producidas en la Figura 6.8, se debe enmarcar el tipo de defecto.

Parece evidente pensar en el tren Témpér como instalación origen del defecto dado que estamos hablando de un defecto superficial, un pliegue laminado.

En la figura, Figura 6.7, se puede observar un dibujo esquemático del tren témpér para una mejor comprensión e identificación de los elementos a tratar.

Atendiendo a las diferentes causas, particularidades del proceso y del defecto, se debe determinar y personalizar el defecto conociendo:

1. Los diferentes tipos de regulación del tren Témpér:

El tren Témpér tiene dos tipos de regulación, los denotados por simple reducción y doble reducción o también conocida por temple seco y temple húmedo. Los lazos de regulación así como la lubricación, preconfiguración del proceso y carga de la instalación son completamente diferentes. Es conveniente determinar en qué tipo de regulación se genera dicho defecto o si se produce en ambos casos.

2. Las diferentes etapas dentro de cada modelo de regulación:

Dentro de todos los tipos de regulación hay tres etapas bien diferenciadas que podríamos englobar en dos, parte dinámica y parte estable. La parte dinámica la conformarían la aceleración o arranque del proceso de temple y la deceleración o fin del temple de una bobina. Es en estas etapas donde la regulación está fijada a una preconfiguración de las

diferentes variables o dependiendo de las mismas a una regulación fija independiente de los valores de entrada al sistema de regulación. Entre ambas etapas existe otra etapa, parte estable, donde entra en juego la propia regulación activa en el proceso.

3. Situación del defecto en el ancho de la bobina.

Podemos encontrarnos con la aparición del defecto en todo el ancho de la bobina, en un solo extremo, en ambos extremos o en el centro de la misma. Dicho posicionamiento nos va a conducir a determinar o poder enmarcar que elementos van a tener mayor peso específico

4. Porcentaje y zona de la bobina afectada por el defecto.

5. Intensidad del defecto.

6. Tipo de material en el que se produce el defecto.

7. Defectos de calidad inherentes en la bobina que puedan influir a la generación del defecto a estudiar en el proceso de templado.

8. Factor humano.

9. Equilibrado, alineación de elementos mecánicos.

10. Elemento mecánicos del proceso que influyen en la aparición/ generación del defecto.

Dependiendo del tipo de regulación en el que aparezca el defecto hay elementos mecánicos que entran en juego o no y dependiendo de su degradación, punto en su vida útil, alineación, equilibrado y en definitiva su estado respecto a sus condiciones establecidas por el fabricante.

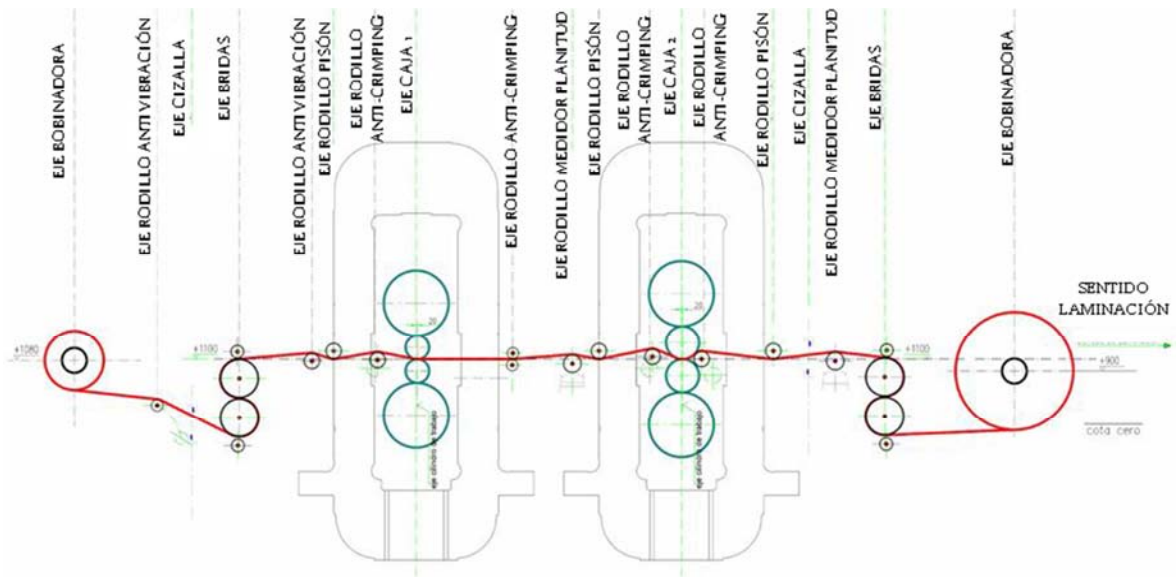


Figura 6.7 Figura esquemática de la configuración de un tren témpor

Los diferentes análisis y elementos críticos a controlar identificados son:

- Análisis por:
 - Número de bobinas afectadas
 - Tonelaje del defecto
 - Tipo de regulación del tren Témpor
 - Grado de alargamiento/ reducción
 - Tipo de acero
 - Ruta metalúrgica de la bobina/ especificación.
- Análisis anual de la producción del tren Témpor. Inicialmente se analiza el año anterior, 2008 para posteriormente, teniendo en cuenta el gráfico evolutivo del defecto, figura (página anterior) para sacar unas pautas, encuadre y relación causa-efecto del defecto.
- Elementos críticos:
 - Cilindros de trabajo
 - Cilindros de apoyo

- Elementos mecánicos con influencia en la alineación y equilibrado del tren Témpér
- Anti-crimping: Estudio de su posicionamiento vertical y horizontal y curvatura.
- Influencia de estos elementos sobre la configuración predeterminada en cada proceso de regulación del tren Témpér.
- Calidad y análisis económico:
 - Rechazo anual
 - Valoración económica
- Análisis de las diferentes variables que pueden afectar en la generación del defecto, peso específico:
 - Análisis estático
 - Análisis dinámico

6.4 EVOLUCIÓN Y ANÁLISIS HISTÓRICO DEL DEFECTO

La evolución del defecto, en tanto por mil toneladas producidas y por lo tanto su repercusión en la calidad/ rechazo interno de fábrica así como su peso específico sobre la producción de material de primera calidad y la pérdida económica, se puede denotar en el siguiente gráfico:

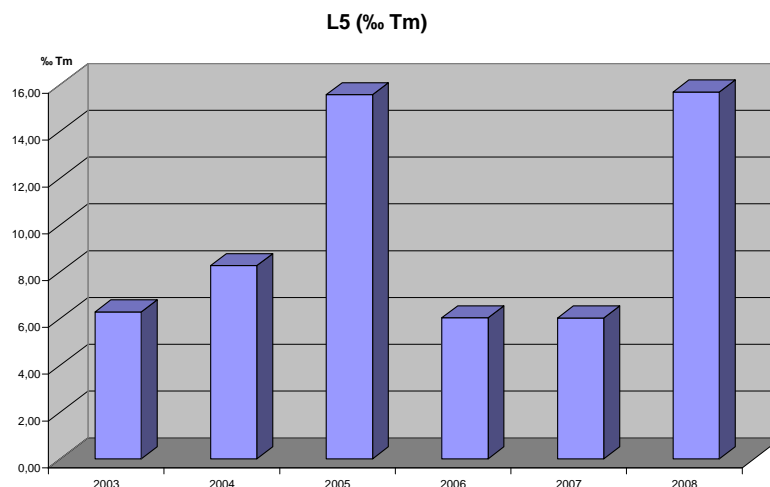


Figura 6.8 Evolución en tanto por mil de toneladas de la producción 2003-2008.

A la hora de analizar el defecto y poder establecer las variables, elementos mecánicos, humanos, regulaciones, modelos de respuesta y pesos específicos de cada uno se necesita una población inicial. Nos centramos en la evolución del defecto a lo largo del 2008.

Desde el punto de vista de ampliar el análisis, para refrendar los datos obtenidos en el análisis del año 2008 y poder determinar aquellas variables que influyen en la variación de la amplitud del defecto en los diferentes años de funcionamiento del proceso tren Témper (ver Figura 6.9) se toma toda la producción del tren Témper desde el 2006.

Se detallan comparativamente para cada año de producción:

- Producción de DR y SR.
- Producción de DR menor del 10% de reducción.
- Toneladas de producción templadas con DR y SR con defecto flor de skin-pass.
- Porcentaje de toneladas de DR y SR con defecto flor de skin-pass.
- Porcentaje de toneladas de DR con reducción menor del 10% con defecto flor de skin-pass.

6.4.1 ANÁLISIS DEL AÑO 2006

6.4.1.1 PRODUCCIÓN DE DR Y SR

La distribución a lo largo del año de la producción de doble reducción y simple reducción en el proceso témper es la siguiente:

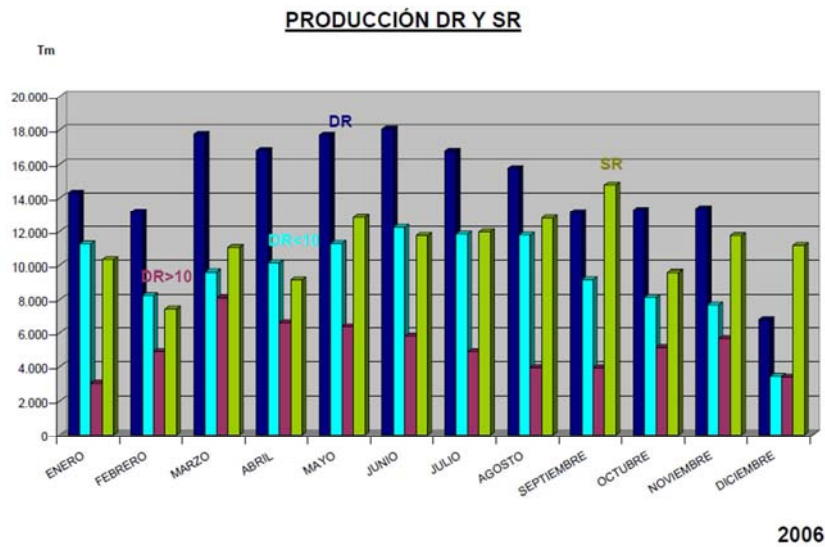


Figura 6.9 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2006.

6.4.1.1.1 PRODUCCIÓN DE DR MENOR DEL 10% REDUCCIÓN

Si se tiene solo en cuenta la producción de doble reducción menos del 10%:

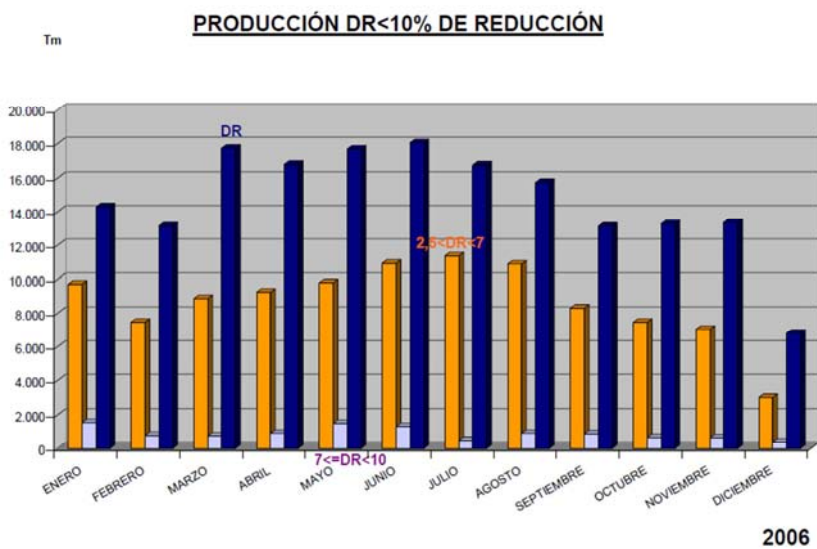


Figura 6.10 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2006

6.4.1.2 TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

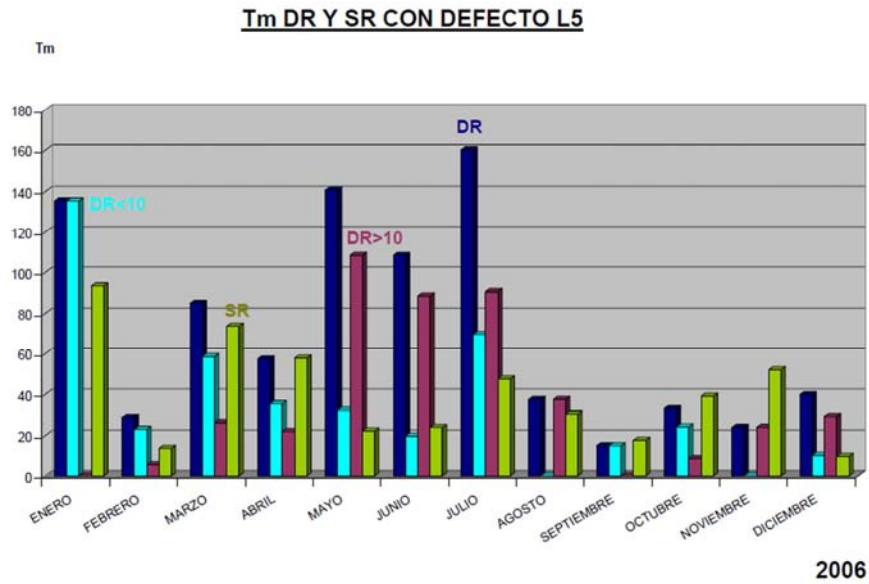


Figura 6.11 Toneladas producidas con defecto en 2006 en ambos tipos de reducción.

6.4.1.3 PORCENTAJE TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

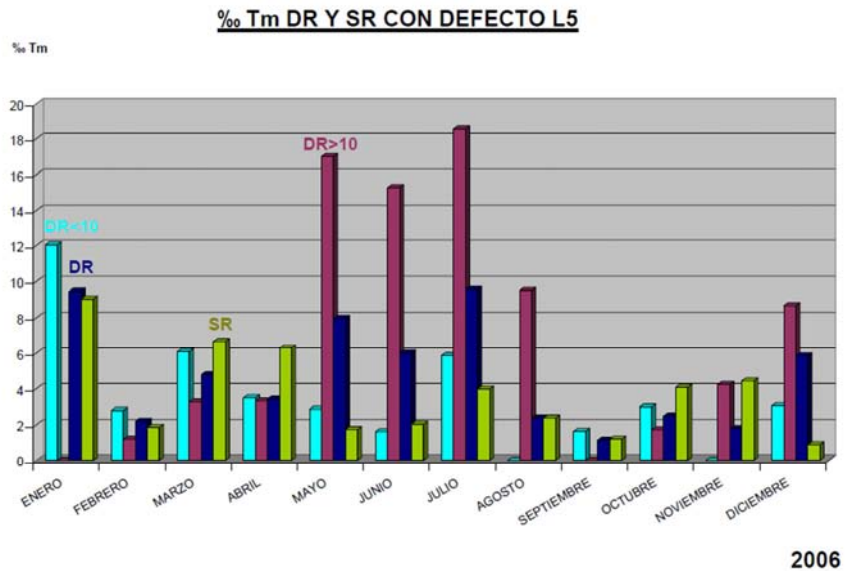


Figura 6.12 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2006.

6.4.1.3.1 PORCENTAJE TONELADAS DE DR MENOR DEL 10% REDUCCIÓN CON DEFECTO

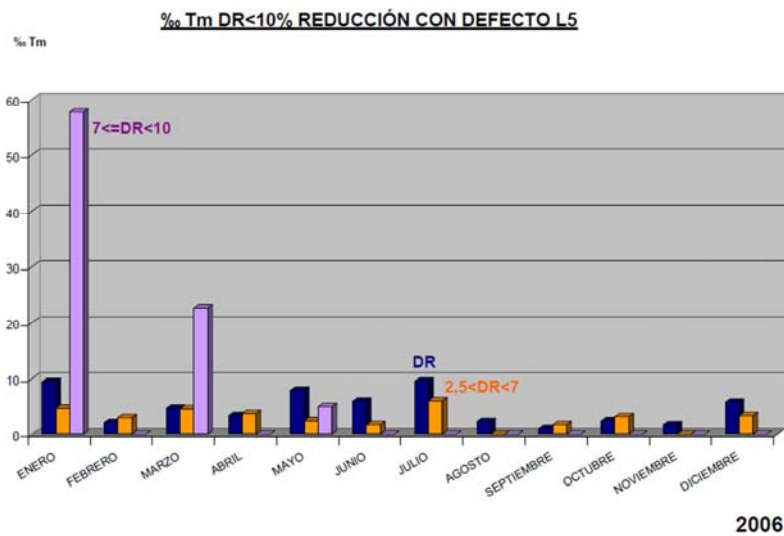


Figura 6.13 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2006.

6.4.2 ANÁLISIS DEL AÑO 2007

6.4.2.1 PRODUCCIÓN DE DR Y SR

La distribución a lo largo del año de la producción de doble reducción y simple reducción en el proceso témpor es la siguiente:

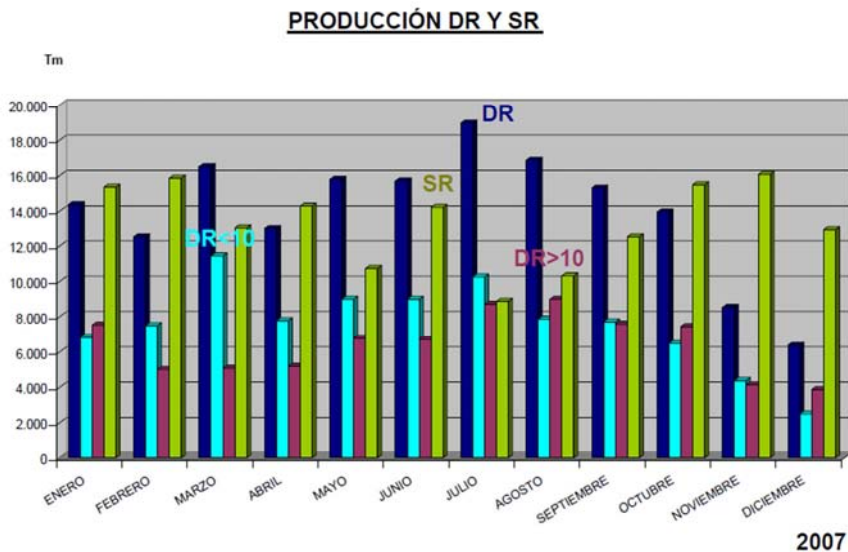


Figura 6.14 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2007.

6.4.2.2 PRODUCCIÓN DE DR MENOR DEL 10% REDUCCIÓN

Si se tiene solo en cuenta la producción de doble reducción menos del 10%:

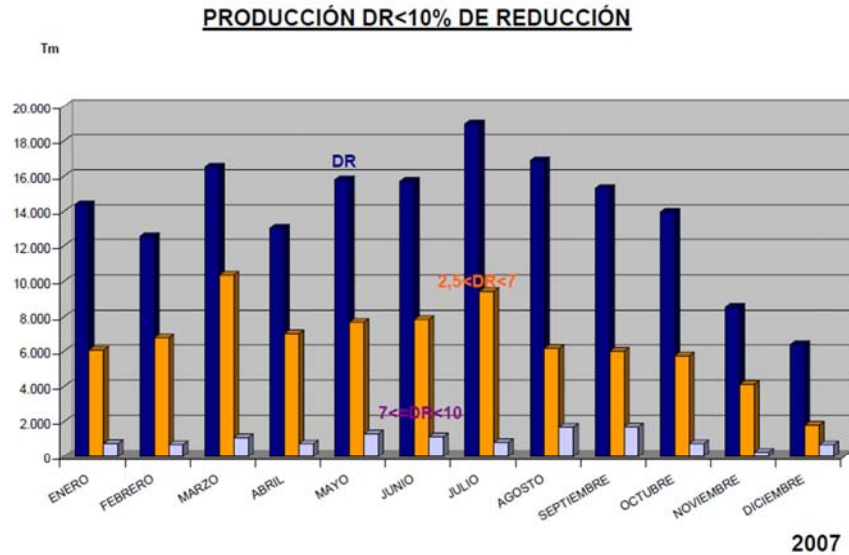


Figura 6.15 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2007

6.4.2.3 PORCENTAJE TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

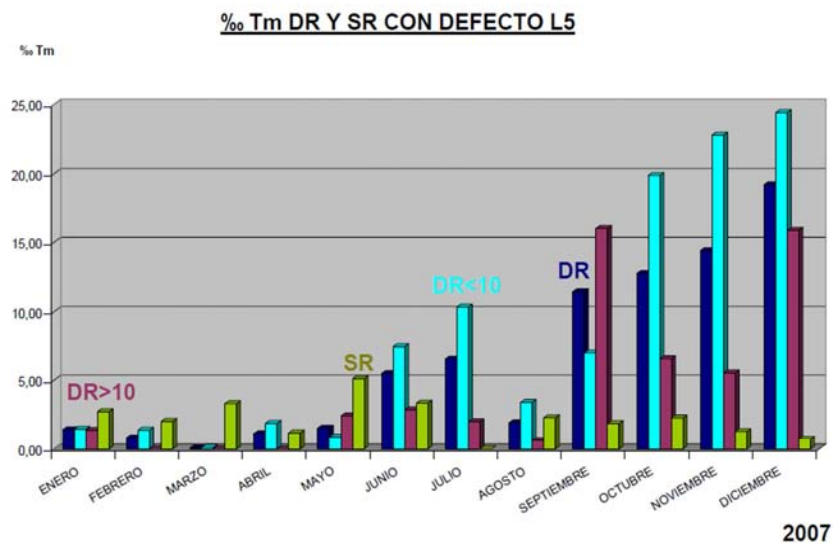


Figura 6.16 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2007

6.4.2.4 TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

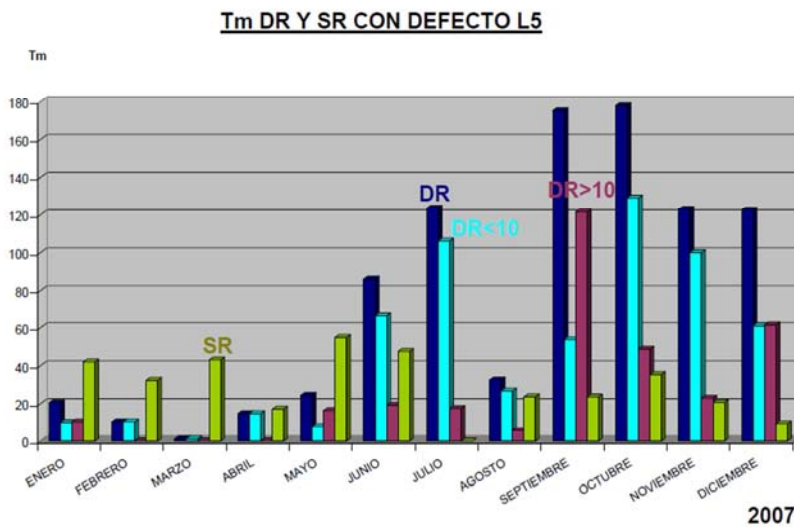


Figura 6.17 Toneladas producidas con defecto en 2007 en ambos tipos de reducción.

6.4.2.5 PORCENTAJE TONELADAS DE DR MENOR DEL 10% REDUCCIÓN CON DEFECTO

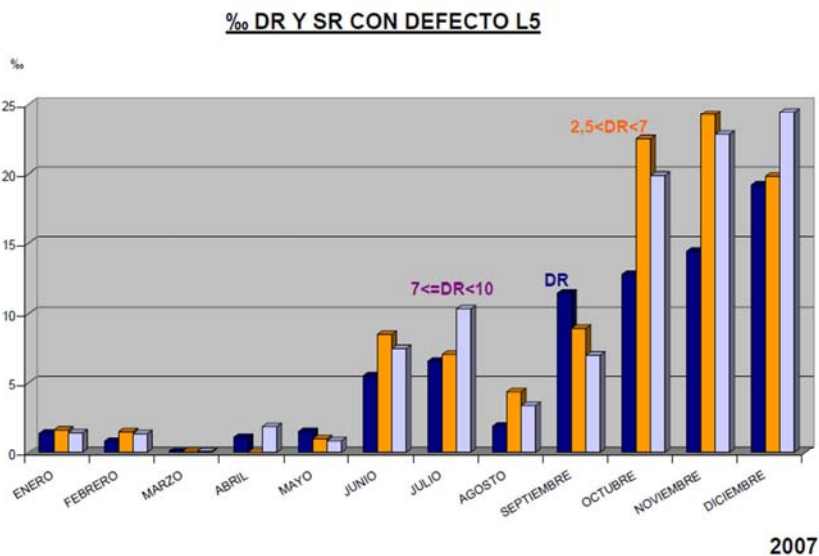


Figura 6.18 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2007.

6.4.3 ANÁLISIS DEL AÑO 2008

6.4.3.1 PRODUCCIÓN DE DR Y SR

La distribución a lo largo del año de la producción de doble reducción y simple reducción es la siguiente Figura 6.19.

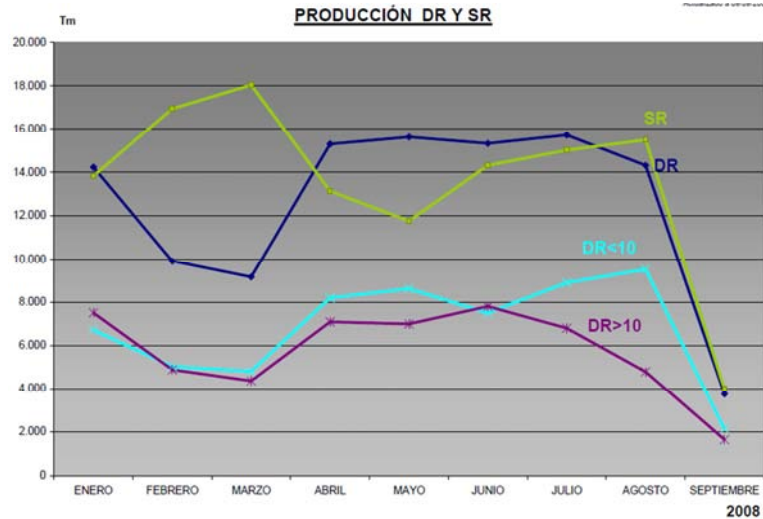


Figura 6.19 Toneladas producidas según los dos tipos de reducción en 2008.

6.4.3.2 PRODUCCIÓN DE DR MENOR DEL 10% REDUCCIÓN

Si se tiene solo en cuenta la producción de doble reducción menos del 10%:

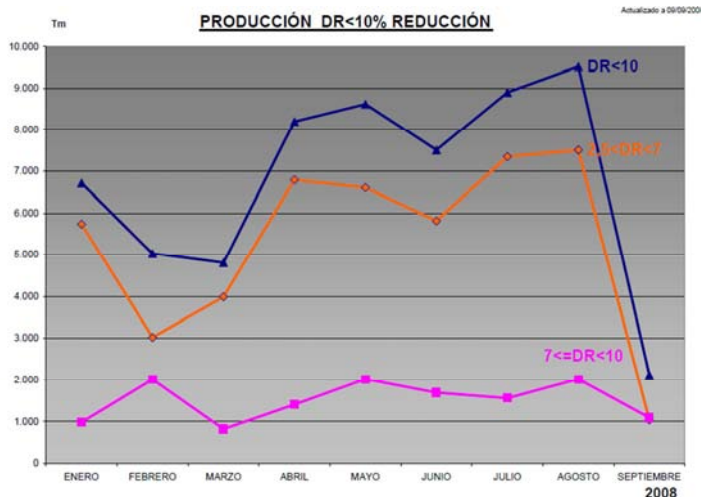


Figura 6.20 Producción de material de reducción inferior al 10% en 2008

6.4.3.3 TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

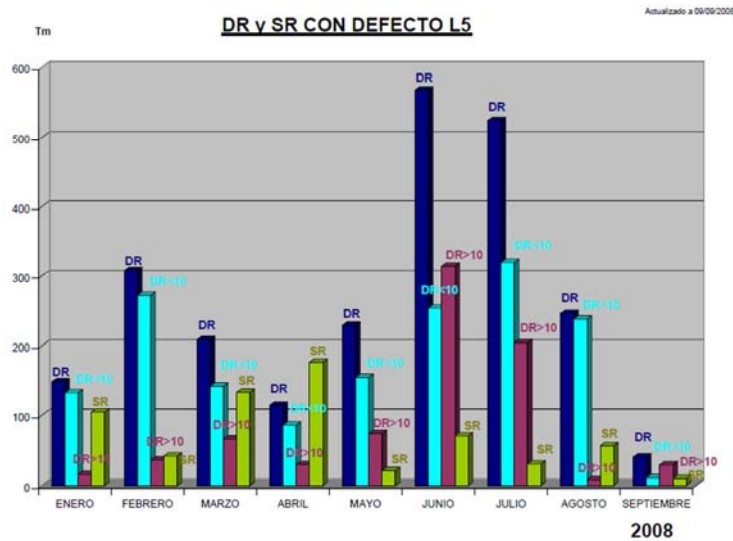


Figura 6.21 Toneladas producidas con defecto en 2008 en ambos tipos de reducción.

6.4.3.4 PORCENTAJE TONELADAS DE DR Y SR CON DEFECTO

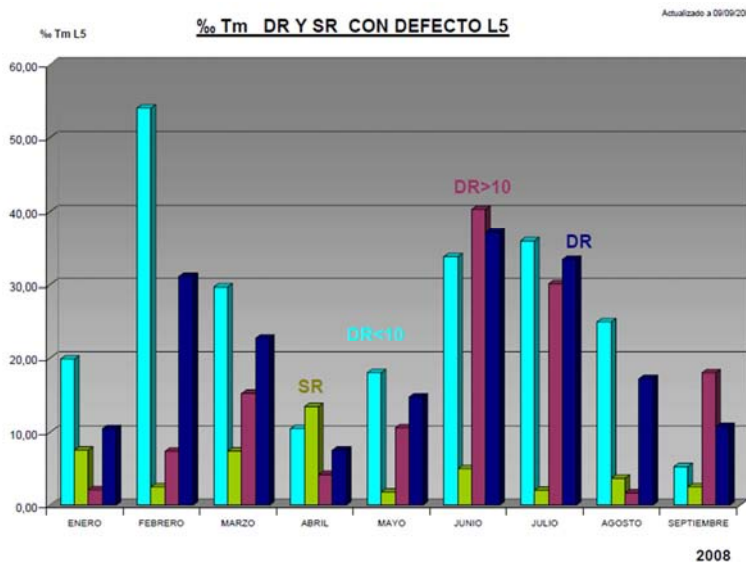


Figura 6.22 Tanto por mil de toneladas con defecto en ambos tipos de reducción en 2008

6.4.3.5 PORCENTAJE TONELADAS DE DR MENOR DEL 10% CON DEFECTO

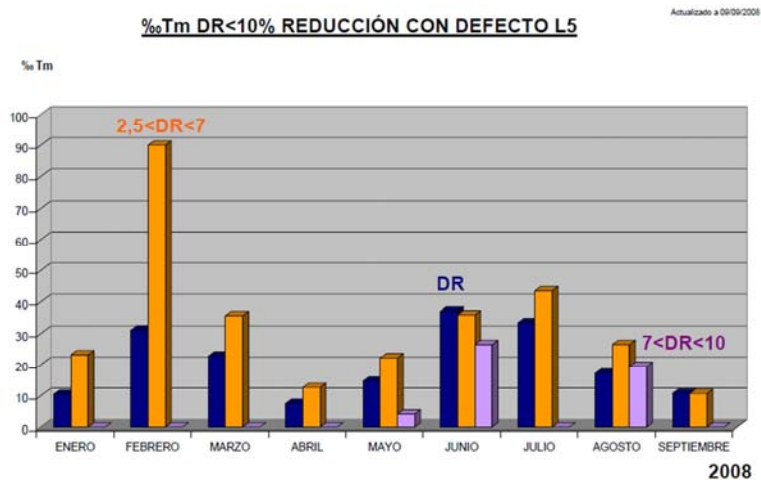


Figura 6.23 Tanto por mil de toneladas con defecto en reducción de menos del 10% en 2008.

6.4.4 ANÁLISIS DEL AÑO 2008

Los puntos a tratar son:

- Evolución y análisis del defecto a lo largo del año 2008.
- Generación de una base de datos.
- Obtención y análisis de muestras del defecto.

De acuerdo con la base de datos, de todas las bobinas templadas, y completada con los informes de Bobinas Retenidas, Defectos de las Instalaciones de Acabado y Partes de Producción de los trenes de reducción y skin-pass, se obtienen los siguientes índices:

Para la obtención de los diferentes índices se ha realizado un estudio paralelo del defecto de pliegue (L5) atendiendo a dos criterios:

- Número de bobinas templadas en el tren 6.
- Toneladas del defecto.

Ambos estudios se han realizado en tanto por mil, con el fin de poder estandarizar tanto la producción como el número de bobinas laminadas en cada

mes. Esta forma nos permite independizar la variación del mix del producto para el estudio.

A diferencia con respecto al estudio realizado a la base de datos anterior, es la eliminación de bobinas retenidas después de las líneas de estañado, dado que introducía un gran ruido al estudio y correspondían, en su mayoría, a bobinas de temple húmedo con defecto por borde ondulado. Lo cual no corresponde al defecto que estamos estudiando.

La evolución del defecto a lo largo del año 2008 es el dado por la Figura 6.24 y Figura 6.25, de acuerdo a los criterios de número de bobinas y toneladas de defecto. En la Figura 6.24 se representa el tanto por mil de número de bobinas con defecto en los dos tipos de reducción (2008).

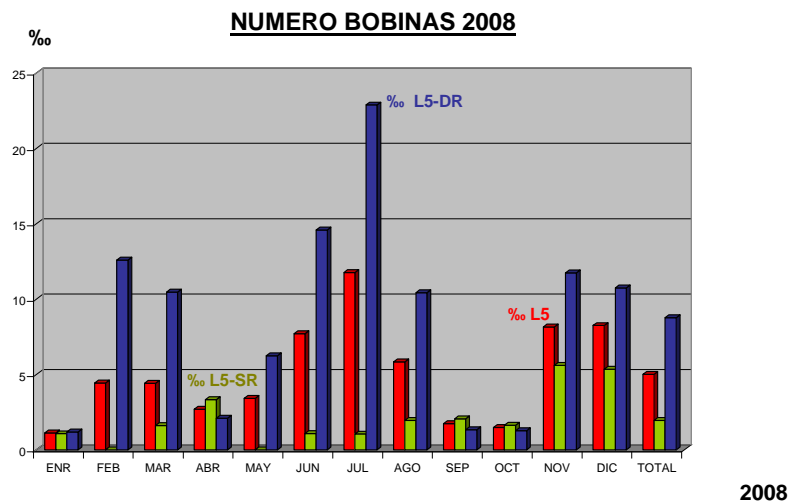


Figura 6.24 Bobinas con defecto en los dos tipos de reducción (2008)

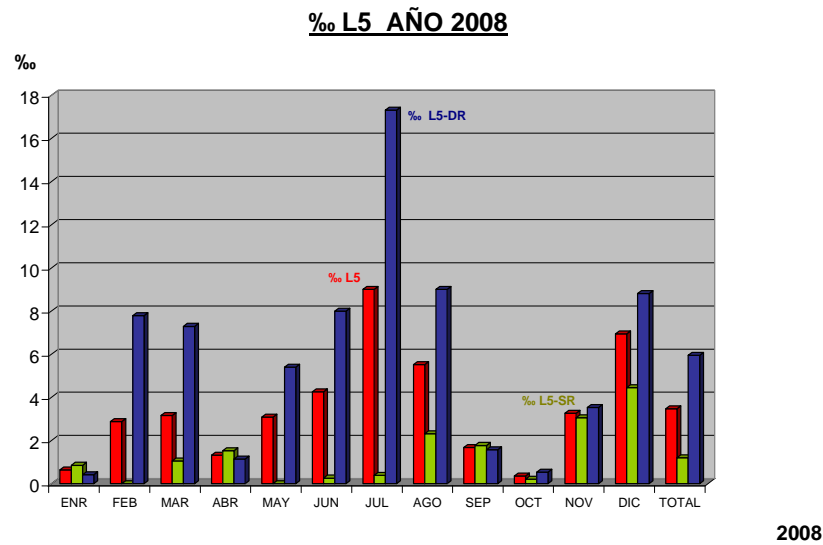


Figura 6.25 Toneladas de defecto en los dos tipos de reducción (2008)

Si nos centramos en el defecto propio, denominado L5, es decir, pliegue laminado en DR, la evolución del defecto a lo largo del año 2008 es el dado por la Figura 6.26 y Figura 6.27. En la Figura 6.26 se representa el Tanto por mil de número de bobinas con defecto en las 3 etapas de Doble Reducción y en la Figura 6.27 se representa el tanto por mil de toneladas de defecto en las tres etapas de reducción de la Doble Reducción.

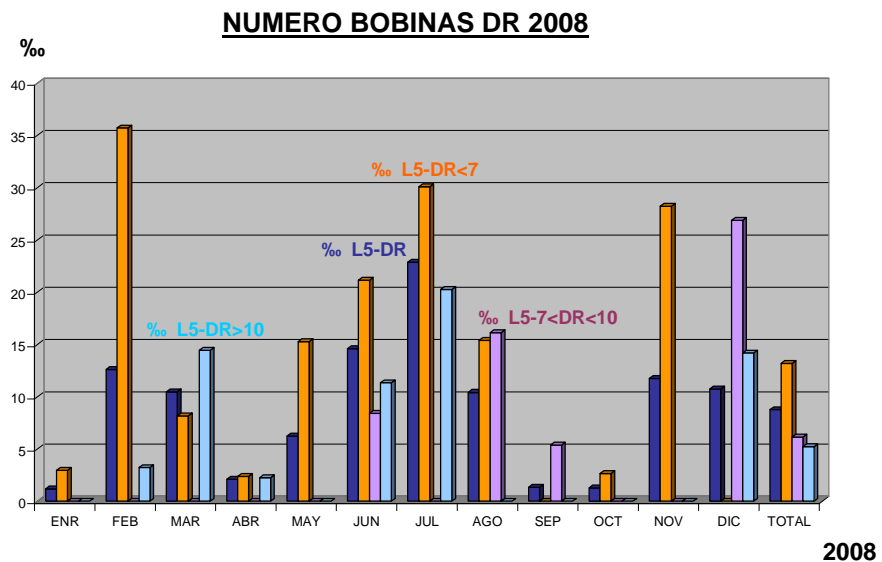


Figura 6.26 Bobinas con defecto en las 3 etapas de Doble Reducción (2008)

Según las toneladas del defecto en DR:

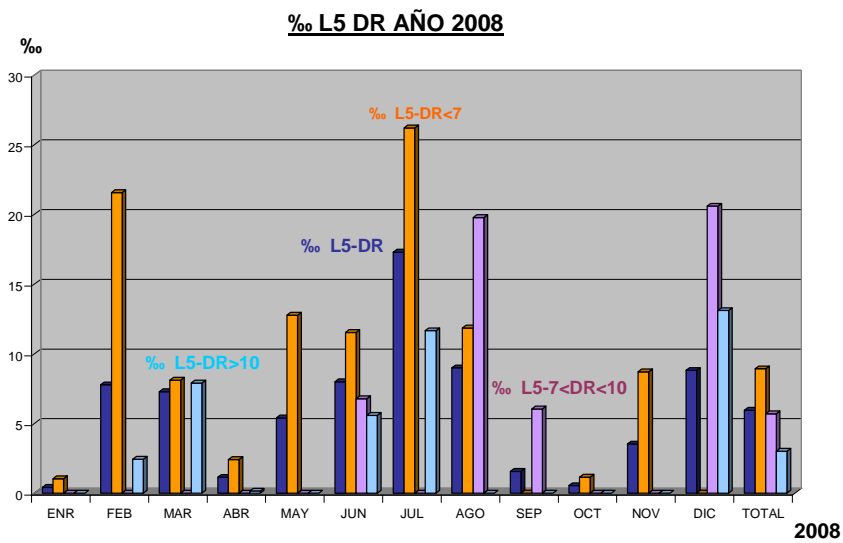


Figura 6.27 Toneladas de defecto en las 3 etapas de Doble Reducción (2008)

Tanto atendiendo al estudio con uno y otro criterio, número de bobinas y toneladas de defecto, la evolución del defecto es pareja. El número de veces que se repite o produce el defecto en el tren 6 sigue la misma evolución que las toneladas de defecto L5.

Se puede destacar, a partir de los gráficos mostrados, que es en la doble reducción de menos del 10% donde se centra el defecto. Y más en concreto en la de menos del 7% salvo las dos puntas de agosto y diciembre.

Hay varios meses donde el número de bobinas con defecto aumenta respecto al resto del año, como puede apreciarse en la Figura 6.28.

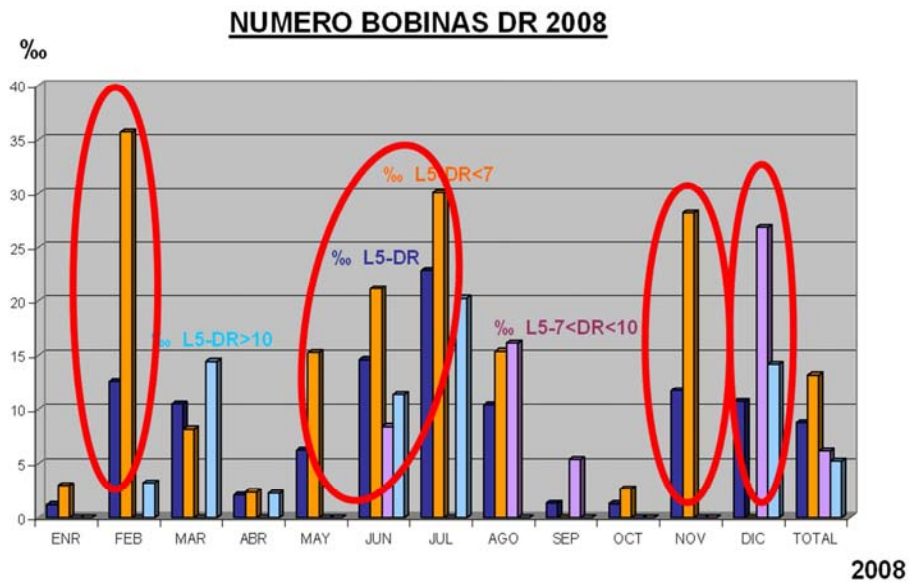


Figura 6.28 Meses con mayor número de bobinas con defecto (2008)

En la Tabla 6-1 se muestran las toneladas de L5 y el número de bobinas de cada mes de 2008 clasificadas dependiendo del tipo de reducción realizado:

Tabla 6-1 Toneladas de L5 y el número de bobinas año 2008

MES	L5		L5-DR		L5-DR<7		L5-7<DR<10		L5-DR>10	
	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS
ENR	17,82	2	5,95	1	5,95	1	0,00	0	0,00	0
FEB	77,13	8	77,13	8	65,20	7	0,00	0	11,93	1
MAR	85,78	8	66,85	6	32,37	2	0,00	0	34,48	4
ABR	37,51	5	17,50	2	16,42	1	0,00	0	1,08	1
MAY	84,39	6	84,39	6	84,39	6	0,00	0	0,00	0
JUN	123,43	14	119,80	13	66,20	7	11,42	1	42,19	5
JUL	274,53	22	268,77	21	190,57	13	0,00	0	78,21	8
AGO	163,11	11	127,44	9	88,27	7	39,17	2	0,00	0
SEP	43,26	3	18,68	1	0,00	0	18,68	1	0,00	0
OCT	10,54	3	6,95	1	6,95	1	0,00	0	0,00	0
NOV	91,04	15	44,14	9	44,14	9	0,00	0	0,00	0
DIC	135,49	10	98,30	7	0,00	0	66,80	5	31,50	2
TOTAL	1.144,02	107	935,90	84	600,45	54	136,07	9	199,37	21

Si graficamos la Tabla 6-1, obtenemos la Figura 6.29 y Figura 6.30 donde se aprecia la evolución de toneladas del defecto a lo largo del 2008 dentro de la Doble reducción y el número de bobinas.

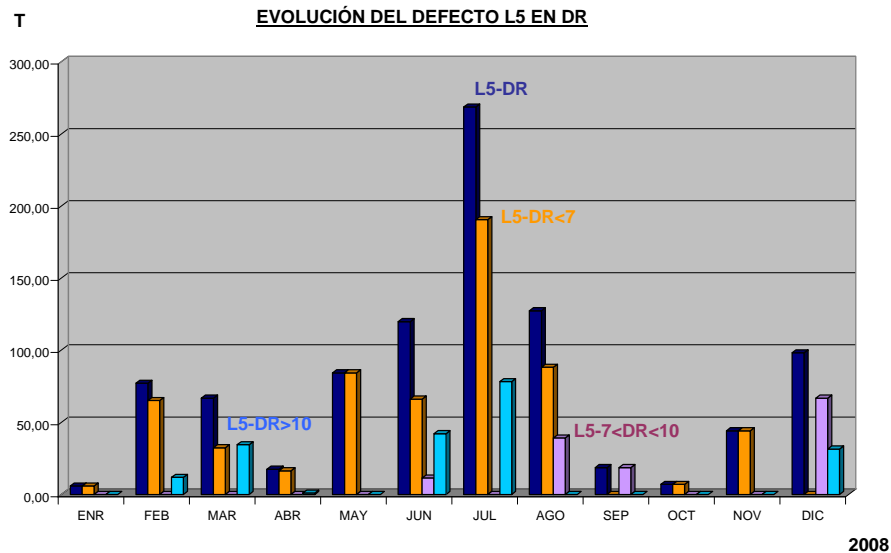


Figura 6.29 Toneladas del defecto dentro de la Doble Reducción (2008)

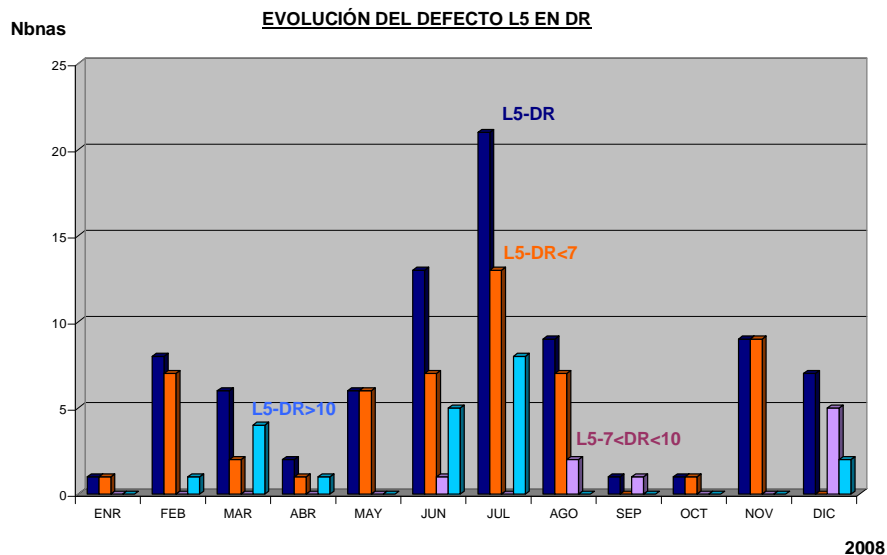


Figura 6.30 Bobinas defecto dentro de la Doble Reducción (2008).

Si atendemos al tipo de producto laminado por los trenes de reducción: Hojalata, Cromada y Chapa preparada; la distribución del defecto L5 para cada tren reversible. La Figura 6.31 representa la distribución de las toneladas de

defecto por los dos trenes Tándem y por los tres tipos de producto diferenciado fabricado a lo largo del año 2008.

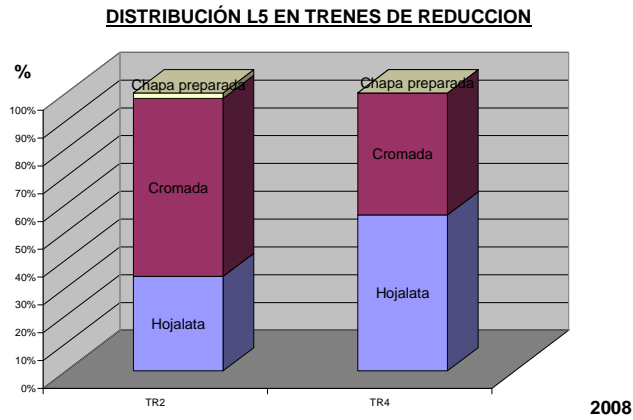


Figura 6.31 Toneladas de defecto por dos proveedores tándem (2008).

Esta distribución del defecto para los dos trenes reversibles está totalmente relacionada con la producción de los mismos. No se puede decir que hay un tipo específico de producto (Hojalata, chapa preparada o cromada) donde esté más centrado el defecto.

A la hora de analizar igualmente las interrelaciones entre las diferentes variables, se suma el origen del material de bobina tandemizada. En el caso estudiado hay dos fuentes, la planta A y la planta B, siendo esta última donde se está generando el defecto en el tren témpor.

Realizando un estudio del número de bobinas que vienen laminadas de los trenes Tándem de la planta B a lo largo del 2008, obtenemos la Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Bobinas laminadas trenes Tándem de la planta B (2008)

Bobinas de Avilés		SR	DR	DR<7	7<DR<10	DR>10	TOTAL
PRODUCCIÓN		665	520	42	7	471	1.185
L5	Bobinas frías	2					2
	Bultos	4				2	6
TOTAL		6				2	8

Con lo que un 0,38% de las bobinas de DR tienen L5 (2 bobinas de 520). Se observa, no obstante que aproximadamente un 10% de las bobinas laminadas de Avilés son de una reducción menor al 10%, que es donde se centra el defecto L5 en la planta A, con lo que no es población suficiente como para afianzar un criterio, aunque si puede ser tomado como una referencia.

Partiendo de la base de datos, el número de bobinas con defecto L5 provenientes de Recocido Base ha sido un número despreciable como se aprecia en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Bobinas con defecto L5 provenientes de Recocido Base

RB	L5		L5-DR		L5-DR<7		L5-7<DR<10		L5-DR>10	
	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS	(T)	Nº BNAS
TOTAL	14.07	4	0.01	1	6.99	1	0,00	0	0,00	0

Respecto al criterio de número de bobinas templadas por el tren 6 y realizando únicamente un estudio de las bobinas frías y por lo tanto excluyendo los bultos, la evolución y porcentaje del defecto a lo largo del 2008 es recogido en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Evolución del defecto bobinas templadas (2008)

		SR	DR	DR<7	7<DR<10	DR>10	TOTAL
PRODUCCION T6 (Bobinas)		11.762	9.586	4.098	1.463	4.025	21.348
L5	Bobinas frías	22	83	53	9	21	105
	%L5		0,87%	1,29%	0,62%	0,52%	0,49%

La sección máxima, media y mínima de la chapa con defecto es la representada en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5 La sección máxima, media y mínima de la chapa con defecto

Sección	T6-L5	DR-L5	2,5<DR<10	DR>=10	SR-L5
MAX	634	345	345	328	289
MEDIA	444	242	245	235	202
MIN	148	148	156	148	150

Para la doble reducción comprendida entre el 2,5% y 7% el análisis de aparición de defecto respecto a la producción total, perfil de banda, zona de la bobina de aparición del defecto y periodo del año es el siguiente:

Tabla 6-6 Análisis experimental del defecto en planta en 2008.

Periodo	%L5 bobinas		Acero 49			1er Tercio	2º Tercio	3er Tercio	Drcho	Izqdo
	vs. Prod. total	vs. L5 total	0.17-0.2 x 800-900	0.2-0.25 x 900-1000	0.25-0.32 x 900-1000					
ener-sept 08	4,0	44,0	11,0	4,3	5,6					
ener-abril 08	4,7	48,0	17,0	2,4	2,4	55,0%	7,5%	37,5%	68,9%	31,0%
mayo-sept 08	3,6	42,5	3,0	5,6	7,0	20,0%	17,1%	62,8%	80,0%	20,0%

6.4.4.1.1 SECCIÓN DEL DEFECTO

En la Tabla 6-6 se muestra uno de los análisis empíricos realizados a lo largo del año 2008 donde algunos de los criterios establecidos de control eran zona de aparición del defecto dentro de la bobina, perfil de banda, periodo del año relacionándolo con el mix de producción del mismo.

A lo largo de diferentes análisis se ve como no hay una sección tipo marcada de aparición del defecto por encima de las otras, al igual que ninguna relación entre las diferentes variables estudiadas y la zona de aparición del defecto.

6.4.4.1.2 DIFERENTES PRUEBAS REALIZADAS EN PLANTA

A lo largo de los diferentes años de análisis del defecto se hicieron varias pruebas experimentales para comprobar y corregir el modelo matemático que veremos más en detalle en el punto siete. Algunas de estas pruebas se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6-7 Análisis experimental con cilindros de trabajo texturados

Prueba: El 10 de julio se incorporan los cilindros de trabajo texturados en C1 con flecha de 0,12 mm (antes 0,16 mm) y de 1,3 μ .

	01/ENERO – 12/AGOSTO			13/AGOSTO – 09/SEPTIEMBRE		
	PROD.	%o	Tm	PROD.	%o	Tm
TOTAL	167.524,23	14,73	2.467,29	60.897,95	15,11	920,43
DR-L5	79.525,78	23,90	1.900,36	29.970,10	25,88	775,93
2,5<DR<7	31.969,33	35,87	1.146,67	14.680,59	39,72	583,08
7<=DR<10	8.914,21	5,95	53,06	4.654,01	16,83	78,34
2,5<DR<10	40.883,54	29,34	1.199,73	19.334,59	34,21	661,42
DR>=10	38.642,24	18,13	700,63	10.644,51	10,76	114,51
SR-L5	87.981,55	6,44	566,93	30.918,85	4,67	144,50

Tabla 6-8 Análisis experimental con rodillo A.C.

Prueba: El 13 de agosto nuevos rodillo anti-creasing de 5,5 μ de rugosidad, cromados y flecha 1 mm.

	01/ENERO – 12/AGOSTO			13/AGOSTO – 09/SEPTIEMBRE		
	PROD.	%o	Tm	PROD.	%o	Tm
TOTAL	209.541,64	13,26	2.780,82	26.117,02	9,73	254,23
DR-L5	100.524,75	21,57	2.178,81	12.764,17	16,53	211,05
2,5<DR<7	41.137,84	32,72	1.345,92	6.720,18	25,86	173,81
7<=DR<10	11.655,23	7,91	92,93	1.921,49	0,00	0,00
2,5<DR<10	52.793,07	27,24	1.438,15	8.641,67	20,11	173,81
DR>=10	47.731,69	15,52	740,66	4.122,50	9,03	37,24
SR-L5	109.099,99	5,52	602,01	13.352,80	3,23	43,18

Tabla 6-9 Varias pruebas experimentales 2006-2008 en el tren témpor

		2008.jan-sept.	2.5 <DR <7	7< DR < 10	DR > 10	SR
%prod			20	6	20	54
%L5			44	4	26	25
< mai			48	0	5	17,5
thickness	width	%occurrence				%occurrence
0.17-0.2	800-900	35 vs 15				45 vs 19
0.2-0.25	900-1000	31 vs 21				40 vs 21
		70% MS				70% MS
		T1 - T3				T1-T3
> mai			42,5	4	21	7,5
		%occurrence			%occurrence	%occurrence
0.17-0.2	800-900					41 vs 20
0.2-0.25	900-1000	38 vs 24				
0.25-0.32	900-1000	16 vs 5				
>0.32	900-1000			32 vs 14 (<15)		
		80% MS		90% MS		50%MS
		T1-T2-T3		T1-T2-T3		T1-T2-T3

A lo visto a lo largo del capítulo anterior quedan descartados los siguientes elementos mecánicos que se había observado que podían tener una posible influencia sobre la generación del defecto.

Una vez revisadas y analizadas todas sus posibles influencias y estado de las diferentes elementos no se ve influencia, por lo que el único elemento de posible influencia es el rodillo anti-crimping.

6.5 INTERACCIÓN ENTRE EL RODILLO ANTI-CRIMPING Y LA PLANITUD DE LA BANDA EN EL TEMPERIZADO

Los objetivos de este análisis es el de poder comprender mejor, a través de simulaciones numéricas, el peso específico e influencia del rodillo anti-crimping sobre la planitud de la banda y la formación de pliegues en el tren témpor para:

- Determinar la eficiencia real del rodillo anti-crimping
- Definir la mejor práctica para el uso del rodillo anti-crimping
- Definir las modificaciones relevantes en la línea de paso para un tren témpor

Después de analizar el estado, desalineamiento, desgaste, consistencia y rigidez de anclaje, configuración, mantenimiento y su influencia sobre la generación del defecto de todos los elementos mecánicos, nos queda por estudiar el rodillo anti-crimping. Como consecuencia, es muy importante conocer y entender la causa de generación de arrugas y pliegues en la banda y la influencia de la generación de los mismos del rodillo anti-crimping, su influencia sobre la planitud.

Se ha desarrollado un modelo numérico a partir del software Abaqus para estudiar la influencia del rodillo anti-crimping en el tren témpor. Se han ido realizando diferentes pruebas en el proceso industrial, que a continuación se detallan tanto en su análisis estático, como dinámico, contrastando y realimentando el propio modelo numérico.

Si el rodillo anti-crimping se utiliza de una manera inadecuada o no se utiliza, no hay una correcta distancia entre el rodillo y el entrehierro y no hay una posición vertical correcta, tendremos problemas de calidad (defectos de planitud y espesor). Véanse figuras, Figura 6.24 y Figura 6.25.

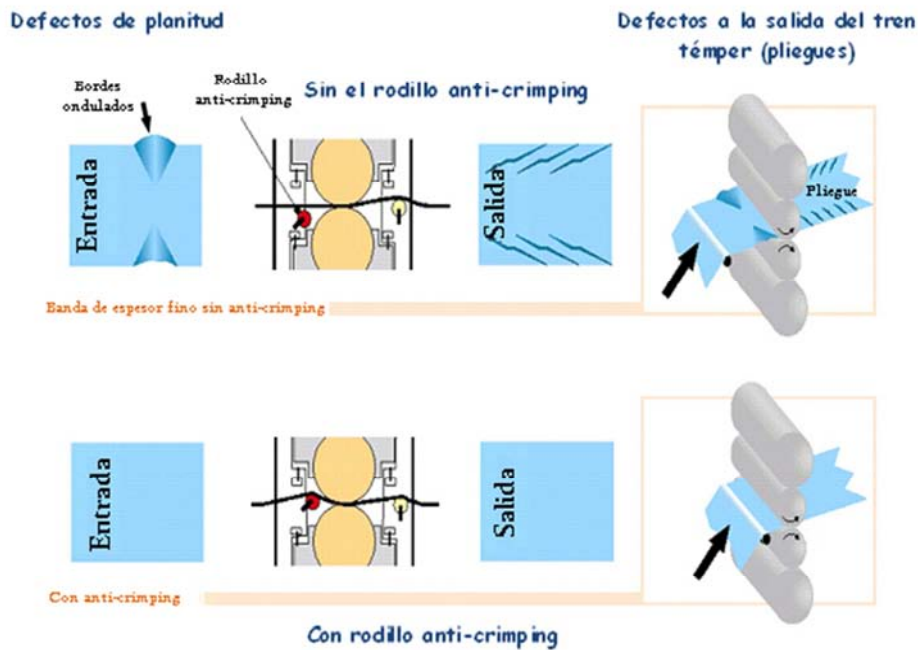


Figura 6.32 Efecto del rodillo anti-crimping en un tren témpor.

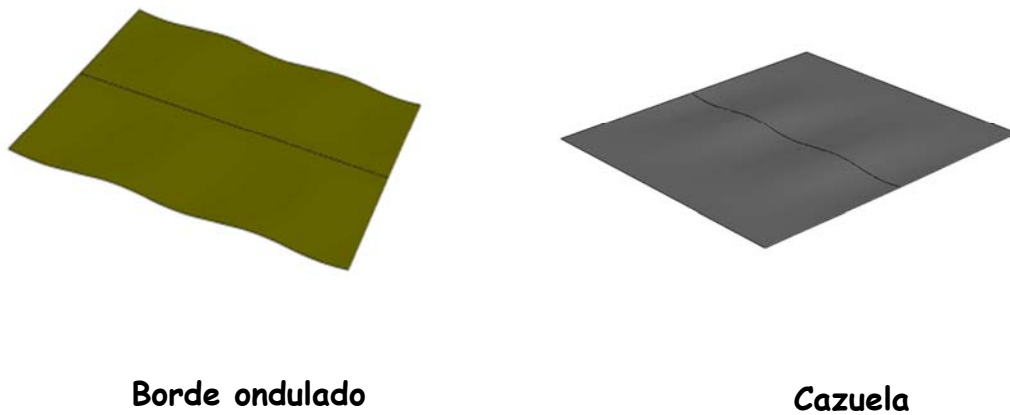


Figura 6.33 Posibles defectos de calidad a la entrada de un tren témpor.

El estudio se centra en identificar los parámetros de proceso clave del rodillo anti-crimping, su distancia al entrehierro, su posición vertical, su perfil de curvatura (con o sin corona) para minimizar los defectos de planitud y el riesgo de generación de pliegues.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DEL DEFECTO

7 METODOLOGÍA

7.1 PLAN DE INVESTIGACIÓN

El plan de investigación, para la consecución de los objetivos de esta tesis, está constituido por cuatro etapas:

- Análisis empírico basado en modelos matemáticos convencionales optimizados:

En esta etapa se realiza un análisis tanto estático como dinámico del rodillo anti-crimping del proceso témpor llegando a un modelo matemático del proceso que simula la generación del defecto superficial de pliegue.

- Pruebas experimentales en planta:

Como ya se indicó al final del punto seis, se compararon las alternativas de control y comportamiento del proceso tanto de forma teórica, a través del modelo matemático como de forma experimental en planta, corrigiendo y alimentando el propio modelo.

- Análisis mediante minería de datos e inteligencia artificial:

El empleo de estas nuevas técnicas basadas en inteligencia artificial nos va a permitir validar los resultados obtenidos por métodos empíricos y mejorar el nivel de precisión del modelo.

- Documentación:

A la vista de los resultados de las etapas anteriores, se derivan las conclusiones parciales y globales de esta tesis y los futuros trabajos y líneas de actuación que emergen, en las que se considera muy adecuado profundizar.

7.2 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

En la figura siguiente, Figura 7.1, se puede observar la configuración de la entrada de un tren témper con las indicaciones de distancias más relevantes y cuya influencia se van analiza, Tabla 7-1.

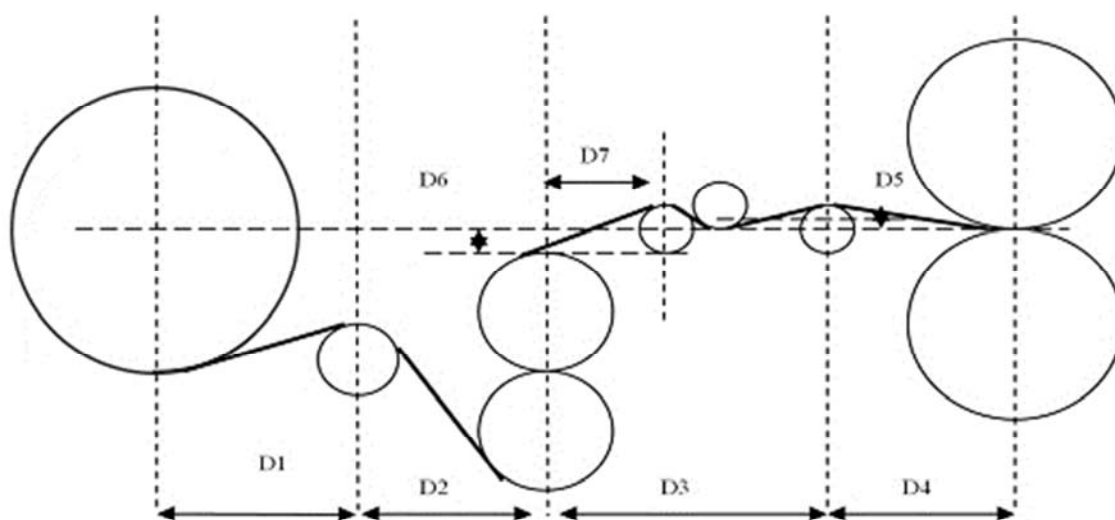


Figura 7.1 Esquema representativo de la entrada de un tren témper.

La configuración de distancias del rodillo anti-crimping del tren témpor donde se produce el defecto flor de skin-pass es la siguiente:

- Distancia entre ejes del rodillo anti-crimping y apoyos. $D4 = 676\text{mm}$
- Posición vertical del rodillo anti-crimping, respecto a la línea de paso. $D5 = 150\text{mm}$
- Las condiciones de simulación utilizadas son las siguientes:
- Espesor de la banda = $0,27\text{mm}$
- Ancho = 1.000mm
- Desplazamiento vertical del rodillo anti-crimping: De 100mm a 350mm
- Tensión nominal de la banda = $50\text{MPa} = 5 \text{ Kg/mm}^2$
- Diámetro del rodillo anti-crimping = 275mm
- Distancia entre los ejes del rodillo anti-crimping y de los apoyos = 676mm
- Perfil de curvatura del rodillo anti-crimping, corona = 0mm

Si tenemos en cuenta las variables utilizadas en la figura, Figura 7.1:

Tabla 7-1 Configuración de distancias del rodillo anti-crimping.

Configuración de distancias	
D1	1.400mm
D2	1.400mm
D3	2.324mm
D4	676mm
D5	150mm
D6	Diámetro de la Brida
D7	1.230mm

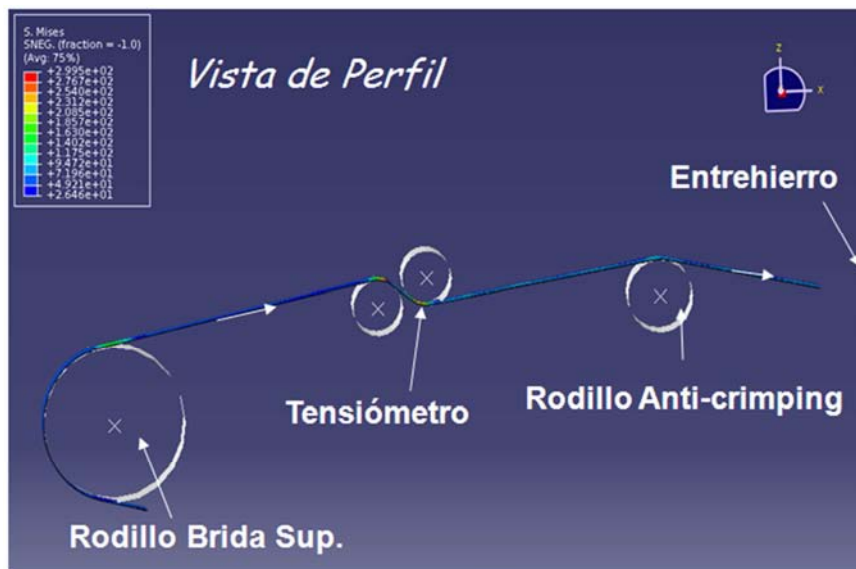


Figura 7.2 Vista de perfil parcial de la entrada del tren témpor.

En la siguiente figura, Figura 7.3, podemos observar la disposición de la entrada del tren témpor donde la banda está en contacto entre la brida superior y el rodillo anti-crimping. Entre medias se ve en la parte inferior el rodillo tensiómetro y en la parte superior se encuentra un rodillo que permite que haya un mínimo de tensión, referencia (presión vertical) para medir la tensión de la banda a la entrada de caja 1.

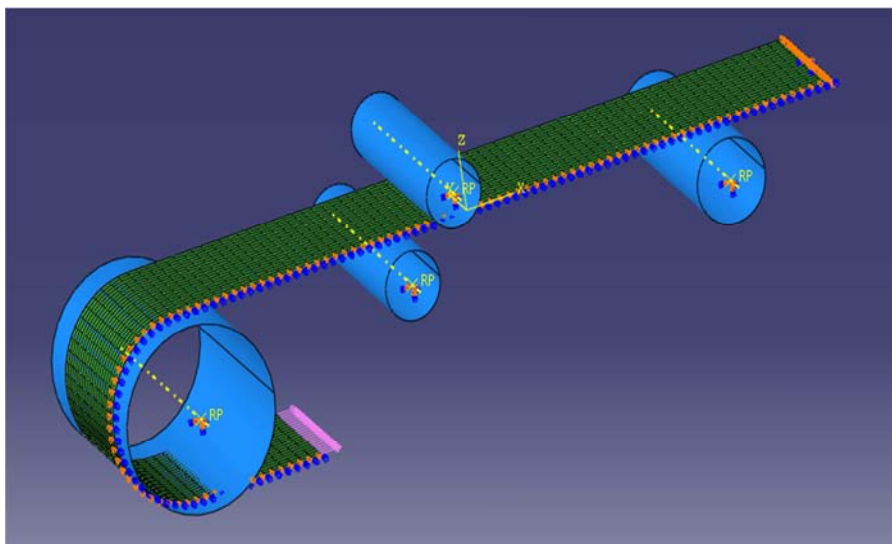


Figura 7.3 Vista parcial en 3D de la entrada del tren témpor.

Atendiendo a estas condiciones de simulación y a la configuración de la entrada del tren témpér, Figura 7.1, se estudia la influencia de la configuración del rodillo anti-crimping desde el punto de vista estático y dinámico.

Es necesario hacer este doble análisis debido a las diferentes variables estáticas vs dinámicas, regulación del tren, configuración de arranque y fin de temperizado de bobina e interrelación entre las mismas que hacen que el comportamiento del tren témpér sobre la banda sea completamente diferente.

Igualmente es necesario hacer un análisis estático previo para establecer las condiciones iniciales para el análisis dinámico.

7.3 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL EFECTO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING EN UN TREN TÉMPER

Durante el análisis estático la banda no se mueve.

Vamos a considerar que la banda viene con un defecto de calidad, borde ondulado con las siguientes características:

- Amplitud del defecto = 3mm o 1mm
- Periodo de 300mm
- Penetración en el ancho de la banda = 125mm o 250mm

En las figuras mostradas a continuación, Figura 7.4 y Figura 7.5, se muestra la disposición de entrada del tren témpér (vista desde brida superior hasta el entrehierro) así como la caracterización del defecto considerado para el análisis, borde ondulado.

El borde ondulado genera menor tensión en los bordes y mayor tensión en el centro.

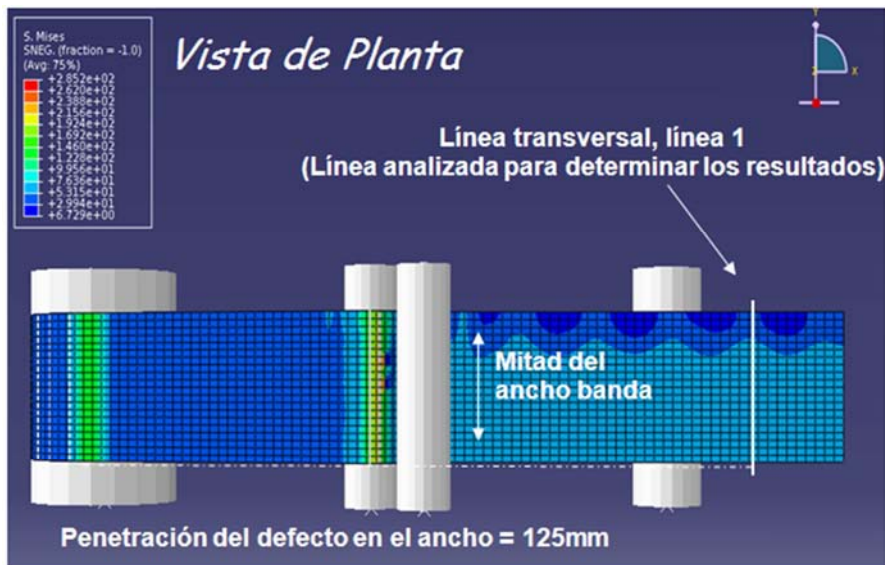


Figura 7.4 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Banda con borde ondulado con profundidad de 125mm.

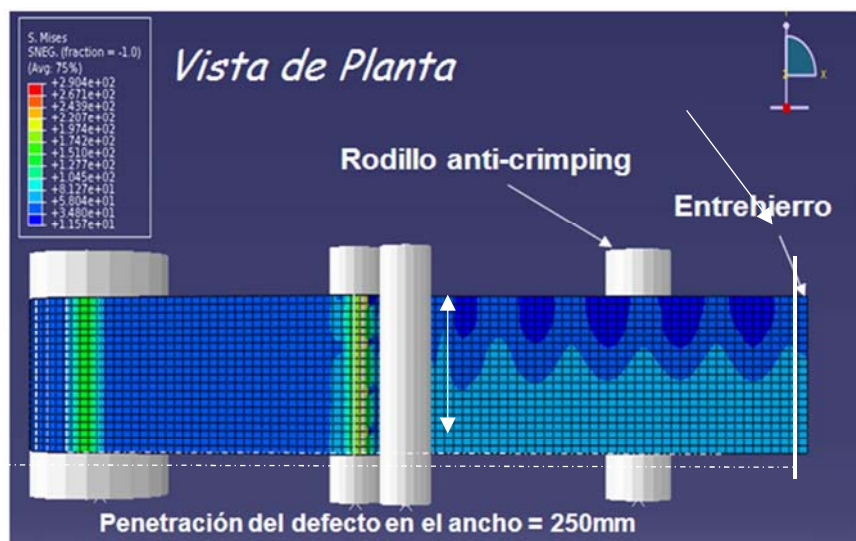


Figura 7.5 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Banda con borde ondulado con profundidad de 250mm.

7.3.1 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

Se realizan dos tipos de estudios, atendiendo a la amplitud del defecto de entrada y a la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre tres criterios establecidos en las simulaciones numéricas, a considerar de forma simultánea para determinar la posición vertical óptima que minimice los tres criterios.

Se realiza el estudio para un defecto inicial de planitud de:

- 3mm de altura
- 1mm de altura

A continuación se estudia la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre:

- Amplitud de la planitud de la banda
- Tensión de compresión transversal a la banda, a lo largo del ancho.
- Máxima curvatura de banda

7.3.1.1 DEFECTO INICIAL DE PLANITUD DE 3MM DE ALTURA.

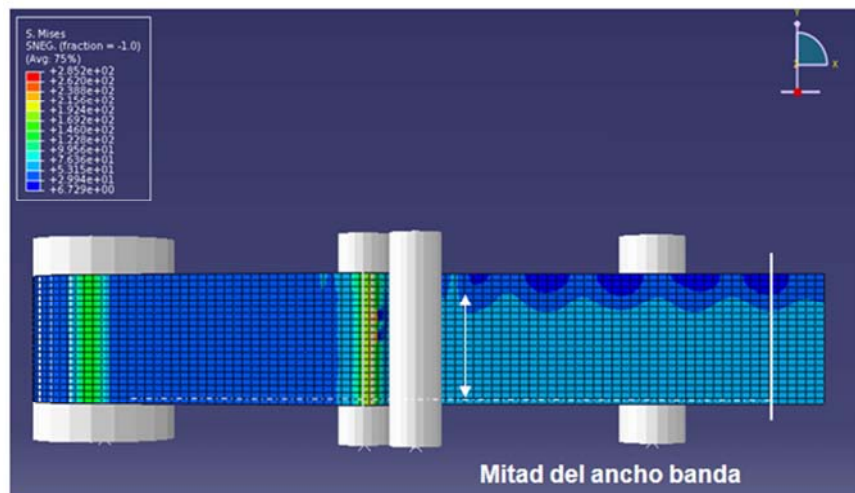


Figura 7.6 Configuración entrada, banda con defecto de planitud de 3mm de altura.

Los resultados de la simulación del diferencial de tensión interna para diferentes puntos tomados entre el borde y el centro del ancho de banda se pueden observar en la tabla, Tabla 7-2.

Tabla 7-2 Diferencia de tensión interna ($\Delta\sigma$) en diferentes puntos entre el centro y el borde de la banda.

Posición (y)	$\Delta\sigma$ (MPa) = $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
Posición= 0mm-trac	97
Posición= 100mm	110
Posición= 150mm	108
Posición= 225mm	80
Posición= 300mm	74
Posición= 350mm	55

Si consideramos sólo la mitad de la banda, entendiendo que se produce lo mismo en la otra mitad, podemos ver el perfil de planitud de la banda a lo largo de la misma. En la Figura 7.7 representa el perfil de planitud a lo largo de la mitad de la banda, para un defecto inicial de 3mm de altura y en la Figura 7.8 se representa el perfil de planitud de la banda, diferencial de tensión interna, para las diferentes posiciones verticales del rodillo anti-crimping, 0 – 350mm.

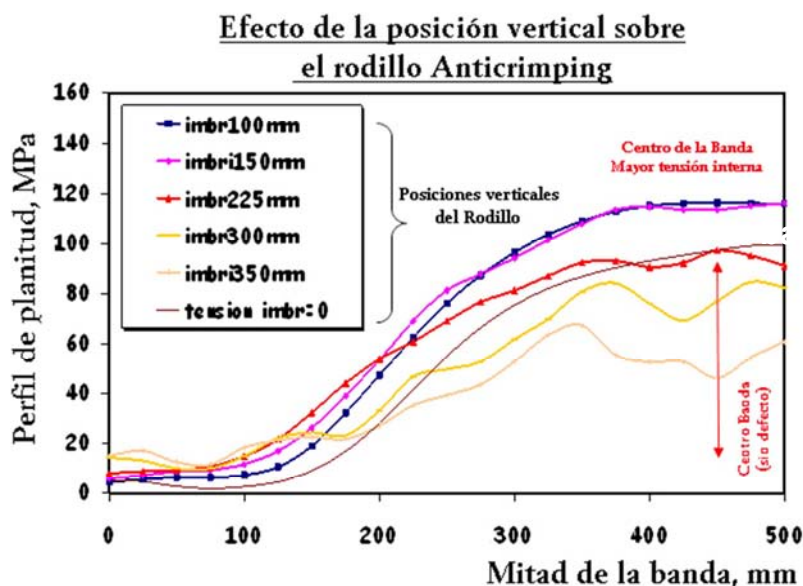


Figura 7.7 Planitud con defecto inicial de 3mm de altura.

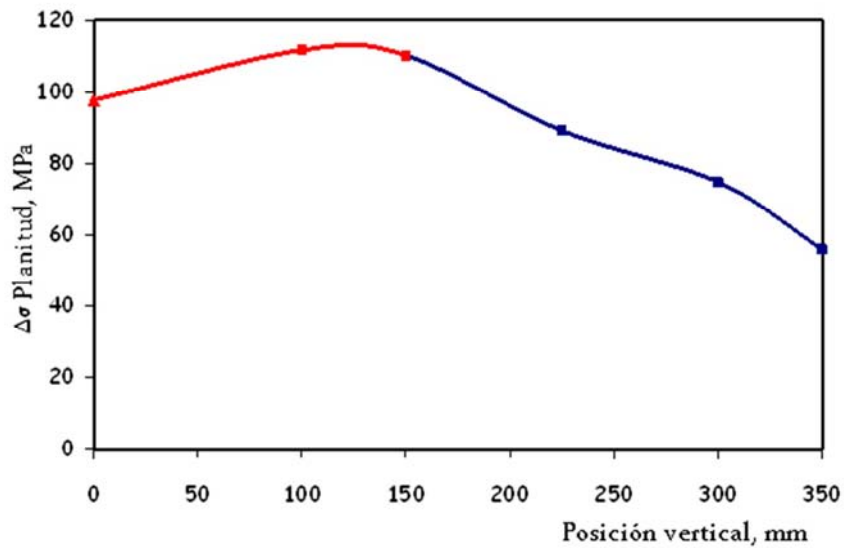


Figura 7.8 Planitud de la banda variando rodillo A.C. (0–350mm).

Si se atiende a la posición del rodillo anti-crimping frente a la línea de paso, línea marcada por la banda enhebrada en reposo, véase Figura 7.9 se observa el rodillo anti-crimping en posición estirada y no de enhebrado, posición en la cual el rodillo se retira para facilitar el enhebrado de la banda. Igualmente se observan los dos tamaños de cilindros de trabajo utilizados para los diferentes rangos de alargamientos realizados en el tren témpor.

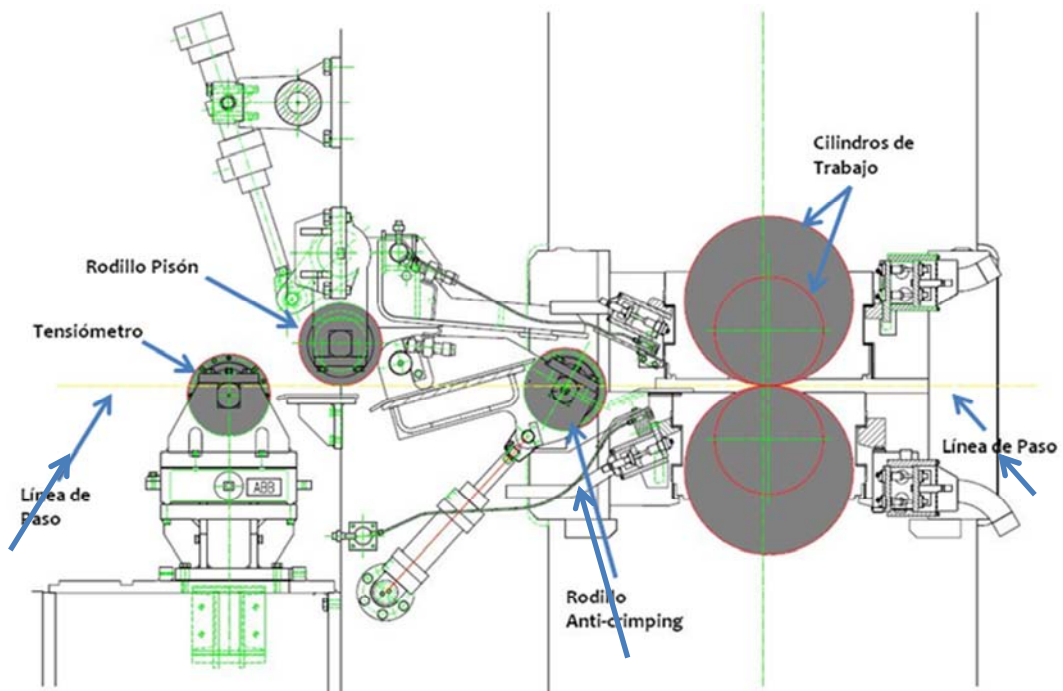


Figura 7.9 Esquema de la entrada de un tren témpor

Se estudia la posición vertical del rodillo anti-crimping para 5mm y 25mm sobre la línea de paso entendiendo que la posición normal es aquella en la que el centro del rodillo está a la altura de la línea de paso.

La Figura 7.10 representa un diferencial de tensión interna a lo largo de la mitad de la banda para una posición del rodillo anti-crimping de 5mm sobre la línea de paso. Se observa claramente una gran dispersión del diferencial de tensión interna entre dos puntos consecutivos a lo largo de la longitud de la banda lo cual da a entender que la influencia de dicha posición del rodillo anti-crimping es nula ante la eliminación de cualquier defecto de planitud y más en concreto para el estudiado de 3 y 1mm de altura. La Figura 7.11 representa un diferencial de tensión interna a lo largo de la mitad de la banda para una posición del rodillo anti-crimping de 25mm sobre la línea de paso.

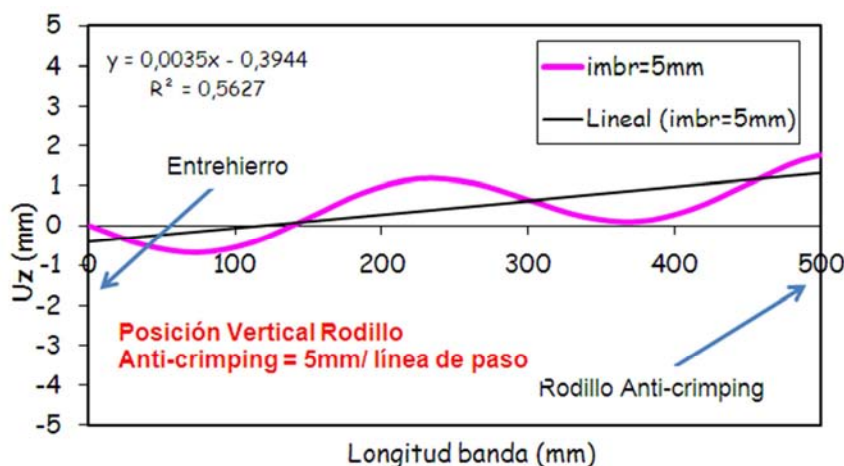


Figura 7.10 Diferencial tensión interna, imbricación rodillo A.C. de 5mm.

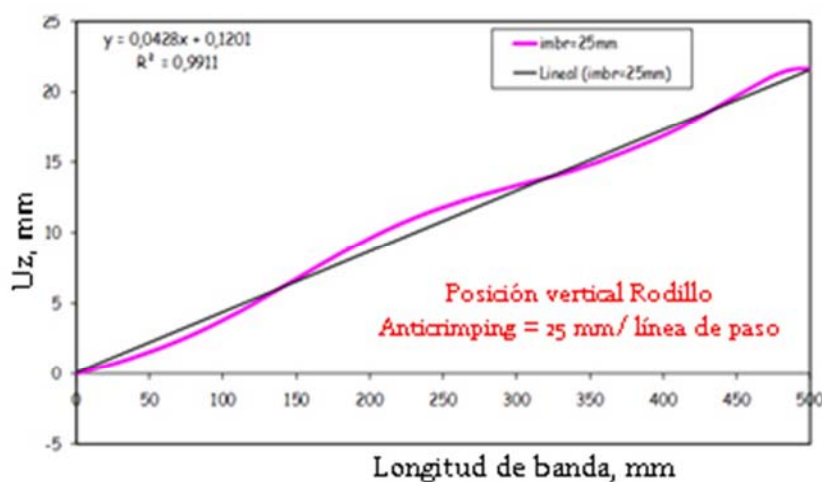


Figura 7.11 Diferencial tensión interna, imbricación rodillo A.C. de 25mm.

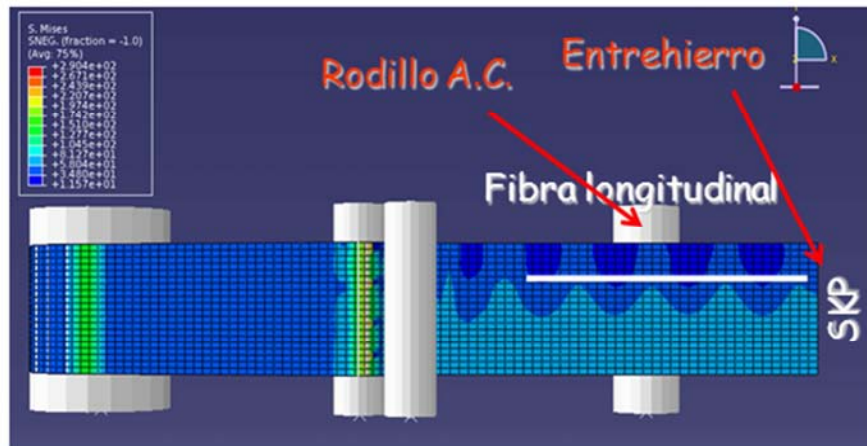


Figura 7.12 Efecto sobre banda de una posición de 25mm/ línea de paso.

Una posición vertical mayor del rodillo anti-crimping disminuye la magnitud geométrica del defecto de planitud, dando lugar a un perfil más homogéneo de planitud.

7.3.1.2 PARA UN DEFECTO INICIAL DE PLANITUD DE 1MM DE ALTURA.

La Figura 7.14 representa el Perfil de planitud, a lo largo de la mitad de la banda, para un defecto inicial de 1mm de altura. Para defectos de amplitud 1mm la planitud es más homogénea.

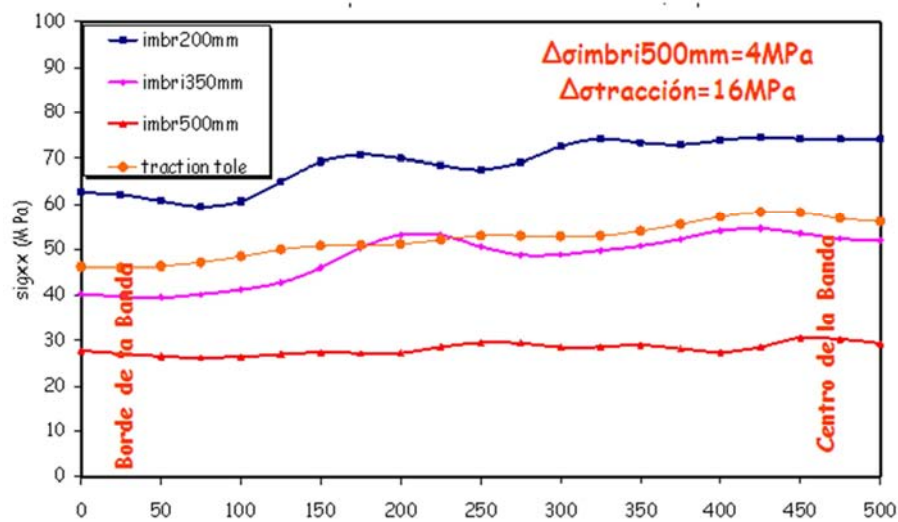


Figura 7.13 Perfil de planitud, defecto inicial de 1mm de altura.

7.3.1.3 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA

Atendiendo a la Figura 7.4, se toma la línea 1 como punto de análisis, línea transversal a la banda posterior al rodillo anti-crimping.

Se considera, que la posición vertical del rodillo anti-crimping igual a cero es aquella en la que el rodillo anti-crimping es tangente por la parte superior a la línea de paso, véase Figura 7.14.

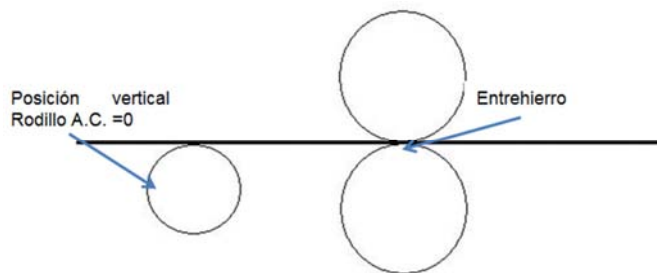


Figura 7.14 Posición vertical del Rodillo A.C. igual a cero

Si analizamos la amplitud de la planitud a lo largo de la línea 1, corte transversal posterior a la posición del rodillo anti-crimping y antes del entrehierro vemos un perfil como el de la Figura 7.16. Así en la Figura 7.15 se muestra la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud de la banda y en la Figura 7.16 se muestra la amplitud de la planitud de la banda a lo largo del ancho de banda para una posición vertical del rodillo anti-crimping de 200mm.

El radio del rodillo anti-crimping considerado para el estudio es de 275mm y la distancia al entrehierro de 676mm.

A partir del estudio realizado se puede observar como hay dos rangos de radios para los cuales se consigue minimizar la amplitud de la planitud de la banda, siendo [0, 150mm] y [250, >300mm].

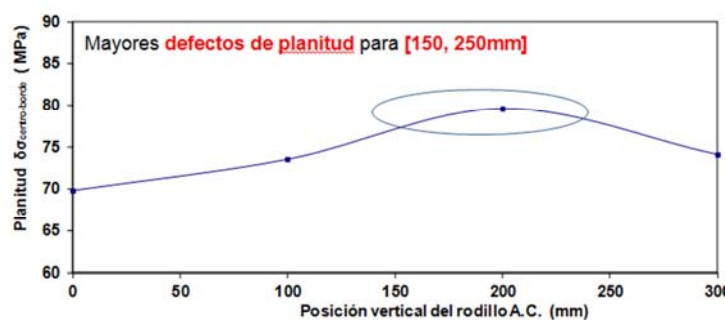


Figura 7.15 Posición vertical del rodillo A.C. y planitud.

Un estudio en mayor profundidad es necesario para determinar porque a una posición vertical de 200mm del rodillo A.C. la amplitud de la planitud de la banda se hace máxima.

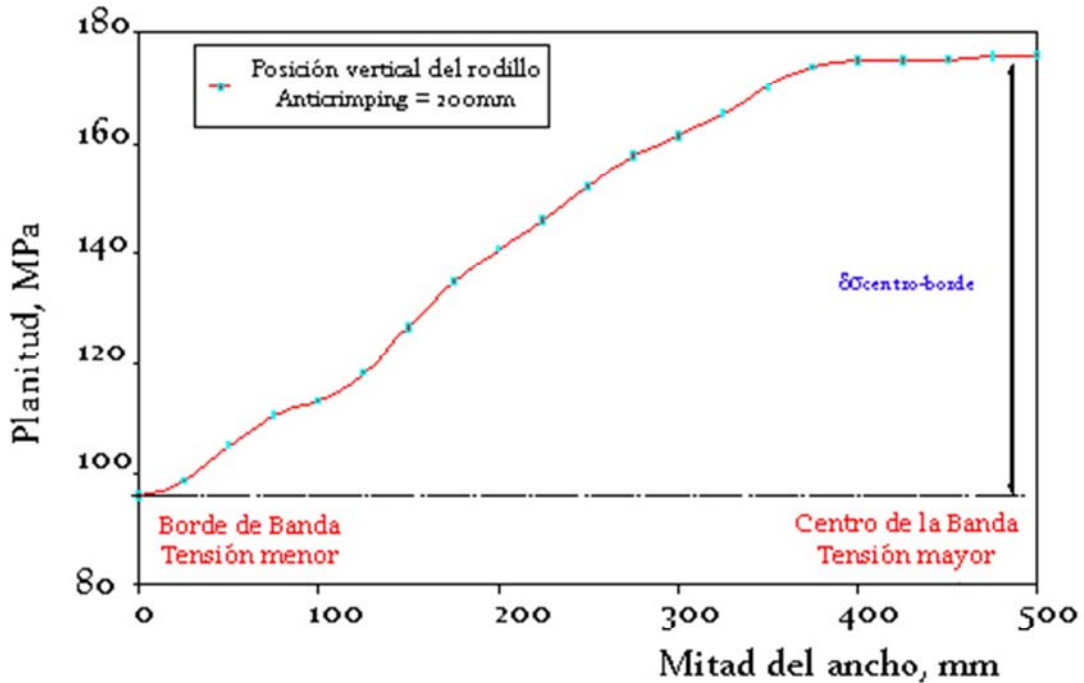


Figura 7.16 Planitud del ancho de banda con rodillo A.C. en 200mm

7.3.1.4 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LA BANDA

Para entender el porqué de seleccionar uno de los criterios establecidos para determinar la posición vertical óptima, tensión de compresión transversal a la banda, vamos a definirlo y ver su caracterización.

La estimación de la tensión crítica de abolladura en la dirección transversal a la banda viene marcada por la fórmula (7.1).

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \text{espesor}^2}{3 \cdot L_{onda}^2} \quad (7.1)$$

Donde E es el módulo de banda de Young y tiene un valor de 210.000 MPa.

Para el estudio realizado se ha tomado un espesor de banda de 0,27 mm.

Y la longitud periódica del defecto, L_{onda} , es igual a 300mm. La ecuación (7.1) se particulariza para estos valores dando la ecuación (7.2)

$$\sigma_{crit} = -2 \text{ MPa} \sim 0 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Esto nos lleva a que incluso para valores de tensión de compresión transversal pequeños (~ -1 MPa) están muy cerca de la estimación teórica de la tensión crítica de abolladura [~ -2 MPa]. Por lo que el riesgo de abolladuras en la dirección transversal es alto.

Las tensiones de compresión transversal deben ser cuanto más pequeñas mejor, lo más cercanas a cero, cuando se usa un rodillo anti-crimping.

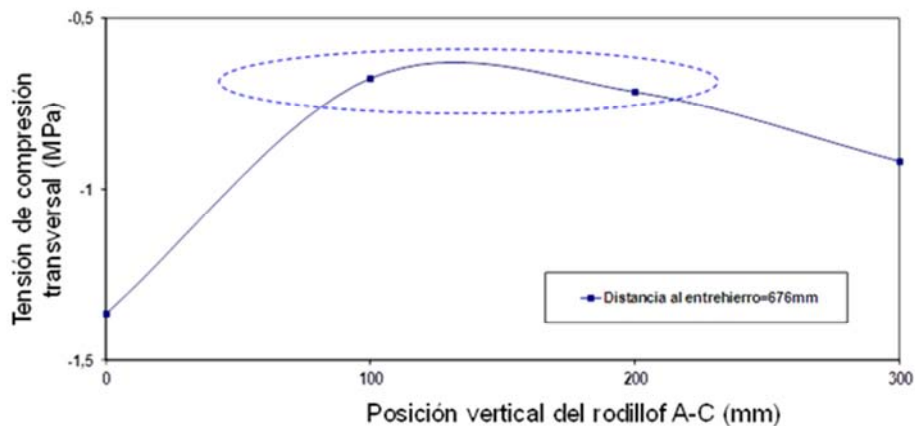


Figura 7.17 Influencia rodillo A.C. sobre tensión de compresión transversal entrehierro de 676mm.

La Figura 7.17 muestra la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la tensión de compresión transversal para una distancia al entrehierro de 676mm. Como se puede ver a medida que la posición vertical del rodillo anti-crimping aumenta, aumenta la tensión de compresión [-0.5 , -1.5 MPa].

La posición óptima del rodillo anti-crimping para limitar la tensión de compresión transversal a ~ -0.7 MPa es en el rango [80, 2000mm] como se puede ver en la Figura 7.18.

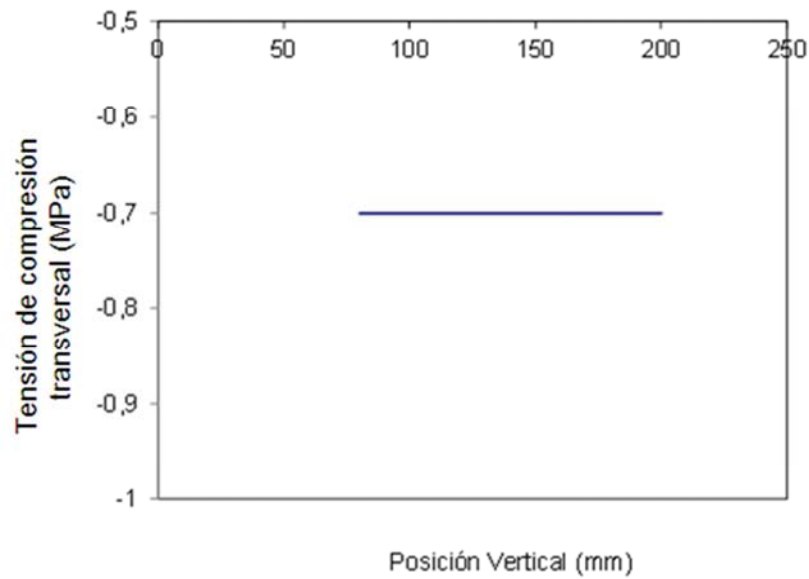


Figura 7.18 Tensión de compresión transversal dependiendo de la posición vertical del rodillo A.C.

7.3.1.5 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA CURVATURA DE BANDA

La función de curvatura extraída de las simulaciones de Abaqus indica el nivel de deterioro de la banda. En la Figura 7.19 se puede ver una representación en 3D de la banda con un diferencial de tensión de compresión interno muy elevado entre diferentes líneas paralelas a la dirección de laminación. Una sobre laminación en el tren tándem que ocasiona variaciones de espesor, valles y crestas en un corte transversal a la dirección de laminación.

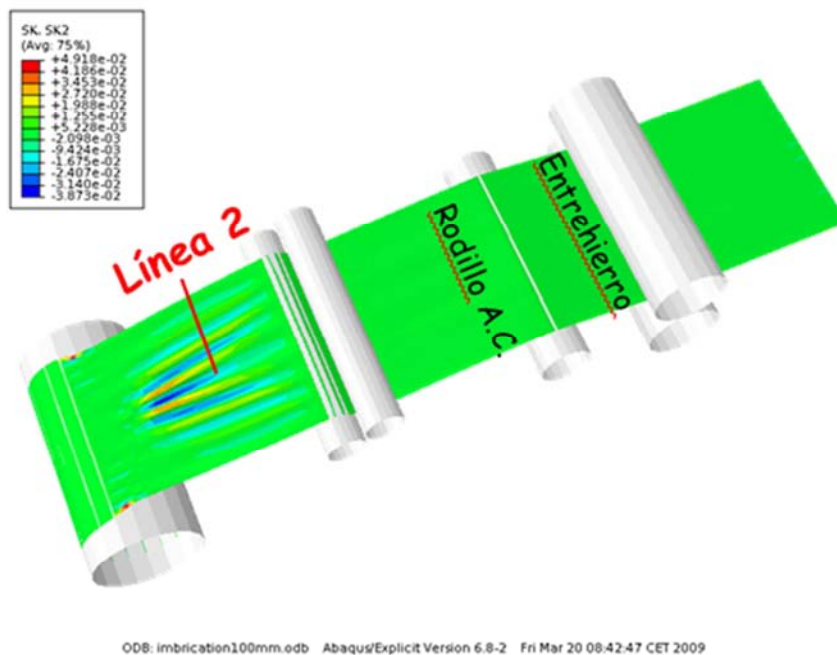


Figura 7.19 Representación 3D de la banda con máxima curvatura de banda a la entrada

En la Figura 7.20 se observa la función de curvatura tras la simulación en el modelo matemático de esta situación de entrada de la banda de hojalata. Esta curva indica el nivel de deterioro de la banda.

Pequeños valores de curvatura caracterizan pequeños defectos de ondulación de la banda.

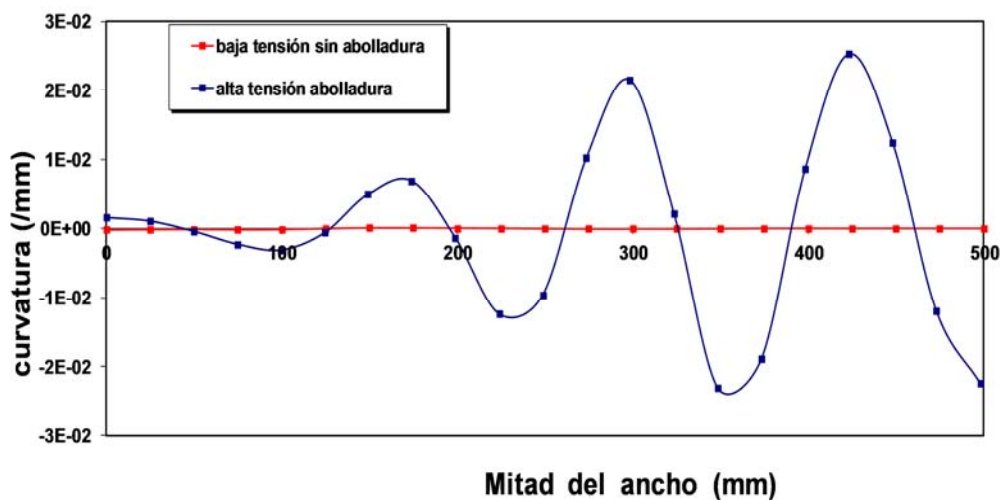


Figura 7.20 Función de curvatura extraída de iteraciones del modelo matemático.

Se realiza un estudio de la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la curvatura de la banda, atendiendo al nivel de deterioro de la misma a la entrada de caja 1 en el tren tépmer.

La Figura 7.21 muestra la influencia de la posición vertical de la banda sobre la curvatura de la banda, para una distancia al entrehierro de 676mm. Se observa que la posición vertical del rodillo anti-crimping es directamente proporcional a la curvatura de la banda, de forma que al aumentar la posición vertical, aumenta la curvatura de la banda.

Se denota que el rango de posicionamiento vertical óptimo para el rodillo anti-crimping para limitar la curvatura de la banda está entre [80, 150mm].

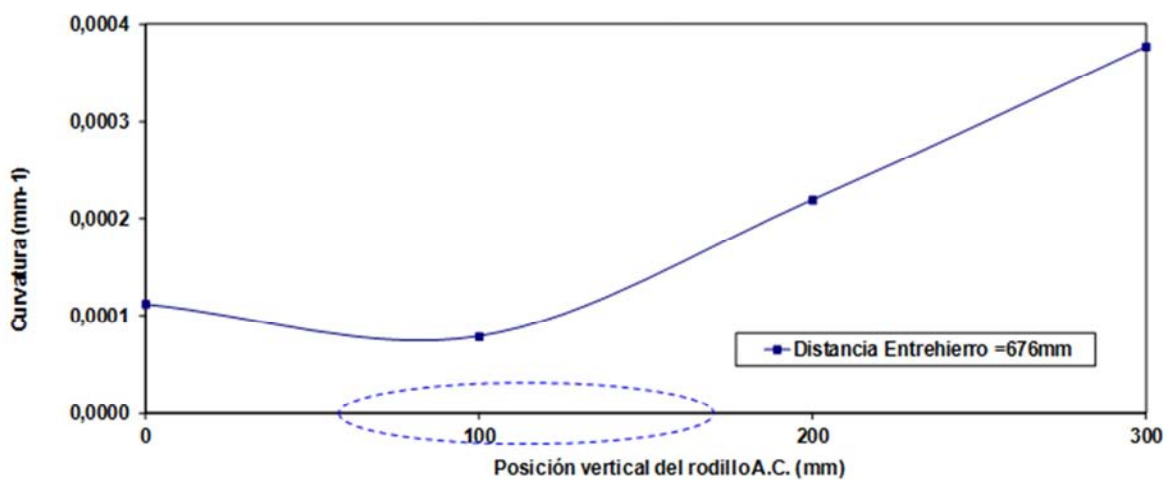


Figura 7.21 Posición vertical- curvatura de la banda, entrehierro 676mm.

7.3.1.6 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DEL RODILLO ANTI-CRIMPING AL ENTREHIERRO

Atendiendo a la Figura 7.9 la otra posición del rodillo anti-crimping que podría influir sobre la planitud de la banda sería su posicionamiento al entrehierro.

Si consideramos que entra un defecto de planitud de 3mm de altura el diferencial de tensión transversal interna a lo largo de la mitad de la banda es la mostrada en la Figura 7.22

En esta Figura 7.22 se analiza el diferencial de tensión transversal a lo largo de la mitad de la banda para diferentes distancias entre el rodillo Anti-crimping y el Entrehierro.

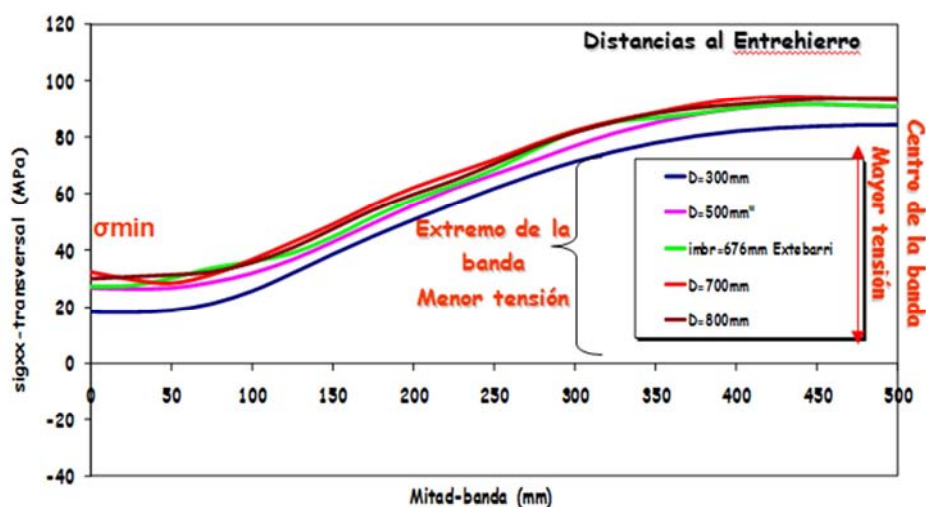


Figura 7.22 Tensión transversal función rodillo A.C. y entrehierro.

Como se ve en la Figura 7.22 se realizan diferentes simulaciones en el modelo numérico para diferentes distancias del rodillo Anti-crimping al Entrehierro obteniéndose un diferencial de tensión transversal prácticamente idéntico para las diferentes distancias. Este mismo análisis se ve refrendado con pruebas hechas en el proceso real en la planta B manteniendo dicha configuración del rodillo anti-crimping durante un tiempo determinado obteniendo así la misma conclusión para diferentes tipos de alargamiento, composición de aceros y rutas metalúrgicas diferentes para el mismo uso final del cliente.

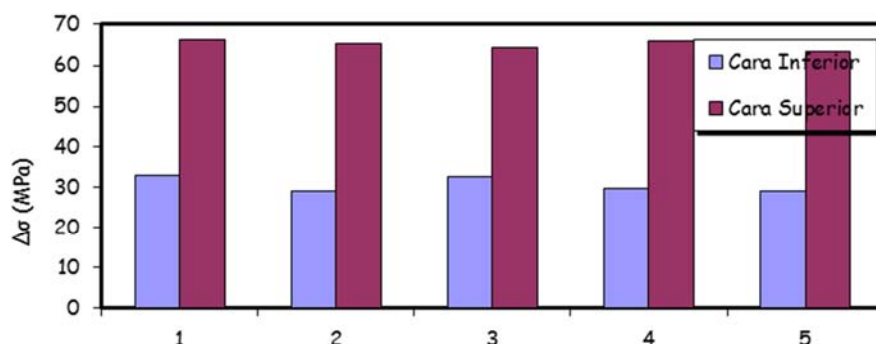


Figura 7.23 Diferencial de tensión interna función del entrehierro.

En la Figura 7.23 se muestra el diferencial de tensión interna, tanto en la cara inferior como en la superior, para diferentes distancias al entrehierro: 300, 500, 676, 700 y 800mm.

En la Figura 7.24 se muestra el efecto de la distancia entre el rodillo anti-crimping y el entrehierro para una fibra a 70mm del borde y con una imbricación de 150mm, y en la Figura 7.25 se muestra Efecto de la distancia entre el rodillo Anti-crimping y el Entrehierro para una fibra a 70mm y un espesor de 0.27mm.

Como conclusión a la influencia de la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro es que no hay un efecto significativo sobre el perfil de planitud. Aunque el perfil de espesor y de tensión de tracción cambian mucho, como se puede ver en la Figura 7.25.

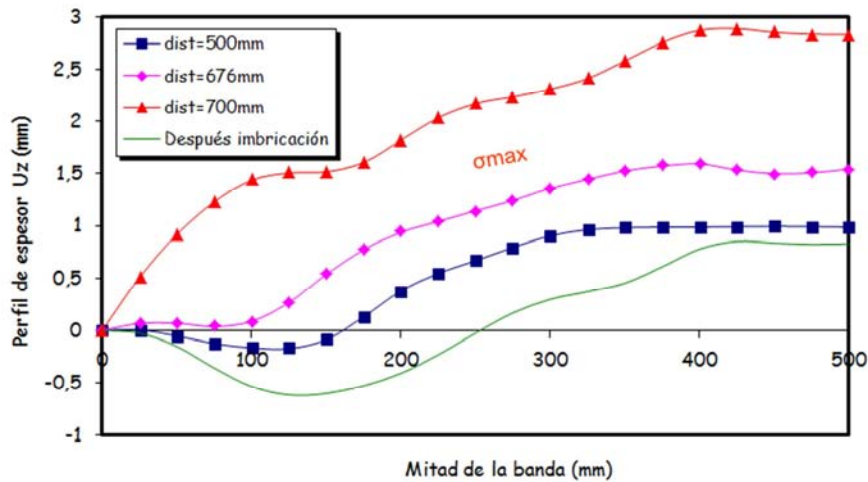


Figura 7.24 Efecto de la distancia entre rodillo A.C. y entrehierro (70mm borde e imbricación 150mm).

La conclusión que se puede sacar es que a mayor distancia, mayor tensión de tracción y con ello aparecen ondas de cazuelas.

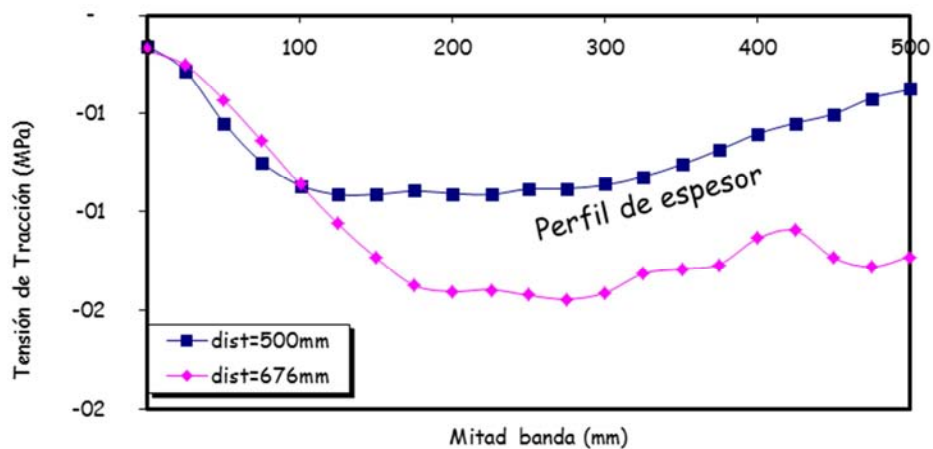


Figura 7.25 Efecto de la distancia entre rodillo A.C. y entrehierro (70mm y espesor 0.27mm)

Para una tensión de tracción tal que: $0,1 \text{ MPa} < \sigma_{\text{tracción}} < 1,5 \text{ MPa}$

Si la tensión de tracción es mayor que la tensión crítica de abolladura entonces hay riesgo de la generación de cazuelas.

7.3.1.7 RIESGO DE ABOLLADURAS

En la Figura 7.26 se muestra la simulación del modelo numérico donde se aprecia la generación de cazuelas para diferenciales de tensión de tracción de 2,8MPa.

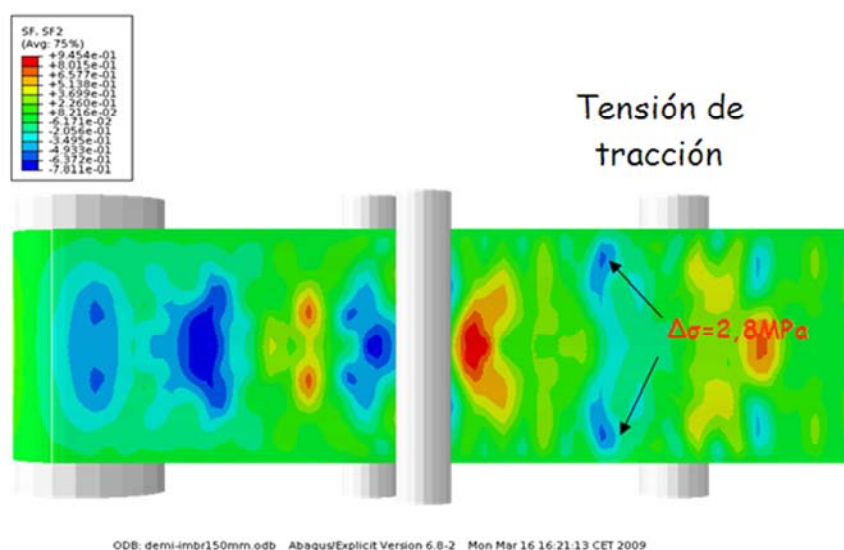


Figura 7.26 Simulación apareciendo cazuelas (tensión tracción 2,8MPa).

La tensión de tracción es la causa de defectos de fricción y geométricos.

Si la tensión de la banda es menor que la tensión crítica de formación de cazuelas aparecen ondas, generalmente elásticas.

Si la tensión de la banda es mayor que la tensión crítica de formación de cazuelas aparecen cazuelas, plásticas.

7.3.1.8 INFLUENCIA DE LA TENSIÓN DE BANDA

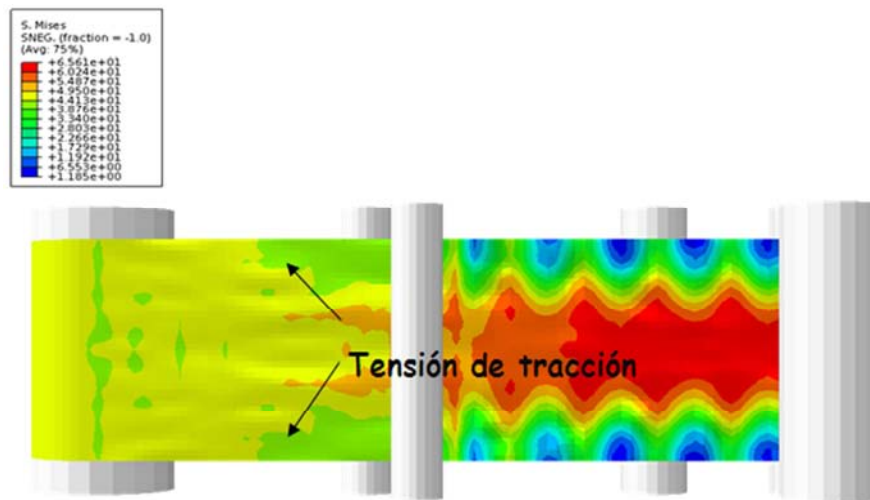


Figura 7.27 Influencia de la tensión de la banda en la generación de cazuelas.

En la Figura 7.27 se aprecia que a partir de una determinada tensión de banda se generan cazuelas después del tensiómetro que pueden ocasionar pliegues a la entrada de caja 1.

Si la tensión de banda es menor que la tensión crítica de generación de cazuelas aparecen ondas, generalmente elásticas.

Si la tensión de la banda es mayor que la tensión crítica de generación de cazuelas aparecen cazuelas, plásticas.

7.3.2 INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING EN LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA Y CURVATURA

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los diferentes parámetros analizados, el diámetro óptimo del rodillo anti-crimping será aquel que minimice los siguientes tres criterios:

- Amplitud de la planitud de la banda
- Tensión de compresión transversal a la banda, a lo largo del ancho.
- Máxima curvatura de banda.

7.3.2.1 INFLUENCIA DEL DIAMETRO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA

Atendiendo a la Figura 7.4, se toma la línea 1 como punto de análisis, línea transversal a la banda posterior al rodillo anti-crimping.

En la Figura 7.28 se muestra la influencia del diámetro del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud a lo largo del ancho de la banda.

Tomando como base que la distancia al entrehierro es de 676mm, y que los cilindros de trabajo utilizados para los diferentes modelos de regulación tienen los siguientes diámetros:

Diámetro cilindros de trabajo:

- Doble reducción: 360/ 400mm
- Simple reducción: 510/ 560mm

Se parte para las condiciones iniciales de simulación un radio a optimizar de 137.5mm

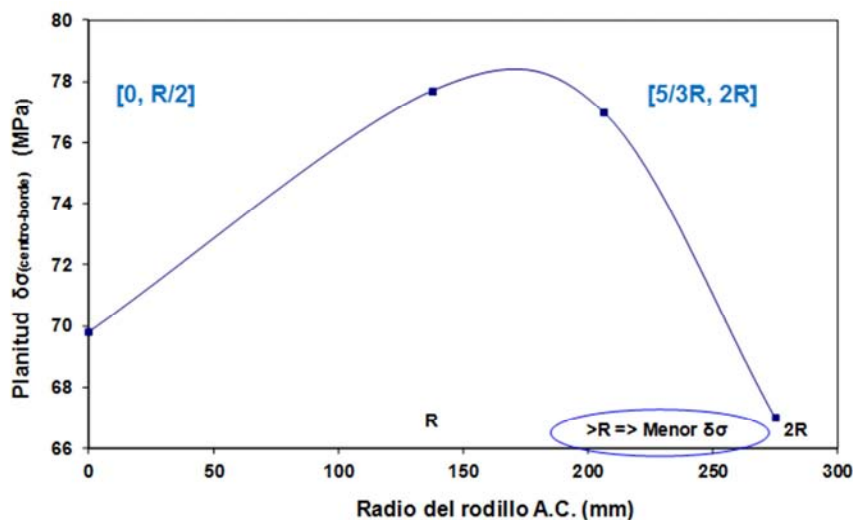


Figura 7.28 Planitud función del diámetro del rodillo A.C.

Analizando la Figura 7.31 a partir de un radio determinado, cuanto mayor es el radio del rodillo anti-crimping menor es la amplitud de la planitud de la banda.

7.3.2.2 INFLUENCIA DEL RADIO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA CURVATURA DE BANDA

Atendiendo a la Figura 7.4, se toma la línea 1 como punto de análisis, línea transversal a la banda posterior al rodillo anti-crimping.

La distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro es de 676mm.

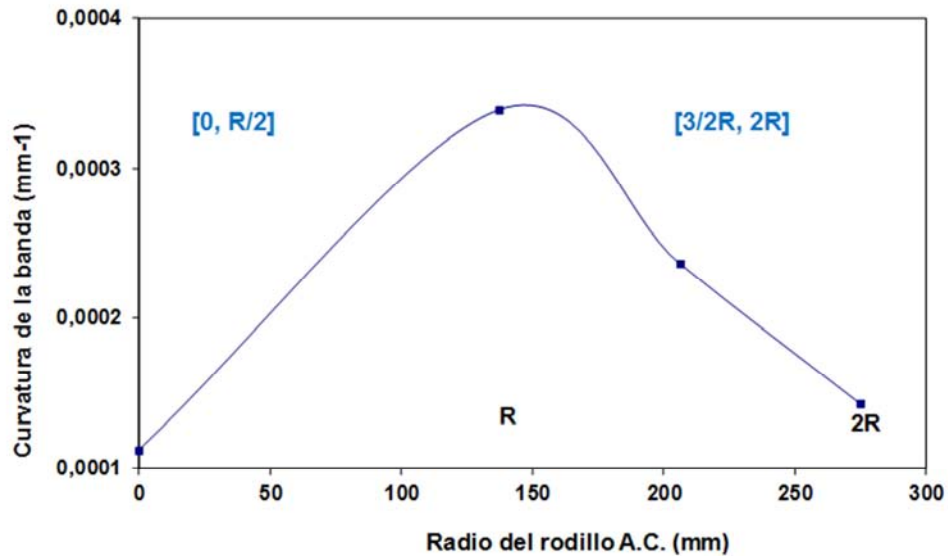


Figura 7.29 Curvatura de banda función del radio del rodillo A.C.

La Figura 7.29 muestra la Influencia del radio del rodillo anti-crimping sobre la curvatura de banda a lo largo del ancho de banda. Analizando la Figura 7.29 a partir de un radio determinado, cuanto mayor es el radio del rodillo anti-crimping menor es la curvatura de banda.

7.3.2.3 INFLUENCIA DEL RADIO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING SOBRE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LA BANDA

Al igual que en estudios anteriores se realiza sobre la línea 1, ver Figura 7.4, línea transversal a la dirección de laminación situada entre el rodillo anti-crimping y el entrehierro. La distancia horizontal del rodillo al anti-crimping al entrehierro es de 676mm.

Se estudia cual es la influencia y variación de la tensión de compresión transversal a la banda respecto al tamaño del radio del rodillo anti-crimping. Se observa en la Figura 7.30 que a medida que el radio aumenta la tensión de compresión disminuye.

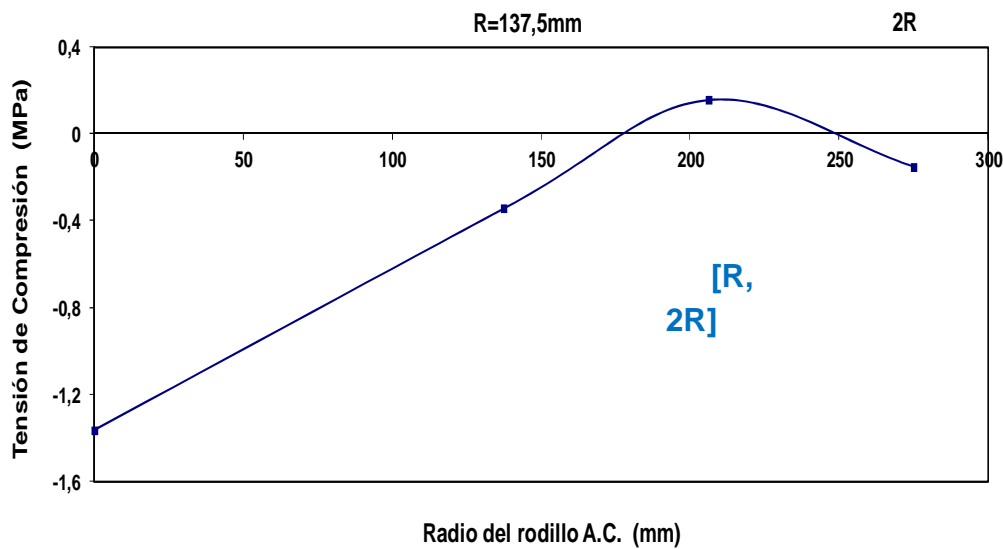


Figura 7.30 Tensión de compresión transversal función radio del rodillo A.C.

7.3.3 INFLUENCIA DE LA CORONA DEL RODILLO ANTI-CRIMPING. EN LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA

A la hora de evaluar cuál es la concavidad o convexidad del rodillo anti-crimping óptimo, corona del rodillo, para disminuir la amplitud de la planitud de la banda, debemos de tener presente cuál es el defecto inicial que presenta la banda. Esta variación de espesor en un corte transversal a la banda es determinante en la determinación de la corona óptima del rodillo.

Se pueden presentar dos defectos de entrada en la banda:

- Borde ondulado
- Cazuelas localizadas en el centro de la banda

En la Figura 7.31 se muestra Influencia de la corona del rodillo anti-crimping en la amplitud de la planitud de la banda, para un defecto de banda inicial de borde ondulado. Observándose la evolución de la planitud de la banda para diferentes coronas del rodillo anti-crimping, considerando siempre que la banda viene con un defecto de borde ondulado a la entrada. Para el caso de que la banda tenga un defecto inicial de cazuelas localizadas en el centro de la banda se realiza otro estudio siendo el resultado el inverso obtenido para el defecto de borde ondulado.

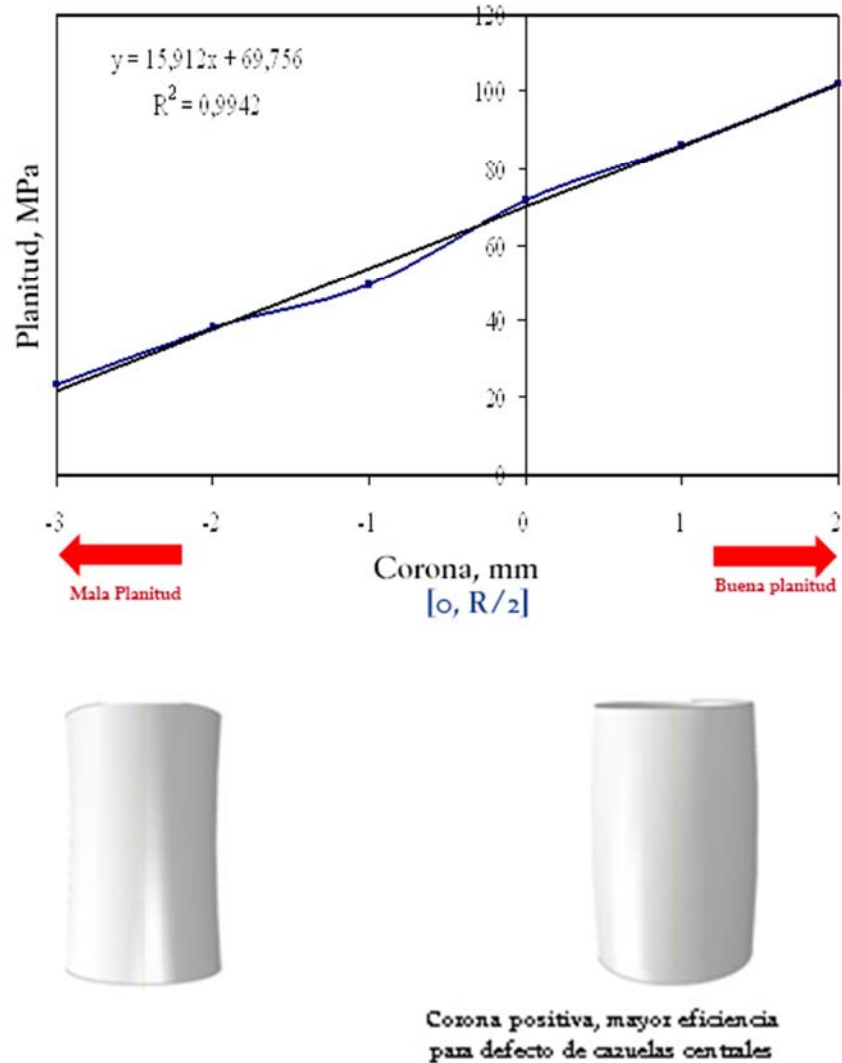


Figura 7.31 Planitud función corona del rodillo A.C. con defecto de banda inicial de borde ondulado.

7.3.4 CONCLUSIONES ANÁLISIS ESTÁTICO

Como resultado de los análisis realizados en el estudio estático de la influencia de la posición vertical, horizontal al entrehierro, diámetro y corona del rodillo anti-crimping se presenta a continuación un resumen de las conclusiones alcanzadas.

7.3.4.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

A continuación se presenta la optimización global de la posición vertical del rodillo anti-crimping de acuerdo a los tres criterios establecidos y considerados de manera simultánea en la simulación del modelo numérico.

Los valores establecidos como de partida en el estudio y fijados para el estudio son:

- Distancia horizontal del rodillo anti-crimping al entrehierro de 676mm.
- Valor nominal del radio del rodillo anti-crimping y punto de partida para la optimización del mismo de 137,5mm.

Hay tres rangos de la posición vertical del rodillo anti-crimping a estudio:

- Optimización de la Planitud, δ σcentro-borde (MPa): [0,150mm] y [250, >300]
- Optimización de la tensión de compresión transversal (MPa): [80, 200mm]
- Optimización de la curvatura: [80, 150mm]

En la Figura 7.32 se muestran los rangos de optimización de la planitud, tensión de compresión y curvatura en función de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Análisis estático. Como se puede observar la posición vertical óptima del rodillo anti-crimping donde se minimizan los tres criterios considerados de gran importancia para la temperización de la banda de hojalata, planitud, curvatura de la banda y tensión de compresión transversal está en el rango [80, 150mm].

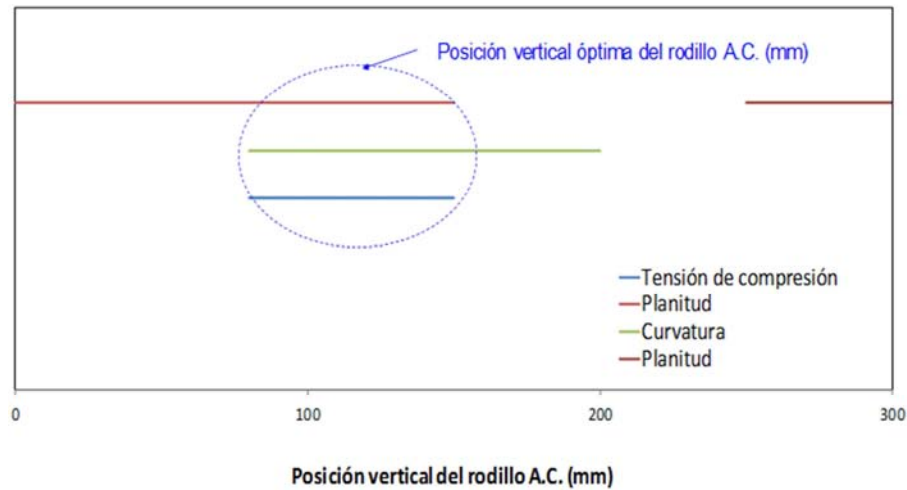


Figura 7.32 Optimización de la planitud. Análisis estático.

7.3.4.2 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTÁTICO DEL RADIO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

A continuación se presenta la optimización global del radio del rodillo anti-crimping de acuerdo a los tres criterios establecidos y considerados de manera simultánea en la simulación del modelo numérico.

Los valores establecidos como de partida en el estudio y fijados para el estudio son:

- Distancia horizontal del rodillo anti-crimping al entrehierro de 676mm.
- Valor nominal del radio del rodillo anti-crimping y punto de partida para la optimización del mismo de 137,5mm.

Hay tres rangos del radio del rodillo anti-crimping estudiados:

- Optimización de la Planitud, $\delta_{\text{centro-borde}}$ (MPa): $[0, R/2]$ y $[5/3R, 2R]$
- Optimización de la tensión de compresión transversal (MPa): $[R, 2R]$
- Optimización de la curvatura: $[0, R/2]$ y $[3/2R, 2R]$

En la Figura 7.33 se muestra el Rango de optimización de la planitud, tensión de compresión y curvatura en función del radio del rodillo anti-crimping.

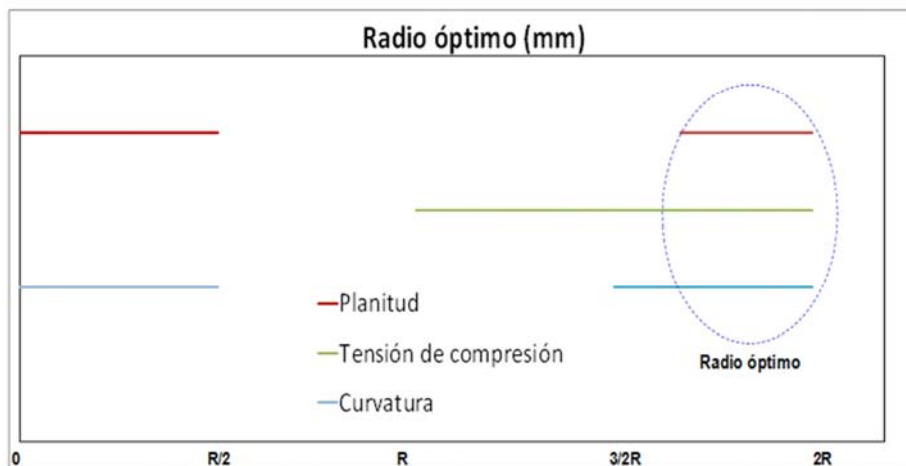


Figura 7.33 Rango de optimización de la planitud.

7.3.4.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA CORONA DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

A continuación se presenta la optimización global de la corona del rodillo anti-crimping de acuerdo a los tres criterios establecidos y considerados de manera simultánea en la simulación del modelo numérico.

Los valores establecidos como de partida en el estudio y fijados para el estudio son:

- Distancia horizontal del rodillo anti-crimping al entrehierro de 676mm.
- Valor nominal del radio del rodillo anti-crimping y punto de partida para la optimización del mismo de 137,5mm.

En el estudio de la búsqueda de la corona más adecuada para la minimización de los tres criterios establecidos tiene una gran influencia la calidad de la banda, entendiéndose por ello el defecto más acusado con que viene la banda de la instalación anterior. En este caso se ha realizado el estudio para los dos posibles y más comunes defectos:

- Bordes ondulados. Para diferentes amplitudes de onda.
- Abolladuras de la banda acusadas en el centro. Diferenciales de espesor acusados entre el centro y los bordes.

Este estudio ha sido contrastado con diferentes pruebas en el tren témpér de la planta industrial B para diferentes tipos de acero, modelos de regulación y grados de reducción. Dichas pruebas se realizaron con diferentes tipos de corona y dejando dicho cambio un tiempo determinado, entre 4 y 6 meses, para alcanzar una población de banda temperizada suficiente que nos permita sacar conclusiones determinantes, concluyentes e independientes de otros posibles factores y variables puntuales en el tiempo.

La conclusión obtenida para un defecto de calidad de abolladura en el centro de la banda de la corona óptima del rodillo anti-crimping es que la corona positiva reduce los defectos de planitud de abolladura localizados en el centro de la banda.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un resumen pruebas en el tren témpér de un proceso industrial de la planta B del rodillo anticrimping con diferente configuración de rugosidad y corona.

7.4 ANÁLISIS DINÁMICO DEL EFECTO DEL RODILLO ANTI-CRIMPING EN UN TREN TÉMPER

Para el análisis dinámico del rodillo anti-crimping, vamos a considerar que la banda viene con un defecto de calidad, borde ondulado con las siguientes características:

- Amplitud del defecto = 3mm
- Longitud de onda = 5
- Penetración en el ancho de la banda = 125mm o 250mm

Otras condiciones de configuración de la entrada del tren témpér son:

- La distancia horizontal del rodillo anti-crimping al entrehierro es de 676mm.
- La tracción de la banda a la entrada es de 50 MPa.
- La posición vertical del tensiómetro es del valor del radio, 137,5mm.
- La posición vertical del rodillo anti-crimping es del valor del radio, 137,5mm.

La Figura 7.34 muestra un análisis dinámico. a) Tensión de banda 50MPa. b) Posición vertical del tensiómetro igual a su radio, y la Figura 7.35 muestra un análisis dinámico. a) Posición vertical del rodillo A.C. igual a su radio. b) Banda en movimiento con el mapa de planitud.

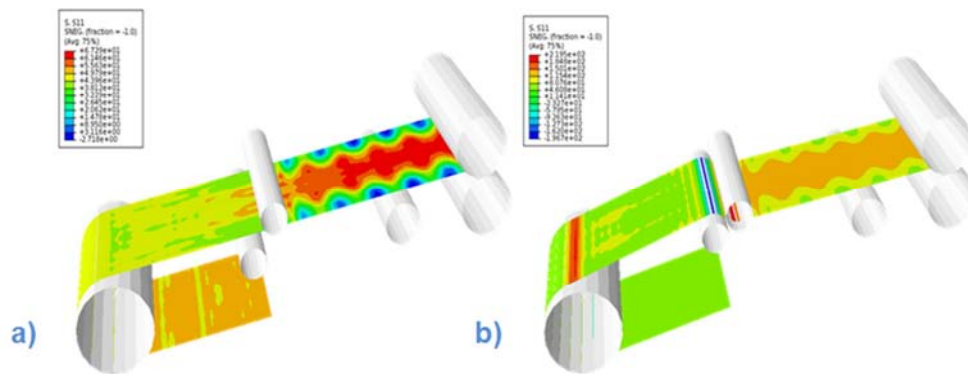


Figura 7.34 Análisis dinámico. a) Tensión banda 50MPa. b) Posición vertical del tensiómetro igual a su radio.

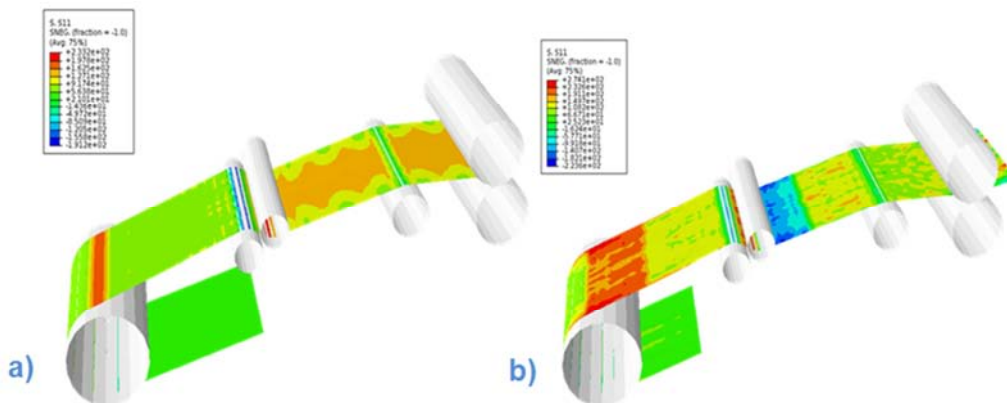


Figura 7.35 Análisis dinámico. a) Posición vertical del rodillo A.C. igual a su radio. b) Banda en movimiento con el mapa de planitud.

7.4.1 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

Se estudia la influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre tres criterios establecidos en las simulaciones numéricas, del modelo matemático, a considerar de forma simultánea para determinar la posición vertical óptima que minimice los tres criterios.

- Amplitud de la planitud de la banda
- Tensión de compresión transversal a la banda, a lo largo del ancho.

- Máxima curvatura de banda

Se considera que la banda viene con un defecto de calidad, borde ondulado con una amplitud de onda de 3mm.

7.4.1.1 INFLUENCIA SOBRE LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA

Atendiendo a la Figura 7.4, se toma la línea 1 como punto de análisis, línea transversal a la banda posterior al rodillo anti-crimping.

Se considera, que la posición vertical del rodillo anti-crimping igual a cero es aquella en la que el rodillo anti-crimping es tangente por la parte superior a la línea de paso, véase Figura 7.14.

Si analizamos la amplitud de la planitud a lo largo de la línea 1, corte transversal posterior a la posición del rodillo anti-crimping y antes del entrehierro vemos un perfil como el de la Figura 7.36.

El radio del rodillo anti-crimping considerado para el estudio es de 275mm y la distancia al entrehierro de 676mm.

A partir del estudio realizado se puede observar como hay dos rangos de radios para los cuales se consigue minimizar la amplitud de la planitud de la banda, siendo [0, 150mm] y [250, >300mm].

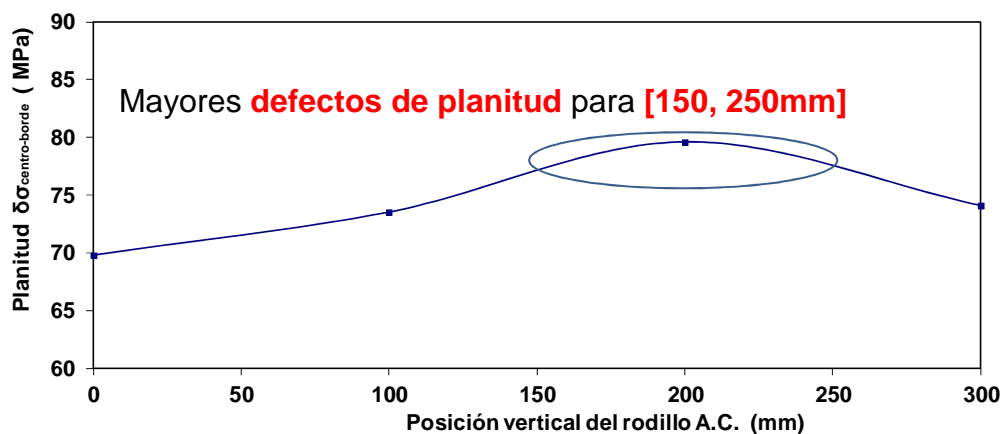


Figura 7.36 Influencia de la posición vertical del rodillo anti-crimping sobre la amplitud de la planitud de la banda

Al igual que en el estudio estático se ve como para una posición vertical de 200mm del rodillo A.C. la amplitud de la planitud de la banda se hace máxima.

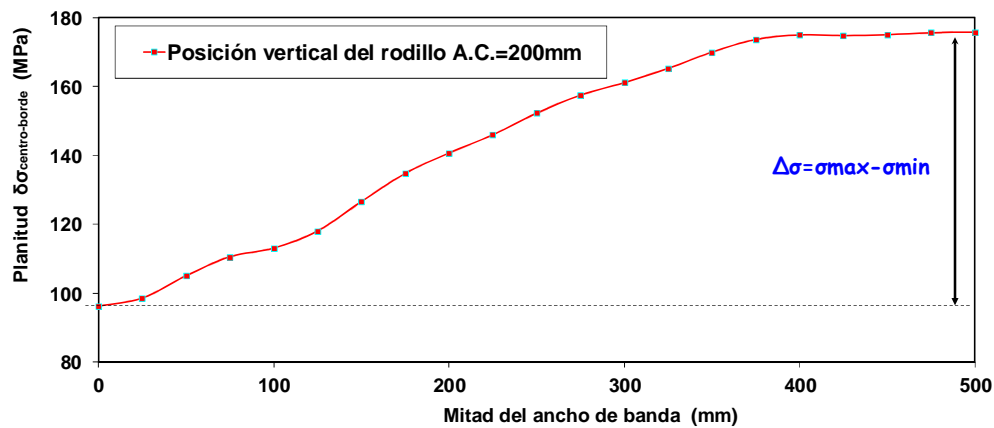


Figura 7.37 Amplitud de la planitud de la banda a lo largo del ancho de banda para una posición vertical del rodillo anti-crimping de 200mm

7.4.1.2 INFLUENCIA SOBRE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LA BANDA

Las tensiones de compresión transversal deben ser cuanto más pequeñas mejor, lo más cercanas a cero, cuando se usa un rodillo anti-crimping.

Como se puede ver en la Figura 7.38 a medida que la posición vertical del rodillo anti-crimping aumenta, aumenta la tensión de compresión [-0.5, -1.5 MPa]

La posición óptima del rodillo anti-crimping para limitar la tensión de compresión transversal a ~ -0.7 MPa es en el rango [80, 2000mm] como se puede ver en la Figura 7.38.

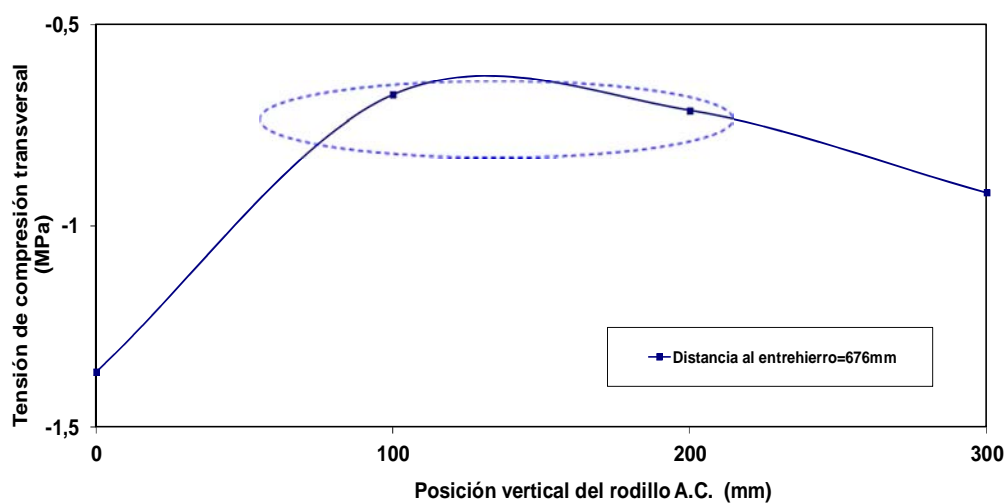


Figura 7.38 Variación de la tensión de compresión transversal a la banda en función de la posición vertical del rodillo anti-crimping

7.4.1.3 INFLUENCIA SOBRE LA CURVATURA DE BANDA

La función de curvatura extraída de las simulaciones de Abaqus indica el nivel de deterioro de la banda.

Se observa que la posición vertical del rodillo anti-crimping es directamente proporcional a la curvatura de la banda, de forma que al aumentar la posición vertical, aumenta la curvatura de la banda, como se puede observar en la Figura 7.39.

Se denota que el rango de posicionamiento vertical óptimo para el rodillo anti-crimping para limitar la curvatura de la banda está entre [80, 150mm].

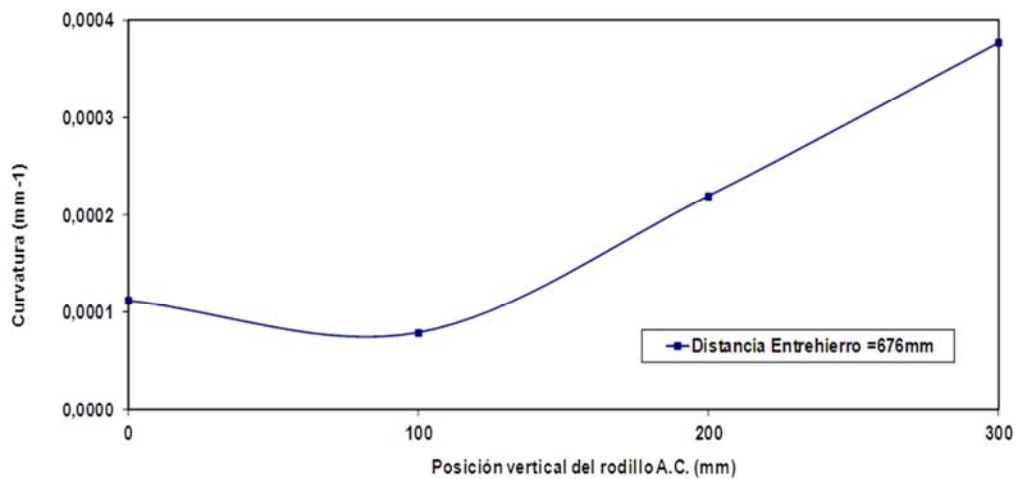


Figura 7.39 Variación de la curvatura de banda respecto a la posición vertical del rodillo anti-crimping. Análisis Dinámico.

7.4.2 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DEL RODILLO ANTI-CRIMPING AL ENTREHIERRO

Otra de las variables que influye en la minimización de los tres criterios establecidos de manera simultánea es la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro.

7.4.2.1 INFLUENCIA SOBRE LA AMPLITUD DE LA PLANITUD DE LA BANDA

En la Figura 7.40 se estudia para dos distancias del rodillo anti-crimping al entrehierro la variación de la amplitud de la planitud sobre la posición vertical del rodillo.

Se trata de un estudio cruzado dado que el rango de optimización y minimización de los tres criterios será aquel en el que confluyan la posición vertical y distancia al entrehierro óptima.

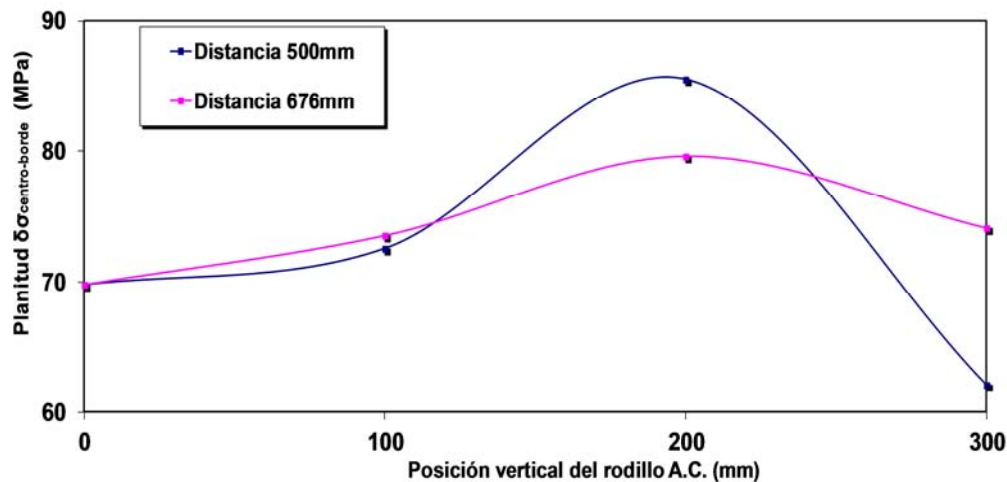


Figura 7.40 Variación de la planitud sobre la posición vertical para distancias rodillo A.C.-entrehierro, 500 y 676mm.

Se observa que para una distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro de 500mm hay dos rangos para los cuales se optimiza la amplitud de planitud: [0, 140mm] y [250, >300mm].

Igualmente para una distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro de 676mm los dos rangos para los cuales se estabiliza la amplitud de planitud de la banda es para: [0, 150mm] y [250, >300mm]

7.4.2.2 INFLUENCIA SOBRE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LA BANDA

Al igual que para la influencia sobre la amplitud de la planitud de la banda, se estudia para dos distancias al entrehierro de 500 y 676mm la influencia de la tensión de compresión transversal a la banda sobre la posición vertical del rodillo anti-crimping.

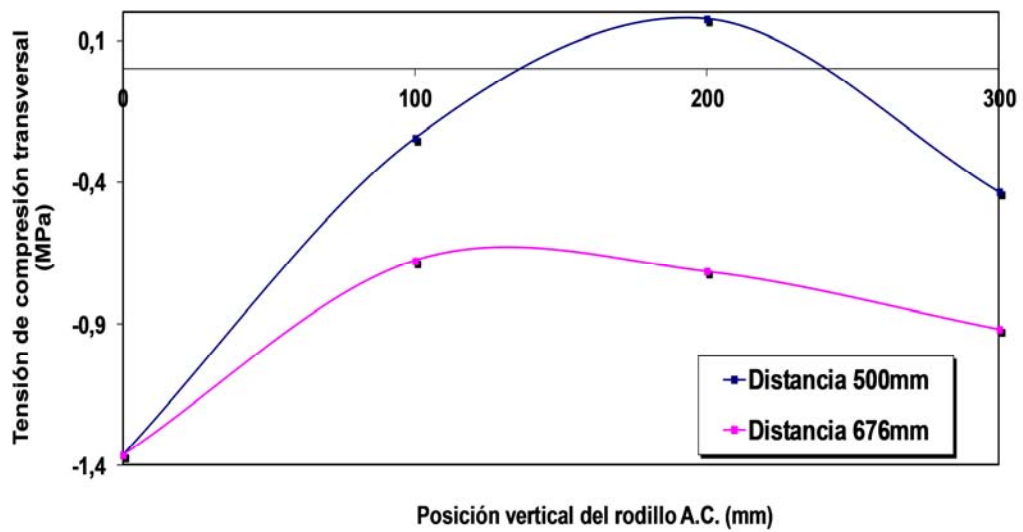


Figura 7.41 Variación de la tensión de compresión transversal sobre la posición vertical para distancias del rodillo-entrehierro, 500 y 676mm.

Se observa en la Figura 7.41 como para una distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro de 500mm el rango de posicionamiento vertical para el que se estabiliza la tensión de compresión transversal es [60, 250mm]. Siendo para una distancia de 676mm [80, 200mm].

7.4.2.3 INFLUENCIA SOBRE LA CURVATURA DE BANDA

Para poder analizar la posición óptima de distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro se analiza la variación del tercer criterio, la curvatura de banda, sobre la mitad del ancho de banda. Se realiza el estudio para dos distancias al entrehierro de 500 y 676mm.

Atendiendo al estudio anteriormente realizado para la optimización de la posición vertical del rodillo anti-crimping donde el rango que minimizaba los tres criterios era [80, 150mm], se considera una posición vertical del rodillo anti-crimping de 100mm para determinar la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro óptima.

En la Figura 7.42 se representa la tensión de compresión en función del desplazamiento vertical a lo largo de la mitad del ancho de banda para una distancia al entrehierro de 500mm y una posición vertical de 100mm. Se compara con una función polinómica de grado dos para determinar donde se concentran las tensiones de compresión y de que magnitud.

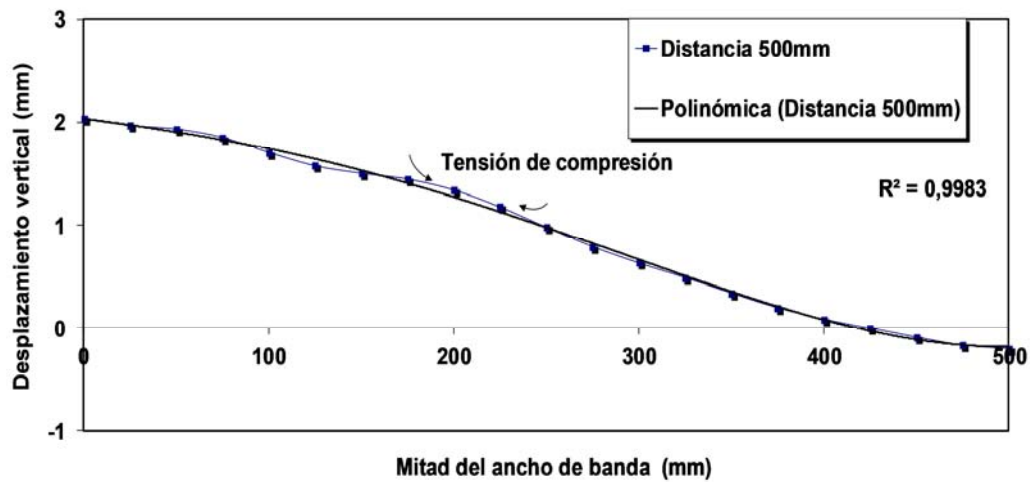


Figura 7.42 Variación de la tensión de compresión a lo largo de la banda para distancia rodillo A.C-entrehiero de 500mm y posición vertical de 100mm.

En la Figura 7.43 se representa la tensión de compresión en función del desplazamiento vertical a lo largo de la mitad del ancho de banda para una distancia al entrehiero de 676mm y una posición vertical de 100mm. Se compara con una función polinómica de grado dos para determinar donde se concentran las tensiones de compresión y de que magnitud. Se ve claramente una diferencia con respecto a la magnitud de las tensiones para una distancia de 500mm, Figura 7.42.

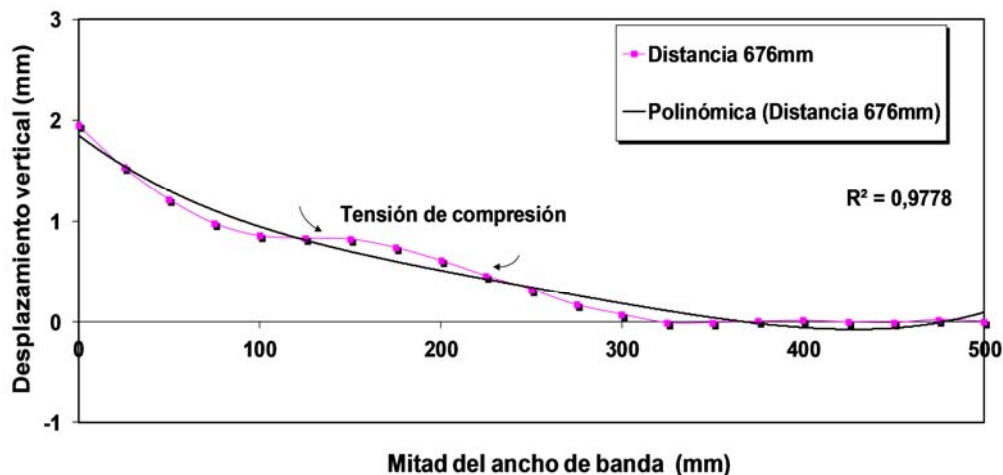


Figura 7.43 Variación de la tensión de compresión a lo largo de la banda para distancia del rodillo A.C.-entrehiero de 676mm y posición vertical de 100mm.

7.4.3 CONCLUSIONES ANÁLISIS DINÁMICO

Como resultado de los análisis realizados en el estudio dinámico de la influencia de la posición vertical, horizontal al entrehierro, diámetro y corona del rodillo anti-crimping se presenta a continuación un resumen de las conclusiones alcanzadas.

7.4.3.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA POSICIÓN VERTICAL DEL RODILLO ANTI-CRIMPING

A continuación se presenta la optimización global de la posición vertical del rodillo anti-crimping, para el análisis dinámico, de acuerdo a los tres criterios establecidos y considerados de manera simultánea en la simulación del modelo numérico.

Los valores establecidos como de partida en el estudio y fijados para el estudio son:

- Distancia horizontal del rodillo anti-crimping al entrehierro de 676mm.
- Valor nominal del radio del rodillo anti-crimping y punto de partida para la optimización del mismo de 137,5mm.

Hay tres rangos de la posición vertical del rodillo anti-crimping a estudio:

- Optimización de la Planitud, $\delta\sigma_{\text{centro-borde}}$ (MPa): [0,150mm] y [250, >300]
- Optimización de la tensión de compresión transversal (MPa):[80, 200mm]
- Optimización de la curvatura:[80, 150mm]

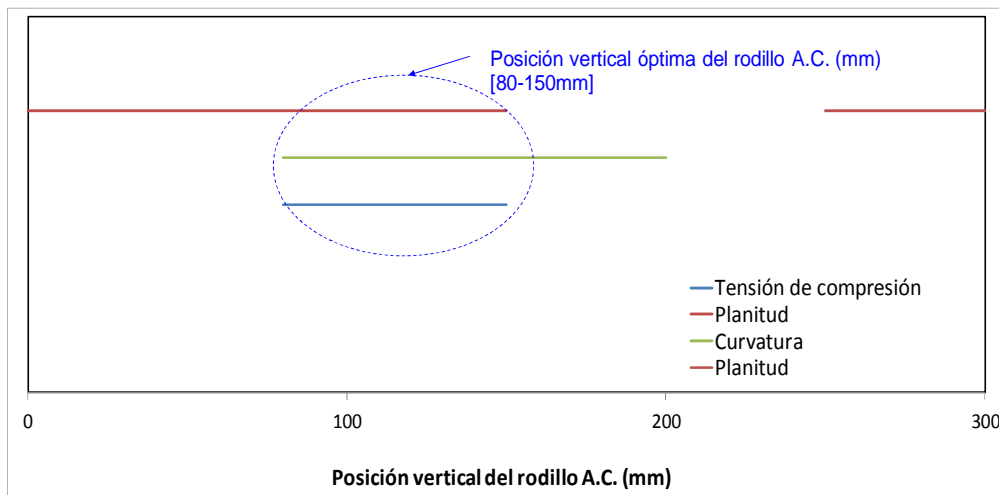


Figura 7.44 Rangos de optimización de la planitud, tensión de compresión y curvatura en función de la posición vertical del rodillo anti-crimping. Análisis dinámico.

Como se puede observar en la Figura 7.44 la posición vertical óptima del rodillo anti-crimping donde se minimizan los tres criterios considerados de gran importancia para la temperización de la banda de hojalata, planitud, curvatura de la banda y tensión de compresión transversal está en el rango [80, 150mm].

7.4.3.2 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA DISTANCIA DEL RODILLO ANTI-CRIMPING AL ENTREHIERRO

A continuación se presenta la optimización global de la distancia al entrehierro del rodillo anti-crimping, para el análisis dinámico, de acuerdo a los tres criterios establecidos y considerados de manera simultánea en la simulación del modelo numérico.

Los valores establecidos como de partida en el estudio y fijados para el estudio son:

- Posición vertical del rodillo anti-crimping de 100mm.
- Valor nominal del radio del rodillo anti-crimping de 137,5mm.

Hay dos rangos de la distancia del rodillo anti-crimping al entrehierro, en función del rango óptimo de posición vertical del rodillo, a estudio:

- Optimización de la Planitud, $\delta_{\text{centro-borde}}$ (MPa):

- Para una distancia de 500mm al entrehierro:[0,140mm] y [250, >300]
- Para una distancia de 676mm al entrehierro:[0,150mm] y [250, >300]
- Optimización de la curvatura:
 - Para una distancia de 500mm al entrehierro:[60,140mm]
 - Para una distancia de 676mm al entrehierro:[80,150mm]

7.5 ANÁLISIS MEDIANTE MINERÍA DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

7.5.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar un modelo utilizando técnicas de tratamiento de datos, es preciso

1. que se introduzcan datos correctos y lo más exentos de ruido posible, y
2. que se disminuya en lo posible la complejidad del problema, es decir, que se reduzcan el número de variables consideradas.

El garantizar que los datos son correctos requiere un trabajo exhaustivo de recopilación y filtrado de la información. Será preciso comprobar que la transmisión de datos no produce errores, que no existen sensores desajustados, etc. Esta tarea es un esfuerzo de comprobación de rangos de valores y de uso de técnicas estadísticas sencillas, por lo que no es relevante explicar los métodos usados. Detallar los métodos es el objetivo del segundo apartado de este capítulo.

Reducir el número de variables implicadas en el problema se aborda utilizando dos tipos de técnicas. En primer lugar se utilizan técnicas enfocadas a la selección de variables. Además, se usarán técnicas de proyección que intentan disminuir las dimensiones de un conjunto de datos para obtener su representación bidimensional. Aunque no se obtenga un resultado analítico, sí se logran importantes observaciones sobre la relevancia de ciertas variables. Estas técnicas serán explicadas en el tercer apartado.

Para el tema que nos ocupa la selección de las variables ha sido llevado a cabo de manera exhaustiva, empíricamente, como se puede comprobar en los apartados previos de este trabajo. De esta forma el espacio de variables a emplear en el desarrollo de futuros modelos se reduce a las contempladas: posición horizontal, posición vertical, tensión de compresión, radio y curvatura de

la banda. Por tanto para este trabajo no fue precisa la aplicación de técnicas de reducción dimensional ni de proyección bidimensional.

Una vez que se han determinado las variables más relevantes para el modelo, es necesaria una técnica que permita extraer la información subyacente en los datos recogidos y que implemente el modelo. Los splines regresivos multiadaptativos son la herramienta más adecuada para la consecución de estos modelos tipo “caja negra”. En el apartado de materiales y métodos del presente capítulo introduce esta técnica, detallando dentro del amplio campo que constituyen el tipo de algoritmo utilizado en este trabajo.

7.5.2 MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS

7.5.2.1 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ESPÚREOS

7.5.2.1.1 DETECCIÓN DE ESPÚREOS MEDIANTE LAS DISTANCIAS DE MAHALANOBIS

Este análisis es válido únicamente para muestras normales multivariantes.

Los espúreos (también llamados comúnmente “outliers”) son aquellas muestras cuya disposición espacial resulta sensiblemente extraña frente al comportamiento general del conjunto. Barnett y Lewis definieron al outlier como “una observación (o subconjunto de observaciones) que parecen ser inconsistentes con el resto de ese conjunto de datos”. La aparente inconsistencia puede ser causada por la contaminación de las muestras recogidas por datos procedentes de una distribución de distinta naturaleza, o ser valores extremos de la distribución original. Este alejamiento del comportamiento general puede ser debido bien a errores de muestreo, con lo que habría que eliminar dicha observación, o bien puede darse el caso de que tal observación represente un comportamiento del sistema que si bien es raro e infrecuente no puede ser despreciado en los análisis.

El mayor problema que plantea la detección de estos puntos es el enmascaramiento. Este efecto se produce cuando existe un número considerable de observaciones espúreas concentradas en una zona concreta. Parece claro que el algoritmo de identificación tendrá cierta dificultad a la hora de discernir entre las dos situaciones que pueden presentarse; bien puede ser que sean observaciones perjudicadas por ruidos, o bien es posible que realmente esas observaciones, dado su número, constituyan un grupo característico de comportamiento diferenciado.

El análisis de detección debe ser realizado dentro de cada clase. No puede ser de otra manera dado que las diferencias entre grupos pueden ser apreciables y un punto típico de una clase, con toda probabilidad tenga un comportamiento claramente anómalo frente a otra clase distinta a la suya.

Este estudio fundamentará la detección de espúreos en la distribución estadística que siguen las distancias generalizadas de Mahalanobis. Si X , matriz de observaciones muestrales, sigue una distribución normal multivariante (N observaciones de n componentes), se puede definir la distancia de Mahalanobis de la observación x_j al centro de la muestra como se indica en la ecuación (7.3).

$$d_j^2 = (x_j - \bar{x})S^{-1} (x_j - \bar{x})^t \quad (7.3)$$

Los N valores de las distancias d_j^2 siguen una distribución X^2 con n grados de libertad. Si una muestra concreta se caracteriza por una distancia superior a la dada por la distribución X^2 para un determinado nivel de confianza, puede aceptarse la clasificación de esa muestra como espúrea.

7.5.2.1.2 DETECCIÓN DE ESPÚREOS MEDIANTE LOS AUTOVALORES DE LA MUESTRA

Este análisis es válido únicamente para muestras normales multivariantes.

En el análisis de componentes principales se determinaron las variables no correladas entre sí que en mayor medida influyen en el comportamiento de la variable a explicar. De las n dimensiones se consideran habitualmente r , ($r < n$) componentes que expliquen suficientemente el modelo por ser las más significativas. Para la observación j expresada en sus componentes principales x_{jk} , la suma de los cuadrados de sus componentes principales divididas entre su varianza, ecuación (7.4), coincide con la distancia de Mahalanobis de la observación al centro geométrico de la muestra. Si se considera la suma parcial de la última $(p - r)$ componente de la ecuación (7.5), se determina cuantitativamente la proporción en la que la variación correspondiente a la observación j se distribuye en las últimas componentes. Si para una determinada observación, la variación se distribuye preferentemente entre estas últimas componentes, significa que esta observación es un espúreo respecto a la estructura de correlación. Si la variación en una observación está dominada,

en su mayor parte, por estas últimas componentes, esto indica que la observación considerada es claramente diferente al resto de observaciones

$$\sum_{k=1}^n \frac{x_{jk}^2}{\lambda_k} \quad (7.4)$$

$$s \sum_{k=r+1}^n \frac{x_{jk}^2}{\lambda_k} \quad (7.5)$$

Se puede hacer un gráfico de control con confianza $(1 - \alpha)100\%$ representando el valor de la ecuación (7.6), de los autovalores no considerados. En este gráfico, aquellos puntos que quedan por encima del nivel de referencia marcado por el valor $X_{n-r}^2(\alpha)$ representan observaciones espúreas.

$$T_j^2 = \sum_{k=r+1}^n \frac{x_{jk}^2}{\lambda_k} \quad (7.6)$$

7.5.2.1.3 MÉTODOS ROBUSTOS DE DETECCIÓN

Los métodos tradicionales, como el de las distancias de Mahalanobis, son incapaces de proporcionar alta fidelidad en sus resultados ante la presencia de múltiples outliers. Pueden fallar sin previo aviso y deben ser remplazados por otros más robustos. Los estimadores más frecuentemente utilizados, como la media, la matriz de covarianzas, la matriz \hat{H} procedente de la regresión lineal, o las distancias de Mahalanobis, se basan en que un determinado estadístico supere un valor umbral. Estos métodos pueden llegar a proporcionar resultados inadecuados ante la presencia de múltiples outliers, debido a la posible distorsión que se produce en las medidas de ubicación central y dispersión. De no emplear estimadores robustos de estos indicativos, puede darse el caso de que las observaciones atípicas aparenten ser correctas (efecto de enmascaramiento), o bien pueden parecer espúreas aquellas observaciones que son “buenas” y pertenecen a la estructura general mayoritaria de comportamiento (efecto de encharcamiento).

Los algoritmos robustos siguen la misma filosofía básica de los tradicionales pero substituyen determinados aspectos por sus homólogos robustos. Los métodos robustos generan análogos de la matriz de covarianzas, mientras que los no robustos utilizan la matriz original. Todos los métodos necesitan conocer una medida fiable del centro de la estructura, pues todos ellos restan el vector de medias a cada observación. Los outliers múltiples distorsionan la posición de este centro. Ejemplo de esto puede ser el caso, por ejemplo, de sustituir la media por la mediana y la desviación típica por la desviación absoluta mediana, que muestran insensibilidad a la presencia de espúreos múltiples. Estos estimadores de centralidad y forma muestran mal comportamiento cuando el número de observaciones es pequeño, si bien ello no tiene especial importancia en el caso de la modelización de procesos industriales donde, por lo general, se cuenta con una vasta colección de observaciones. La estimación robusta de centro y forma es una de las áreas más complicadas en la estadística robusta

Para medir la efectividad de un método de detección de outliers, se suele utilizar el valor del “breakdown point”, o punto de derrumbamiento, que indica la fracción de outliers necesario para que el estadístico en cuestión pierda fiabilidad. Por ejemplo, el breakdown point de la media es $1/n$ para n muestras, que tiende a cero a medida que aumenta el valor de n .

En estos últimos años, se han planteado otros métodos, más robustos, basados en el PCA de la matriz de covarianzas. Gnanadeskan y Kettering utilizaron la primera y las últimas componentes principales para detectar outliers. Las primeras componentes principales se distorsionan con observaciones que inflan las varianzas, y las últimas son afectadas por observaciones que obstaculizan el reconocimiento de una matriz mal condicionada. No obstante, ningún método tradicional no robusto basado en el PCA puede detectar correctamente outliers múltiples, puesto que las propias componentes principales se ven afectadas por la estimación sesgada de la matriz de covarianzas.

Campbell utilizó M-estimadores, que minimizan otras funciones de influencia distintas a la suma de cuadrados de los residuos e iterativamente repondrán las muestras, calculando una estimación robusta de la media y de la matriz de covarianzas. Deving desaconsejó el uso de los estimadores - M, que tienen un punto de ruptura inferior a $\frac{1}{p+1}$, para poblaciones p - dimensionales, y propuso la utilización del “recorte multivariante elipsoidal”, (ellipsoidal multivariate trimming o MVT) caracterizado, según Deving, por un punto de ruptura igual a la fracción de recorte utilizada en el método. Sin embargo, Donoh y Gasko argumentaron

que MVT, así como el peeling de la superficie elipsoidal tienen puntos de ruptura no mayores que $\frac{1}{p+1}$, lo que compromete seriamente estos métodos. Rousseuw partió del concepto de la mediana y extendió la metodología hacia una técnica de regresión robusta, least median squares. Atkinson sugirió aplicar el LMS sobre subconjuntos y posteriormente aplicar sobre los residuos técnicas como los residuos normalizados o el estadístico de Cook modificado. También se han propuesto métodos modernos que utilizan computación evolutiva para la detección de outliers. Estos métodos típicamente involucran cálculos de muy lenta realización.

Dos métodos con los que se han obtenido excelentes resultados son el elipsoide de mínimo volumen (MVE) o el determinante de mínima covarianza (MCD), sin embargo, tal y como Woodruff y Rocke han señalado "... los algoritmos actuales requieren un esfuerzo computacional no razonable en dimensión alta...", especialmente el MVE. A continuación se describen algunos de estos métodos robustos.

7.5.2.1.3.1 Método MVT

Para el recorte multivariante se calcula la distancia de Mahalanobis de cada muestra. Un porcentaje fijo de las observaciones de mayor distancia se retira del proceso, iterando hasta que las sucesivas matrices de covarianzas estabilicen, o hasta que un porcentaje total predeterminado de las observaciones sea retirado. Las muestras restantes permiten calcular el vector de medias y la matriz de covarianzas. Sin embargo, como el método depende de las distancias de Mahalanobis, está caracterizado por las mismas debilidades que éste frente a outliers múltiples.

7.5.2.1.3.2 Método MCD

En el método MCD se seleccionan aleatoriamente subconjuntos de los datos (de tamaño $N/2$) y se calcula el determinante de cada matriz de covarianzas. El determinante de la matriz es el producto de sus valores propios y mide el volumen p - dimensional de la estructura del proceso. El subconjunto con el menor determinante (distinto de cero) es entonces utilizado para generar una matriz de covarianzas desde la que se calculen las distancias de Mahalanobis para detectar los outliers.

7.5.2.1.3.3 Método RHM (resampling half means)

En éste método, como en el anterior, se seleccionan aleatoriamente y sin reemplazo, subconjuntos de los datos (de tamaño $N/2$), calculándose, para cada uno de estos subconjuntos, el vector de medias y la matriz de covarianzas. Estos estimadores de ubicación y forma permiten calcular las distancias de Mahalanobis del conjunto general de los datos, lo que proporciona un vector columna que contiene la distancia de cada observación al origen. Los outliers se detectan observando la distribución de estos vectores columna. Aquel subconjunto que no contuviera outliers presentará medidas en este vector columna superiores al resto.

7.5.2.1.3.4 Método SHV (smallest half-volume)

En este método se calculan las distancias entre observaciones, definida esta por la expresión (7.7), obteniendo una matriz de distancias simétrica y con ceros en la diagonal. Cada columna de la matriz se ordena en orden creciente. Para cada columna se realiza la suma de los $N/2$ distancias menores. La columna con menor valor de este indicador corresponderá a las observaciones más similares, las que más interiormente se encuentran en la estructura de los datos de proceso, y que por tanto pueden ser consideradas para obtener los estimadores de ubicación y forma.

$$l_{ij} = \sqrt{\sum (x_i - x_j)^2} \quad (7.7)$$

7.5.2.1.3.5 Método de Hadi

Este método propuesto por Hadi considera N observaciones de n variables. En principio se calcula el valor de C_M , vector de medianas de las variables, y matriz de covarianzas respecto a C_M , ecuación (7.8)

$$S_M = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{(x_i - C_M) (x_i - C_M)^T\} \quad (7.8)$$

Se reordenan las observaciones atendiendo a un estimador aproximado de la distancia de cada observación hacia el centro de la muestra, como muestra la

expresión (7.9) y se calculan unos nuevos estimadores C_R y S_R , de forma análoga salvo que únicamente considerando aquellas $N/2$ observaciones de menor distancia $D_i(C_M, S_M)$. Con estos valores de C_R y S_R se está en condiciones de calcular las distancias de cada observación al centro de la muestra, expresión (7.10).

$$D_i(C_M, S_M) = \sqrt{(x_i - C_M)^\tau S_M^{-1} (x_i - C_M)}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7.9)$$

$$D_i(C_R, S_R) = \sqrt{(x_i - C_R)^\tau S_R^{-1} (x_i - C_R)}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7.10)$$

Una vez reordenado en orden creciente de acuerdo a estas distancias se divide el conjunto de las observaciones en dos subconjuntos iniciales. El subconjunto básico contiene $(n + 1)$ observaciones, las más internas respecto a esta primera ordenación de distancias. El subconjunto básico es utilizado para obtener los estimadores de centro y forma para la siguiente iteración, en la que se selecciona un nuevo subconjunto básico con las $(n + 2)$ observaciones más cercanas atendiendo a estos estimadores obtenidos del subconjunto básico de la iteración anterior. Se itera hasta alcanzar cierto criterio de parada, como puede ser la obtención de un porcentaje determinado de observaciones en el subconjunto no básico, que son consideradas desde ese momento, por tanto, espúreos.

7.5.2.1.3.6 Método de por Rocke & Woodruff

Estos autores destacan y prueban como los outliers de más difícil detección son aquellos cuya estructura comparte matriz de covarianzas con la estructura general del proceso. Para intentar detectarlos proponen un método híbrido que aúna la búsqueda aleatoria para mínimo volumen de Rousseauw con los métodos de Atkinson.

Estructuran su algoritmo en dos fases principales. La primera determina estimadores robustos de ubicación y forma. La segunda utiliza estos estimadores para detectar outliers.

Fase I: Computación robusta híbrida con T segundos disponibles.

1. Eliminar cualquier duplicación exacta de las observaciones.
2. Desordenar aleatoriamente los puntos.
3. Subdividir los datos en un número determinado Q , dependiente de la dimensión de subconjuntos, y en cada una de ellas realizar:
 - a. Emplear $\frac{T}{Q}$ segundos en obtener elipsoides de mínimo determinante de la matriz de covarianzas.
 - b. Utilizar el algoritmo de mínimo determinante de la matriz de covarianzas como punto de partida para una adición secuencial de puntos, según el método de Hadi.
 - c. Utilizar este resultado como punto de arranque para el uso de M-estimadores, usando toda la muestra, con lo que se obtienen estimaciones robustas de ubicación y forma.

Fase 2: Escalado y determinación de espúreos.

1. Determinar por simulaciones el punto de corte L_{α_1} de tal manera que al emplear la “fase 1” sobre estas muestras simuladas normales multivariantes, se obtenga una fracción α_1 determinada de observaciones por encima de este punto de corte.
2. Determinar la nueva matriz de covarianzas dad por la expresión (7.11)

$$\frac{F_{\lambda_{n+2}}^2(X_{n;1-\alpha}^2)}{1-\alpha_1} S, \quad (7.11)$$

donde S es la matriz de covarianzas de los puntos de la muestra con distancia menor a L_{α_1} , y el nuevo vector de medias.

3. Identificar como espúreos los puntos cuya distancia sea superior a lo indicado en la ecuación (7.12), generalmente $\alpha_1 = \alpha_2$.

$$X_{n;1-\alpha^2}^2 \quad (7.12)$$

7.5.2.2 SPLINES REGRESIVOS MULTIVARIANTES ADAPTATIVOS – (MARS)

Un problema común en muchas disciplinas es la adecuada aproximación de funciones de muchas variables, conocido únicamente el valor de dicha función en un reducido grupo de puntos del espacio de la variable independiente y, a menudo, perturbado por el ruido. El objetivo es encontrar el modelo de dependencia entre la variable respuesta y las variables de entrada x_{1, \dots, x_n} una vez que se han realizado unas muestras $\{y_i, x_{i1}, \dots, x_{in}\}_1^N$. El sistema que genera los datos se puede describir como muestra la expresión (7.13), sobre un dominio $(x_1, \dots, x_n) \in D \subset \mathbb{R}^n$, el cual, contiene los datos.

$$y = f(x_1, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (7.13)$$

Donde la función f relaciona la variable de salida con las variables de entrada y ε es el ruido estocástico. El objetivo del análisis de regresión es encontrar una función $\tilde{f}(x_1, \dots, x_n)$ que sirva como una razonable aproximación de $f(x_1, \dots, x_n)$ sobre el dominio D de interés.

Para ello se considera un tipo de funciones denominadas funciones básicas B_m de la forma (7.14).

$$B_m(x) = I[x \in R_m] \quad (7.14)$$

Donde I es una función que toma el valor 1 si el argumento es cierto, y el valor 0 en caso contrario. Los $\{a_m\}_1^M$ son los coeficientes de expansión cuyos valores son ajustados para obtener una buena adaptación a los datos. Los $\{R_m\}_1^M$ son las subregiones de espacio donde está definida la función. Si estas subregiones son disjuntas, sólo una función básica es distinta de 0 para cada x .

La principal limitación del método anterior es su falta de continuidad entre subregiones vecinas. Esta falta de continuidad limita severamente la precisión de la adaptación. Para conseguir modelos continuos, con derivadas continuas, se desarrolló el método de splines regresivos adaptativos (Multivariable Adaptive Regressive Splines, MARS).

El único aspecto que introduce discontinuidades en el modelo es la función escalón. Si se reemplaza esta función por otra que sea continua, el algoritmo 1 debería de producir modelos continuos. La función elegida para reemplazar a la función escalón es un spline.

Las dos partes de la división de la función básica tienen la forma (7.15), donde t^n es la localización del nodo, q_s es el orden del spline, y el subíndice indica la parte positiva del argumento.

$$b_q^\pm (x - t^n) = [\pm (x - t^n)]_+^{q_s} \quad (7.15)$$

Para $q_s > 0$ la aproximación por splines es continua, y con $q_s - 1$ derivadas continuas.

Las funciones escalón son un caso particular en que los splines son de grado cero, $q_s = 0$.

Este método produce unas funciones básicas son el producto de splines univariantes. Estas funciones básicas tienen la forma(7.16).

$$B_m^{(q)} (x) = \prod_{k=1}^{k_m} [S_{k_m} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{k_m})] \quad (7.16)$$

Es decir, reemplazando las funciones escalón por splines de grado q_s , se consiguen modelos continuos, con $q_s - 1$ derivadas continuas.

El modelo MARS se escribe de la siguiente forma (7.17).

$$\tilde{f}(x) = a_0 + \sum_{k_m=1} f_i (x_i) + \sum_{k_m=2} f_{ij} (x_i, x_j) + \sum_{k_m=3} f_{ijk} (x_i, x_j, x_k) + L \quad (7.17)$$

El primer sumatorio contiene todas aquellas funciones que dependen de una sola variable. El segundo contiene las funciones básicas que dependen de dos variables, y representa las interacciones entre dos variables. El tercer sumatorio representa la contribución de las interacciones entre tres variables, y así sucesivamente.

Sea la expresión (7.18) el conjunto de variables asociada con la función básica m , $B_m(x)$. Cada función del primer sumatorio puede ser expresada por la ecuación (7.19).

$$V(m) = \{v(k, m)\}_1^{k_m} \quad (7.18)$$

$$f_i(x_i) = \sum_{\substack{K_m=1 \\ i \in V(m)}} a_m B_m(x_i) \quad (7.19)$$

Esto es la suma de todas las funciones básicas que envuelven solamente la variable x_i y es el spline que representa la función univariante correspondiente.

Cada función bivariante del segundo sumatorio puede ser expresada por la ecuación (7.20).

$$f_i(x_i, x_j) = \sum_{\substack{K_m=2 \\ (i,j) \in V(m)}} a_m B_m(x_i, x_j) \quad (7.20)$$

Lo cual representa la suma de todas las funciones básicas que envuelven un determinado par de variables x_i y x_j . Sumándole la correspondiente contribución univariante para esas mismas variables se tendrá la expresión (7.21).

$$f_{ij}^*(x_i, x_j) = f_i(x_i) + f_j(x_j) + f_{ij}(x_i, x_j) \quad (7.21)$$

Esta expresión representa el conjunto de la contribución bivariante de x_i y x_j al modelo. Procediendo de la misma manera se obtienen las contribuciones de los términos correspondientes a grupos de tres variables y más variables.

7.5.3 ELIMINACIÓN DE ESPÚREOS

El resultado de aplicar el algoritmo de eliminación basado en los autovalores de la muestra resultó ser poco sensible y eliminar datos que a priori podían considerarse no sólo válidos sino también descriptores de la evolución del proceso. Por tanto los resultados obtenidos por dicho algoritmo fueron

descartados en primera instancia. Para el mismo grupo de datos empleado en los ejemplos puede verse una representación gráfica de los resultados en la Figura 7.45.

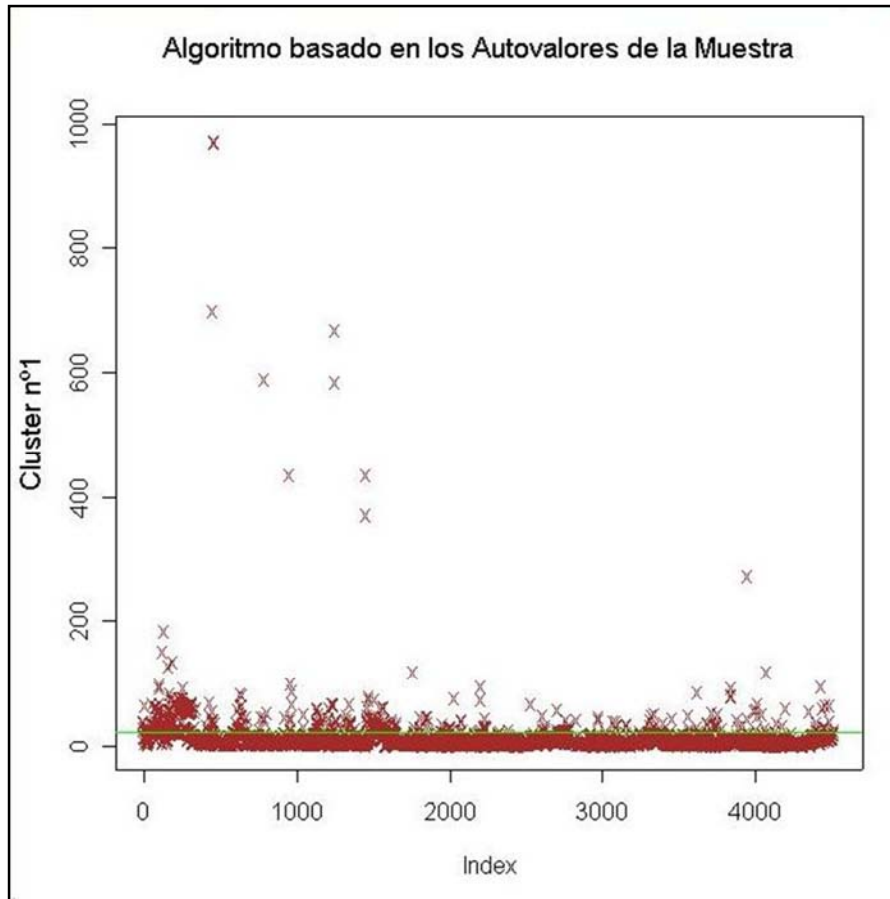


Figura 7.45 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo basado en los Autovalores de la Muestra

El segundo algoritmo aplicado, el más robusto de los dos puesto que no precisa de la condición de normalidad, es una mejora del algoritmo propuesto por Hadi[] llevada a cabo por el propio Ali S. Hadi[] en colaboración con Nedret Billor y Paul F. Velleman; este algoritmo es conocido con el nombre de BACON (Blocked Adaptive Compttionally eficiente Outier Nominators).

Existen dos versiones del algoritmo, una de ellas basa su funcionamiento en las distancias de Mahalanobis y la otra en las distancias Euclídeas, del entorno de datos multivariante. La eficiencia de ambas versiones es similar y muy

superior a los métodos clásicos, entre ellos el aplicado al conjunto de datos basado en los autovalores de la muestra

Una representación gráfica de los resultados obtenidos puede apreciarse en las Figura 7.46 y Figura 7.47 donde la diferencia entre dichos resultados es escasa. Un estudio detenido de los datos identificados como espúreos manifestó que se trataban de situaciones muy alejadas del régimen normal de funcionamiento para el régimen de trabajo al que pertenecían pero no tanto para otras situaciones reales de funcionamiento. Dichos datos se eliminaron de la muestra y almacenaron para una posterior validación del modelo.

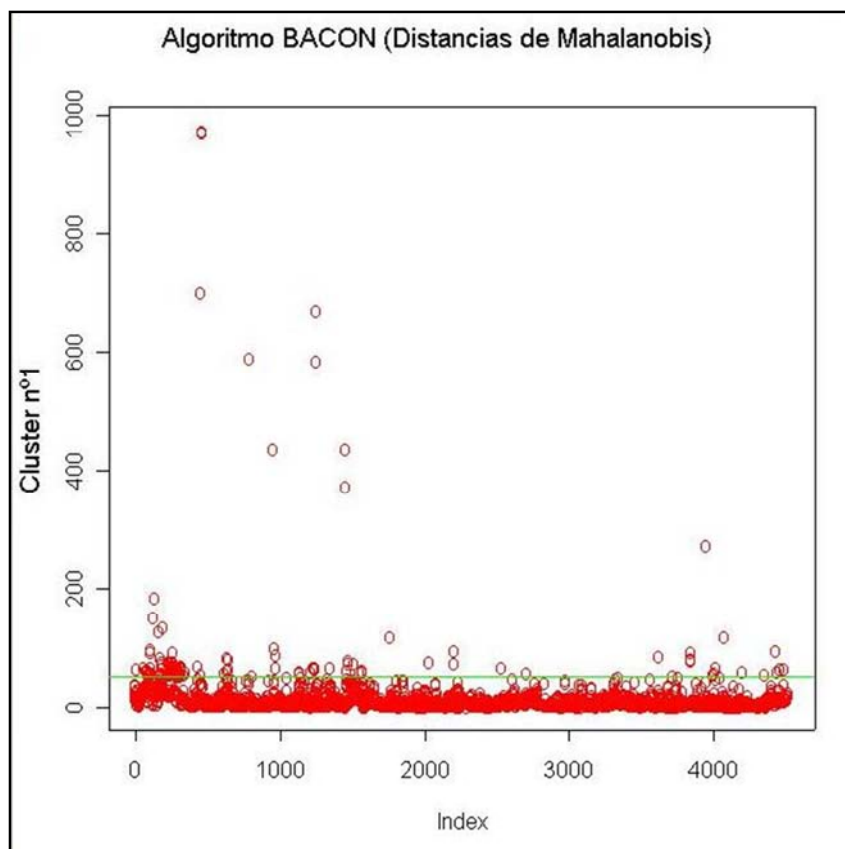


Figura 7.46 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo BACON (Distancias de Mahalanobis).

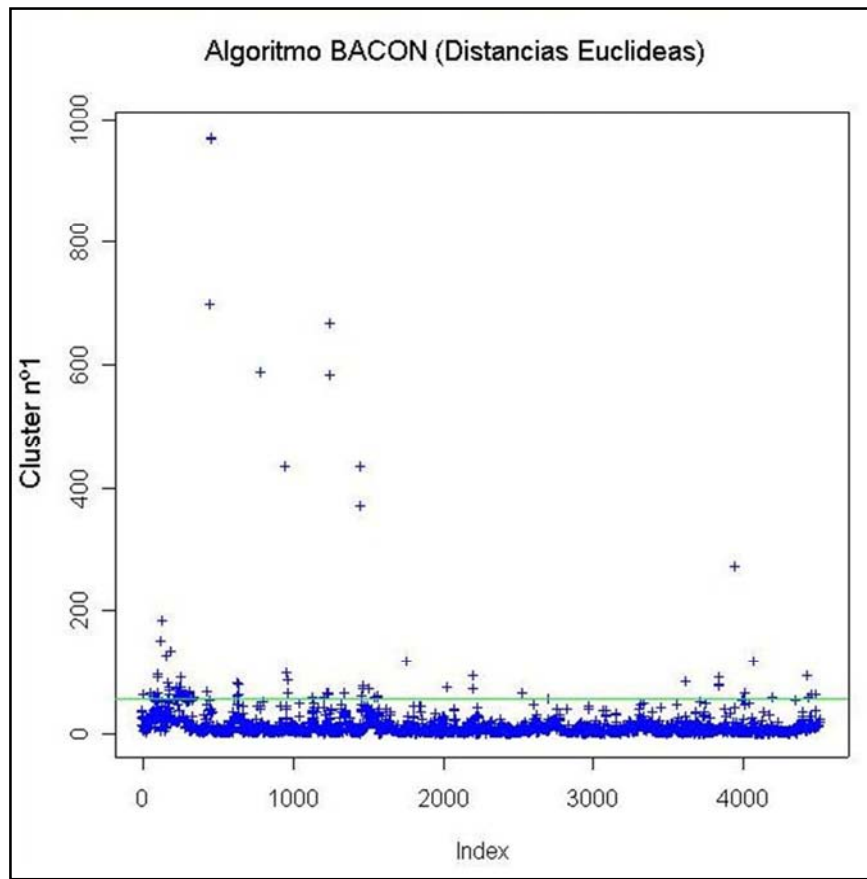


Figura 7.47 Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo BACON (Distancias Euclídeas).

Llegados a este punto se dispone de una selección de variables que describen con razonable certeza el entorno de trabajo, así mismo se han eliminado aquellos datos que parecían ajenos a un adecuado funcionamiento. El siguiente paso consiste pues en la determinación de un modelo inteligente que se ajuste a las necesidades del proceso.

7.5.3.1 DESARROLLO DEL MODELO

El objetivo del presente apartado es generar unos modelos que de manera automática y a partir de datos disponibles en planta, generen valores óptimos de Radio, Posición vertical y Curvatura. Permitiendo la automatización del proceso en condiciones óptimas de trabajo.

7.5.3.1.1 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL RADIO

En un primer momento se llevó a cabo la implementación de un modelo OptR empleando el algoritmo MARS, descrito anteriormente en el apartado 14.2.2 y tomando como variables de entrada las identificadas como relevantes en el apartado 13 (Tensión, Planitud y rRadio). El objetivo del presente modelo es identificar de entre un rango de valores de radio posibles cuales optimizan las variables de tensión de compresión transversal y planitud.

A dicho modelo se le proporciona como datos de partida los obtenidos en los ensayos de producción llevados a cabo durante el año 2008. Para la posterior validación del modelo se usaron los datos recogidos durante el periodo Enero-Marzo de 2009.

Tras realizar un entrenamiento exhaustivo con validación cruzada se obtuvo una ecuación como la que se muestra en la ecuación recogida en la Tabla 7-3 con un ajuste del 97% y una evolución de las variables Tcomp, Planitud y Radio como las que se muestran en la Figura 7.48.

Tabla 7-3 Ecuación del modelo de optimización del Radio.

OptR =	0,35	- 0,019	* pmax (0, R – 260)
		- 0,00045	* pmax (0, 260 – R)
		+ 0,1	* pmax (0, Planitud – 63)
		+ 0,042	* pmax (0, 63 – Planitud)
		- 0,13	* pmax (0, Planitud – 74)
		- 6,6	* pmax (0, Tcompr – 0,11)
		+ 0,55	* pmax (0, 0,11 – Tcompr)
		- 0,0039	* pmax (0, R – 180) * pmax(0, Planitud – 74)
		+ 0,0012	* pmax (0, 180 – R) * pmax(0, Planitud – 74)
		- 0,033	* pmax (0, R – 220) * pmax(0, Planitud – 74)
		- 0,029	* pmax (0, R – 280) * pmax(0, Planitud – 63)
		- 0,00089	* pmax (0, 280 – R) * pmax(0, Planitud – 63)
		- 1,5	* pmax (0, R – 240) * pmax(0, Tcompr – 0,11)
		+ 0,13	* pmax (0, 240 – R) * pmax(0, Tcompr – 0,11)
		+ 0,45	* pmax (0, R – 260) * pmax(0, Tcompr – (-0,13))
		+ 0,077	* pmax (0, Planitud – 75) * pmax(0, 0,11 – Tcompr)
		- 0,011	* pmax (0, 75 – Planitud) * pmax(0, 0,11 – Tcompr)

En la ecuación recogida en la Tabla 7-3 la función pmax genera una condición, función de la variable dependiente en la que el rango de valores de dicha variable dependiente hace que el término de la ecuación tome diferentes valores, por ejemplo: Para el caso que nos ocupa y fijándonos en los dos primeros términos de la ecuación, si la variable “R” –radio- toma valores mayores a 260, la expresión adoptaría la forma de la ecuación (7.22).

$$\text{OptR} = 0.35 - 0.00045 * (260 - R) + \dots \quad (7.22)$$

Si por el contrario “R” tomara valores inferiores a 260, la expresión adoptaría la forma de la ecuación (7.23).

$$\text{OptR} = 0.35 - 0.00045 * (260 - R) + \dots \quad (7.23)$$

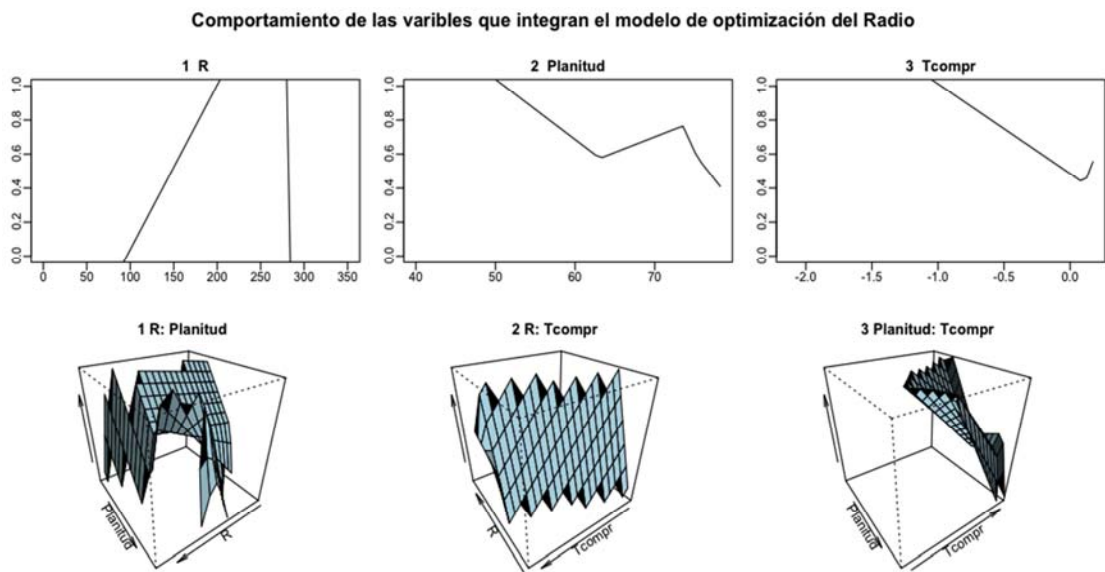


Figura 7.48 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización del Radio.

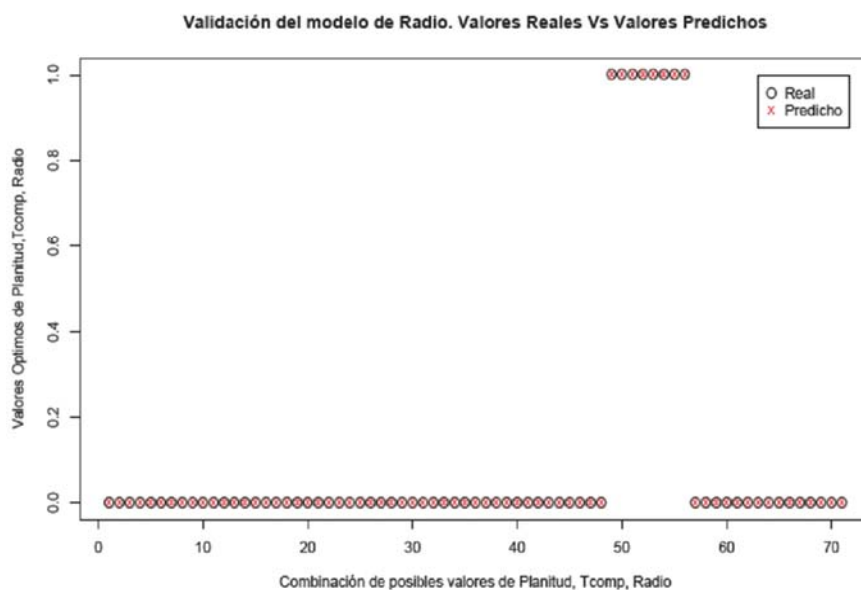


Figura 7.49 Validación del modelo de Radio. Valores Reales vs Valores Predichos.

En la Figura 7.49 puede apreciarse la respuesta del modelo ante valores de las variables de entrada no empleados en el proceso de entrenamiento. En concreto dicha figura hace referencia a los datos registrados “en el periodo de tres meses” y en ella se puede apreciar la alta precisión del mismo.

7.5.3.1.2 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA POSICIÓN VERTICAL

En un primer momento se llevó a cabo la implementación de un modelo OptPv empleando el algoritmo MARS descrito anteriormente en el apartado 14.2.2 y tomando como variables de entrada las identificadas como relevantes en el apartado 13 (Tensión, Planitud y rRadio). El objetivo del presente modelo es identificar de entre un rango de valores de radio posibles cuales optimizan las variables de tensión de compresión transversal y planitud.

A dicho modelo se le proporciona como datos de partida los obtenidos en los ensayos de producción llevados a cabo durante el año 2008. Para la posterior validación del modelo se usaron los datos recogidos durante el periodo Enero-Marzo de 2009.

Tras realizar un entrenamiento exhaustivo con validación cruzada se obtuvo una ecuación como la que se muestra en Tabla 7-4 con un ajuste del 97% y una evolución de las variables Tcomp, Planitud y Radio como las que se muestran en la Figura 7.50.

Tabla 7-4 Ecuación del modelo de optimización de la Posición Vertical.

OptPv =	0,027	- 7,8e-0,5	* pmax (0, Pv – 100)
		- 0,00087	* pmax (0, 100 – Pv)
		- 2,1	* pmax (0, Planitud – 77)
		+ 7,2e-0,5	* pmax (0, 77 – Planitud)
		- 12	* pmax (0, Tcompr – (-0,81))
		- 0,047	* pmax (0, Pv – 240) * pmax(0, Planitud – 77)
		+ 0,053	* pmax (0, 240 – Pv) * pmax(0, Planitud – 77)
		+ 0,0076	* pmax (0, Pv – 100) * pmax(0, Tcompr – (-0,68))
		- 0,00032	* pmax (0, Pv – 100) * pmax(0, (-0,68) – Tcompr)
		+ 0,14	* pmax (0, Pv – 180) * pmax(0, Tcompr – (-0,81))
		+ 0,45	* pmax (0, 180 – Pv) * pmax(0, Tcompr – (-0,81))
		+ 0,48	* pmax (0, 77 – Planitud) * pmax(0, Tcompr – (-0,84))
		+ 0,017	* pmax (0, 77 – Planitud) * pmax(0, -0,84 – Tcompr)
		- 18	* pmax (0, Planitud – 77) * pmax(0, Tcompr – (-0,68))
		+ 18	* pmax (0, Planitud – 77) * pmax(0, -0,68 – Tcompr)
		- 82	* pmax (0, Planitud – 77) * pmax(0, Tcompr – -0,66)
		- 8,8	* pmax (0, 77 – Planitud) * pmax(0, Tcompr – (-0,78))

Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Posición Vertical

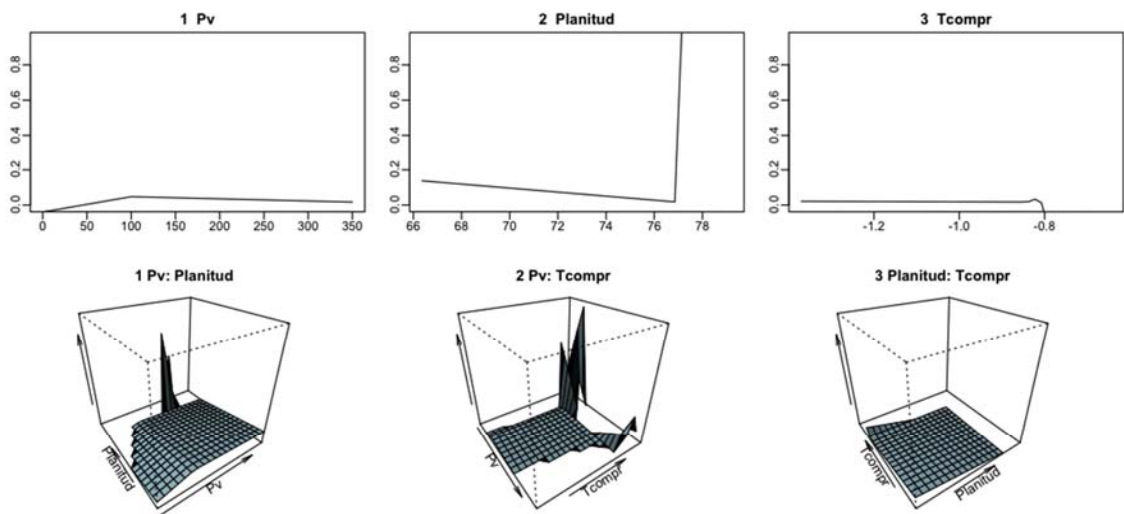


Figura 7.50 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Posición Vertical.

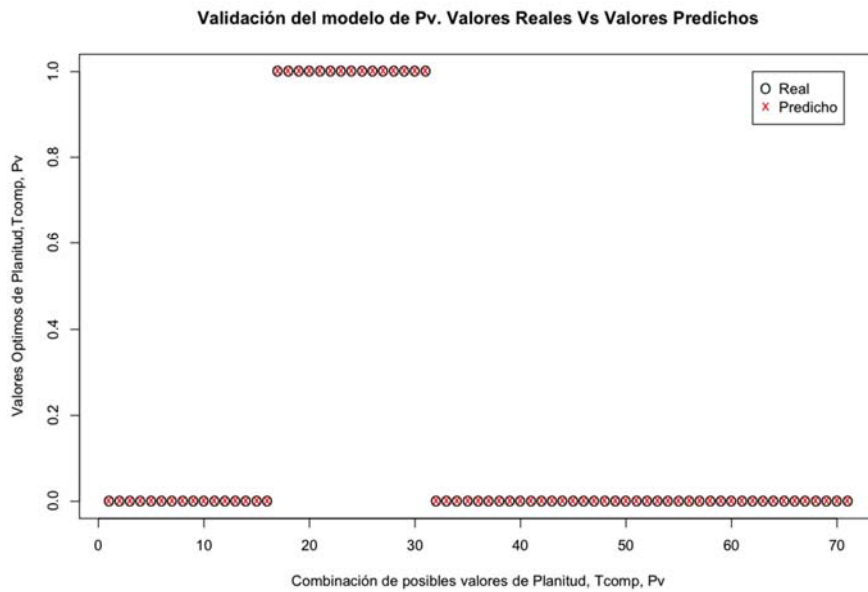


Figura 7.51 Validación del modelo de Posición vertical. Valores Reales vs Valores Predichos.

En la Figura 7.51 puede apreciarse la respuesta del modelo ante valores de las variables de entrada no empleados en el proceso de entrenamiento. En concreto dicha figura hace referencia a los datos registrados “en el periodo de tres meses” y en ella se puede apreciar la alta precisión del mismo.

7.5.3.1.3 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA CURVATURA

En un primer momento se llevó a cabo la implementación de un modelo OptC empleando el algoritmo MARS descrito anteriormente en el apartado 14.2.2 y tomando como variables de entrada las identificadas como relevantes en el apartado 13 (Tensión, Planitud y rRadio). El objetivo del presente modelo es identificar de entre un rango de valores de radio posibles cuales optimizan las variables de tensión de compresión transversal y planitud.

A dicho modelo se le proporciona como datos de partida los obtenidos en los ensayos de producción llevados a cabo durante el año 2008. Para la posterior validación del modelo se usaron los datos recogidos durante el periodo Enero-Marzo de 2009.

Tras realizar un entrenamiento exhaustivo con validación cruzada se obtuvo una ecuación como la que se muestra en Tabla 7-5 con un ajuste del 97% y una evolución de las variables Tcomp, Planitud y Radio como las que se muestran en la Figura 7.52.

Tabla 7-5 Ecuación del modelo de optimización de la Curvatura.

OptC =	1,2	- 1,1	* pmax (0, Planitud – 81)
		+ 54	* pmax (0, Tcompr – (-0,031))
		- 0,67	* pmax (0, -0,031 – Tcompr)
		- 3,9	* pmax (0, Desplaz_vertical – 1,8)
		- 1,3	* pmax (0, 1,8 – Desplaz_vertical)
		- 0,092	* pmax (0, Pv – 240) * pmax(0, Planitud – 81)
		+ 0,01	* pmax (0, 240 – Pv) * pmax(0, Planitud – 81)
		+ 2,7	* pmax (0, Pv – 240) * pmax(0, Tcompr – (-0,031))
		- 0,63	* pmax (0, 240 – Pv) * pmax(0, Tcompr – (-0,031))
		+ 0,94	* pmax (0, Pv – 60) * pmax(0, Desplaz_vertical – 1,8)
		- 0,74	* pmax (0, 60 – Pv) * pmax(0, Desplaz_vertical – 1,8)
		+ 7,4	* pmax (0, 81 – Planitud) * pmax(0, Tcompr – (-0,031))
		+ 0,0016	* pmax (0, 81 – Planitud) * pmax(0, -0,031 – Tcompr)
		- 116	* pmax (0, 81 – Planitud) * pmax(0, Tcompr – 0,043)
		- 0,76	* pmax (0, Planitud – 78) * pmax(0, 1,8 – Desplaz_vertical)
		- 0,045	* pmax (0, 78 – Planitud) * pmax(0, 1,8 – Desplaz_vertical)
		+ 56	* pmax (0, -0,031 – Tcompr) * pmax(0, Desplaz_vertical – 1,9)
		+ 2,7	* pmax (0, -0,031 – Tcompr) * pmax(0, 1,9 – Desplaz_vertical)

Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Curvatura

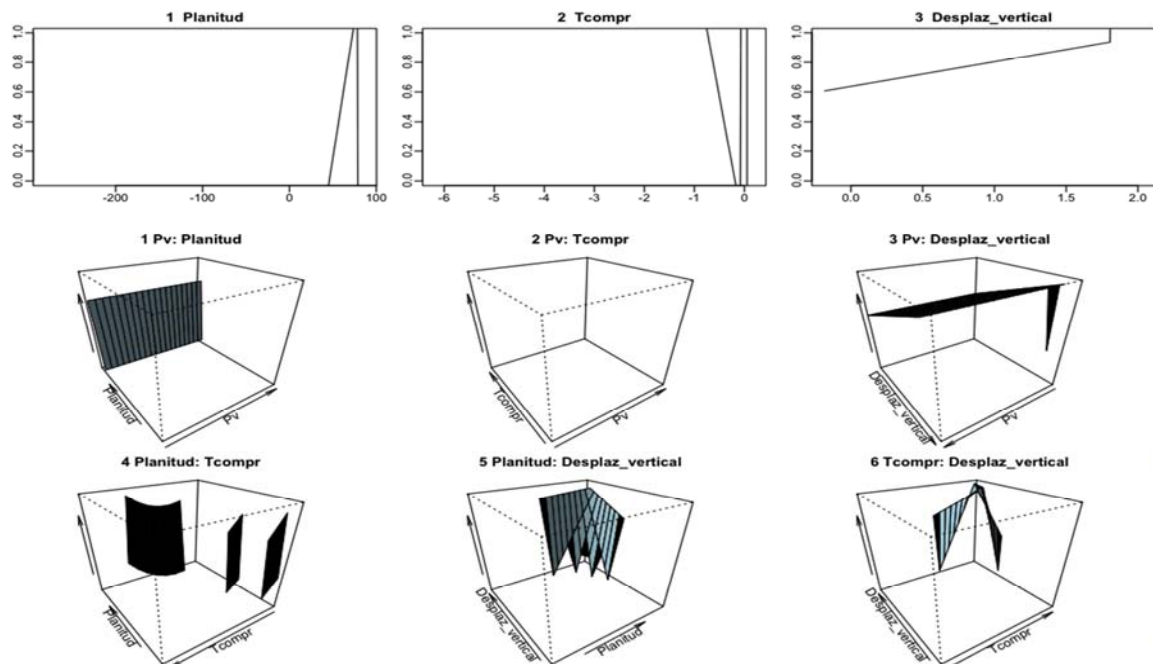


Figura 7.52 Comportamiento de las variables que integran el modelo de optimización de la Curvatura.

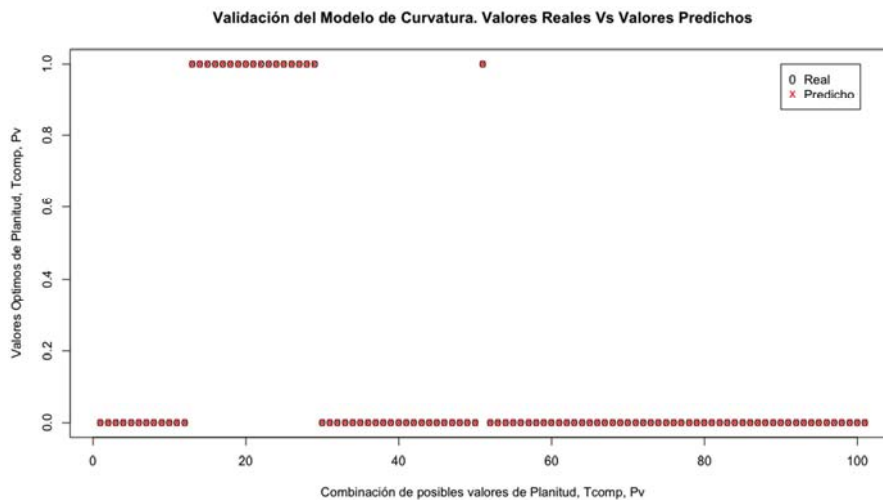


Figura 7.53 Validación del Modelo de Curvatura. Valores Reales vs Valores Predichos.

En la Figura 7.53 puede apreciarse la respuesta del modelo ante valores de las variables de entrada no empleados en el proceso de entrenamiento. En concreto dicha figura hace referencia a los datos registrados “en el periodo de tres meses” y en ella se puede apreciar la alta precisión del mismo.

7.5.3.1.4 REQUISITOS HARDWARE

El pretratamiento de los datos según son recibidos de la línea se ha realizado en un ordenador personal Intel i7®, con un disco duro de 1TB, y 8 Gb de memoria, funcionando bajo entorno Windows 7 de 64 bits.

Tanto para la aplicación de los algoritmos de selección de variables, como la generación de patrones para el entrenamiento de las redes y el entrenamiento en sí mismo, así como para la ejecución de las simulaciones, se ha utilizado una estación de trabajo intel Xeon con seis núcleos, con una velocidad de reloj de 2,4GHz, un disco duro de 5TB, y 64GB de memoria. Sería posible realizar el trabajo en cualquier otro tipo de sistema bajo entorno Linux, tales como estaciones Hewlett-Packard, Silicon Graphics (SGI).

7.5.3.1.5 REQUISITOS SOFTWARE

Para los algoritmos de proyección y depuración de datos se ha utilizado la herramienta de dominio público R (<http://www.r-project.org>) compilado para sistemas Unix y Windows.

Además se han utilizado otra serie de programas menores con el fin de obtener cierta información de los datos, o conocer el número de aciertos de las redes entrenadas.

El sistema operativo utilizado en la estación Intel-Xeon, ha sido el Ubuntu 12.04 LTS.

7.5.3.1.6 CONCLUSIONES

Se ha presentado en este capítulo la operativa realizada a la hora de llevar a cabo la implementación de los modelos propuestos, del estudio de los datos obtenidos por el modelo de Radio, posición vertical y curvatura de la banda y su posterior contraste con los datos actuales introducidos manualmente por los operarios, se pueden resumir los resultados en las siguientes conclusiones.

- El seguimiento de la línea mejora como consecuencia de la automatización. El sistema almacena de forma automática y no manual los datos, suprimiendo los posibles errores de transcripción o cualquier tipo de error debido al factor humano.
- Se alarga la vida de los cilindros, no sólo por el uso de menores fuerzas sino también debido a la menor fluctuación en la fuerza a aplicar, evitando los cambios bruscos que se obtienen en el sistema actual y asegurándose siempre unos niveles de rugosidad mínimos acorde a la demanda.
- Con la automatización del modelo obtenemos todas las bandas de iguales características con acabados similares, debido al cálculo automatizado de fuerzas y tensiones, objetivo que manualmente no es viable.

En conclusión se puede decir que el modelo supone un paso adelante muy significativo para el avance de los sistemas avanzados de modelización en trenes de laminación y concretamente en el skin-pass, además de suponer una mejora inmediata por la introducción de bases de datos de procesos que permiten posteriores análisis y evitan subjetividades

7.5.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS BASADO EN MINERÍA DE DATOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La técnica alternativa a emplear consta de tres etapas: recopilación y filtrado de los datos, selección de las variables más relevantes y aplicación de redes neuronales para la obtención de un modelo tipo “caja negra”.

Dentro de las técnicas disponibles para la selección de las variables se han escogido algunas que representan distintas aproximaciones al problema. El algoritmo univariante es el método más sencillo y rápido. Aunque está gravemente limitado al no considerar las relaciones que las variables tienen entre sí, supone una buena primera aproximación que permite simplificar detectando variables cuya relación con la salida es relativamente sencilla.

El método de la covarianza múltiple tiene en cuenta las relaciones entre las variables. Naturalmente, el coste computacional es mucho más elevado que en el caso anterior. El algoritmo del mínimo error es semejante al anterior.

El método MARS utiliza funciones construidas a partir de splines que de forma incremental van incorporando los efectos de agrupamiento de dos, tres y más variables. El método proporciona, además, una gráfica bidimensional no lineal con la relación entre las variables que considera más relevantes y la salida.

Otro acercamiento más intuitivo consiste en proyectar un espacio n -dimensional sobre dos dimensiones. El método de proyección seleccionado es conocido como método de Sammon. Este método mantiene la distancia relativa entre los datos y permite observar en el gráfico la distribución relativa de los datos y los agrupamientos presentes en los mismos. La composición de estos agrupamientos permite detectar las relaciones entre las variables.

Una vez seleccionadas las variables más relevantes, la técnica utilizada para inferir el modelo a partir de los datos son las redes neuronales. Una red neuronal es una estructura compuesta por pequeñas unidades de procesamiento dotadas de memoria local. Parece una estructura sencilla, pero gracias a su capacidad de proceso en paralelo tiene una gran capacidad.

Se han desarrollado muchos tipos de redes neuronales, que se aplican preferentemente a problemas de clasificación. En casos como el aquí presentado, una simulación de un proceso industrial, el tipo de red más adecuado es el perceptrón multicapa. La capa oculta le permite seguir funciones no lineales. El aprendizaje o entrenamiento de la red, corrección de los pesos de las neuronas para adecuar la red al sistema a simular, se realiza utilizando el algoritmo de retropropagación de manera supervisada. Para el entrenamiento se requiere un conjunto de datos de entrada y sus correspondientes datos de salida, de forma que los pesos de las neuronas se ajusten para que la red refleje el comportamiento real del sistema.

CAPÍTULO 8

APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8 APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8.1 APORTACIONES

De los resultados obtenidos en el presente trabajo, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Se ha analizado y caracterizado el defecto superficial identificando zona de aparición tanto dentro de la banda, como dentro del proceso y el tipo de regulación que lo origina.
- Se han identificado las variables responsables de la aparición del defecto superficial objeto de estudio, que son: posición horizontal y vertical, radio y corona del rodillo anti-crimping, planitud, tensión de compresión transversal y curvatura de la banda.

- Con el objeto de simplificar la implementación del sistema se ha empleado un modelo matemático clásico para reducir el número de variables independientes, siendo finalmente seleccionadas la posición horizontal y vertical, radio y corona del rodillo anti-crimping. Posteriormente se ha determinado el rango de operación de estas variables donde no se genera el defecto superficial buscando la optimización de la planitud, tensión de compresión transversal y curvatura de la banda.
- Así mismo se ha demostrado a través de los resultados del presente estudio que el proceso de skin-pass es modelable mediante técnicas basadas en inteligencia artificial.
- El modelo inteligente basado en splines adaptativos regresivos permite la eliminación del defecto superficial a través del control dinámico de determinados parámetros del proceso con un alto grado de precisión y eficiencia.
- Los modelos generados se han validado para diferentes composiciones de aceros, habiéndose constatado fehacientemente la completa eliminación del defecto superficial objeto de la presente tesis.

8.1.1 ASPECTO ECONÓMICO

Desde la fase inicial del estudio ha sobresalido la repercusión económica que genera el rechazo por pliegue laminado. La magnitud económica no solo se ve reflejada en el rechazo de material al final de la cadena de producción, material con un gran valor añadido, sino que igualmente tiene un gran impacto sobre el rendimiento y producción de fábrica.

Al ver la cantidad de años desde la detección del defecto y no haber podido encontrar solución de eliminación del mismo la estimación del costo económico es como se muestra en la Figura 8.1:

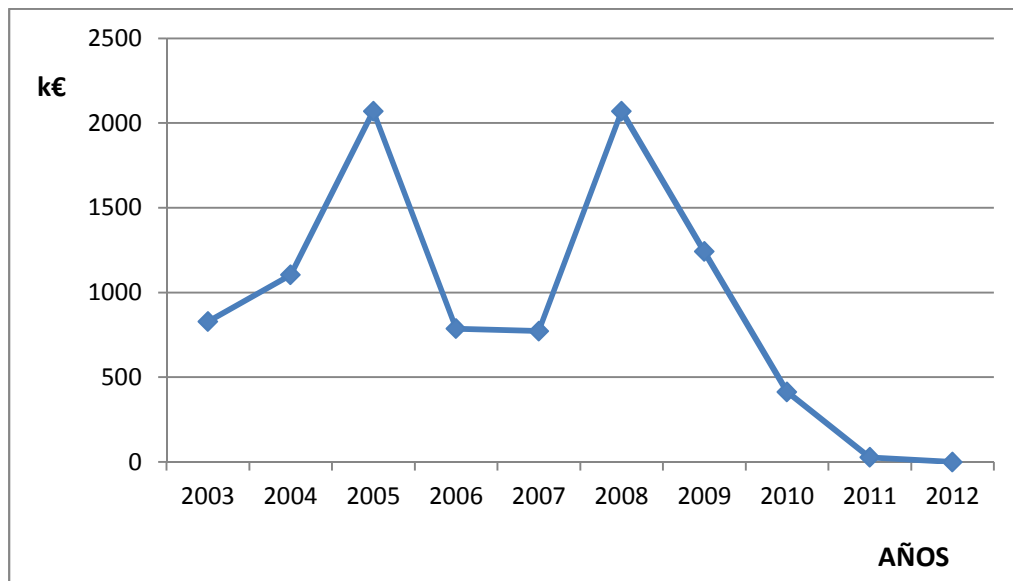


Figura 8.1 Estimación económica del rechazo por el defecto de pliegue.

Por lo tanto, desde el punto de vista de la implicación económica se aporta la evidencia científica de una mejora, cuantificada económicamente, gracias a la utilización de este modelo presentado.

8.2 LÍNEAS FUTURAS

Como consecuencia del trabajo desarrollado en la presente tesis emergen nuevas líneas de actuación en las que se considera muy adecuado profundizar:

- La implementación del modelo en el sistema global de regulación que permita integrar las medidas on-line procedentes del proceso, con el fin de formar un sistema cerrado de computación.
- Extender el estudio para otro tipo de defectos con el objeto de minimizar rechazos.
- Por último la adaptación del modelo como herramienta de diseño de aceros de modo que, integrado con los modelos metalúrgicos, facilite información adicional para el diseño del proceso a realizar con objeto de lograr de forma óptima y efectiva unos determinados requisitos de cliente.

ANEXO I

VARIABLES DEL SISTEMA SOFTDETECT

VARIABLES DEL SISTEMA SOFTDETECT

Nº	Nombre	Muestreo	Unidades	Descripción
1	FO1	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador Caja 1
2	FM1	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor Caja 1
3	FO2	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador Caja 2
4	FM2	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor Caja 2
5	FO3	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador Caja 3
6	FM3	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor Caja 3
7	FO4	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador Caja 4
8	FM4	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor Caja 4
9	FO5	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador Caja 5
10	FM5	2 KHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor Caja 5
11	VC1	2 KHz	m/ min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 1
12	VC2	2 KHz	m/ min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 2

Análisis y evaluación del proceso de skin-pass del acero de hojalata para la eliminación del defecto superficial de pliegue

13	VC3	2 KHz	m/ min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 3
14	VC4	2 KHz	m/ min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 4
15	VC5	2 KHz	m/ min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 5
16	T12	2 KHz	Tm	Tensión cajas 1-2
17	T23	2 KHz	Tm	Tensión cajas 2-3
18	T34	2 KHz	Tm	Tensión cajas 3-4
19	T45	2 KHz	Tm	Tensión cajas 4-5
20	AC1	2 KHz	g	Acelerómetro caja 1
21	AC2	2 KHz	g	Acelerómetro caja 2
22	AC3	2 KHz	g	Acelerómetro caja 3
23	AC4	2 KHz	g	Acelerómetro caja 4
24	AC5	2 KHz	g	Acelerómetro caja 5
25	RXE	2 KHz	e(%)	Rayos X entrada caja 1
26	RX1	2 KHz	e(%)	Rayos X salida caja 1
27	RX2	2 KHz	e(%)	Rayos X salida caja 2
28	RX5A	2 KHz	e(%)	Rayos X salida caja 5 (A)
29	RX5B	2 KHz	e(%)	Rayos X salida caja 5 (B)
30	nAinf1	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 1
31	nAinf2	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 2
32	nAinf3	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 3
33	nAinf4	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 4
34	nAinf5	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 5
35	nAsup1	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 1
36	nAsup2	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 2
37	nAsup3	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 3
38	nAsup4	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 4
39	nAsup5	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 5
40	nTinf1	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 1
41	nTinf2	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 2
42	nTinf3	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 3
43	nTinf4	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 4
44	nTinf5	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 5
45	nTsup1	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 1
46	nTsup2	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 2
47	nTsup3	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 3
48	nTsup4	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 4
49	nTsup5	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 5

Análisis y evaluación del proceso de skin-pass del acero de hojalata para la eliminación del defecto superficial de pliegue

50	dAinf1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 1
51	dAinf2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 2
52	dAinf3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 3
53	dAinf4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 4
54	dAinf5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 5
55	dAsup1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 1
56	dAsup2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 2
57	dAsup3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 3
58	dAsup4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 4
59	dAsup5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 5
60	dTinf1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 1
61	dTinf2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 2
62	dTinf3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 3
63	dTinf4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 4
64	dTinf5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 5
65	dTsup1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 1
66	dTsup2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 2
67	dTsup3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 3
68	dTsup4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 4
69	dTsup5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 5
70	EspE	1 x bob.	μm	Espesor de entrada
71	Esp12	1 x bob.	μm	Espesor caja 1-2
72	Esp23	1 x bob.	μm	Espesor caja 2-3
73	Esp34	1 x bob.	μm	Espesor caja 3-4
74	Esp45	1 x bob.	μm	Espesor caja 4-5
75	EspS	1 x bob.	μm	Espesor de salida
76	Bob	1 x bob.		Id. Bobina
77	Ancho	1 x bob.	mm	Espesor de salida
78	Fecha	1 x bob.		Fecha laminación
79	Hora	1 x bob.		Hora laminación
80	Mat	1 x bob.		Tipo de material laminado
81	CalC_03	1 x bob.		Porcentaje de bob. Dentro tolerancia
82	LAsup1	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo superior caja 1
83	LAsup2	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo superior caja 2
84	LAsup3	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo superior caja 3
85	LAsup4	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo superior caja 4
86	LAsup5	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo superior caja 5

Análisis y evaluación del proceso de skin-pass del acero de hojalata para la eliminación del defecto superficial de pliegue

87	LAinf1	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo inferior caja 1
88	LAinf2	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo inferior caja 2
89	LAinf3	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo inferior caja 3
90	LAinf4	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo inferior caja 4
91	LAinf5	1 Hz	km	Long. lam. cil. Apoyo inferior caja 5
92	LTrab1	1 Hz	km	Long. lam. cil. trabajo caja 1
93	LTrab2	1 Hz	km	Long. lam. cil. trabajo caja 2
94	LTrab3	1 Hz	km	Long. lam. cil. trabajo caja 3
95	LTrab4	1 Hz	km	Long. lam. cil. trabajo caja 4
96	LTrab5	1 Hz	km	Long. lam. cil. trabajo caja 5
97	Slip_1	1 Hz	%	Deslizamiento caja 1
98	Slip_2	1 Hz	%	Deslizamiento caja 2
99	Slip_3	1 Hz	%	Deslizamiento caja 3
100	Slip_4	1 Hz	%	Deslizamiento caja 4
101	Slip_5	1 Hz	%	Deslizamiento caja 5
102	Bend_1	1 Hz	Tm	Bending caja 1
103	Bend_2	1 Hz	Tm	Bending caja 2
104	Bend_3	1 Hz	Tm	Bending caja 3
105	Bend_4	1 Hz	Tm	Bending caja 4
106	Bend_5	1 Hz	Tm	Bending caja 5
107	ConAD	1 Hz	%	Concentración emulsión aplicación directa
108	TaAD	1 Hz	°C	Temp. Emulsión
109	TaAgua	1 Hz	°C	Temp. Agua refrig.
110	TaBanda	1 Hz	°C	Temp. banda entrada
111	Ta34	1 Hz	°C	Temp. banda cajas 3-4
112	Ta45	1 Hz	°C	Temp. banda cajas 4-5
113	RefC_1	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 1
114	RefC_2	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 2
115	RefC_3	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 3
116	RefC_4	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 4
117	RefC_5	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 5
118	Refl_1	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 1
119	Refl_2	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 2
120	Refl_3	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 3
121	Refl_4	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 4
122	Refl_5	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 5
123	C_03	1 Hz	%	Porcentaje bobina dentro tolerancia

ANEXO II

GLOSARIO DE TERMINOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACERÍA

Acería o convertidor al oxígeno (Basic Oxygen Furnace: BOF): Consiste en un horno periforme recubierto interiormente con ladrillos refractarios que refina y convierte en acero el arrabio fundido de un alto horno y la chatarra (hasta un 30%) en menos de 45 minutos. Reemplazaron a los hornos Siemens-Martin (década de los 50), los cuales requerían de cinco a seis horas para procesar el metal.

Tras el depósito de la chatarra en el horno, se vacía el metal fundido proveniente del alto horno. Dela parte superior baja una lanza que inyecta oxígeno a alta presión que propicia reacciones químicas que separen las impurezas tales como gases y escoria. Una vez refinado, el acero líquido es vaciado agregándole las ferroaleaciones y separado de la escoria.

Acero aleado (AlloySteel): Se considera que una mezcla con base de hierro es acero aleado cuando uno o más de sus componentes supera un cierto porcentaje a saber: manganeso 1,65%, silicio 0,5%, cobre 0,6% u otra cantidad mínima de elementos aleantes como el cromo, níquel, manganeso, molibdeno o tungsteno.

Acero de alto carbono (High-CarbonSteel): Acero con más de 0,3% de carbono. Mientras mayor es la cantidad de carbono disuelta en el hierro, el acero se torna menos moldeable y más duro. La dureza del acero de alto carbono lo hace adecuado para discos de arados, palas, filos cortantes u otras aplicaciones de alto desgaste.

Acero de bajo carbono (Low-CarbonSteel): Acero con menos de 0,05% de carbono. Es más dúctil (maleable) y tiene la capacidad de ser formado o laminado a un espesor delgado para uso en aplicaciones de carrocerías automotrices. El carbono es eliminado del baño de acero mediante desgasificación al vacío.

Acero de horno eléctrico al silicio (SiliconElectricalSteel): Tipo de acero especial creado mediante la introducción de silicio en el BOF durante el proceso de fabricación del acero. El acero de horno eléctrico presenta propiedades magnéticas, las cuales lo hacen óptimo para uso en transformadores, generadores, y motores eléctricos.

Acero endurecido al horno (BakeHardenableSteel): Acero dulce laminado en frío utilizado para aplicaciones en paneles de carrocería automotriz. Debido a su procesamiento especial, posee buenas características de embutido y resistencia, y una vez que la pintura se ha cocido en horno, presenta una mayor resistencia a las abolladuras.

Acero estructural (Structurals): Grandes perfiles de acero que se utilizan para el armazón de un edificio. En esta clasificación se incluyen, entre otros elementos, vigas I, vigas H, y vigas de ala ancha.

Acero galvanizado (GalvanizedSteel): Acero revestido de una fina capa de zinc para hacerlo resistente a la corrosión en partes automotrices sumergidas, tarros de basura, estanques de almacenamiento, o alambres para cercados. Previo a la etapa de galvanizado la plancha de acero normalmente debe laminarse en frío.

Acero inoxidable (StainlessSteel): Acero que contiene más de 10% de cromo con o sin otros elementos aleantes. El acero inoxidable resiste la corrosión y tiene un vasto uso en productos automotrices y de procesamiento de alimentos, como también en equipamiento médico y de salud.

Acero libre de estaño (Tin-Free Steel): Acero cromado. Debido a su uso en envases de alimentos, al igual que el estañado, paradójicamente se le clasifica como el producto hojalata. Este acero cromado es más fácil de reciclar que la hojalata.

Acero libre intersticial (Interstitial Free Steel): Producto siderúrgico desarrollado recientemente, con niveles muy bajos de carbono. Se utiliza principalmente en aplicaciones automotrices de formado. La ductilidad mejorada de este acero (capacidad de formado) se hace posible por medio de la desgasificación por vacío.

Acero secundario (SecondarySteel): También conocido como segundas calidades, es acero que no satisface las especificaciones del cliente original debido a un defecto en su composición química, dimensiones o calidad de superficie.

Acondicionamiento de bordes (Edge Rolling-EdgeConditioning): Laminado de una bobina para alisar los bordes. Al eliminar la rebaba de la bobina, la manipulación del material por parte del cliente se toma más segura.

AISI: Instituto Norteamericano del Hierro y del Acero (American Iron and Steel Institute). Es una asociación de las empresas estadounidenses que extraen mineral de hierro y fabrican productos de acero. Existen 43 empresas miembros y 230 miembros asociados en donde se incluyen clientes que distribuyen, procesan o consumen acero.

Alambrón (Rod): Acero redondo, largo semi elaborado que se lamina a alta velocidad a partir de una palanquilla y se enrolla para procesamiento ulterior. Normalmente con el alambrón se da forma a alambres o se utiliza para hacer pernos y clavos.

Alto horno (BlastFurnace): Consiste en una torre revestida interiormente con ladrillos refractarios, utilizado para fundir el hierro del mineral. Su nombre en inglés blast deriva del chorro de gases y aire calientes que se impulsan desde abajo a través de la carga del horno compuesta de mineral de hierro, coque y caliza. Se basa en que bajo una temperatura extrema, las reacciones químicas

entre los ingredientes liberan el hierro líquido desde el mineral. El chorro de aire caliente quema el coque, y la caliza reacciona con las impurezas del mineral formando la escoria. El metal derretido se deposita al fondo del horno. Una vez que se enciende, un alto horno operará en forma continua hasta que necesite un nuevo revestimiento.

Arrabio (PigIron): Nombre dado al hierro fundido producido en un alto horno y que contiene una gran cantidad de carbono (sobre 1,5%). Su nombre en inglés nació cuando el hierro derretido era vaciado en una zanja en el suelo por la cual fluía hacia moldes (cavidades) de barro de baja profundidad. La disposición física de este sistema se asemejaba a lechones recién nacidos.

Artesa (Tundish): Contenedor de baja profundidad con revestido refractario. Se ubica sobre la máquina de colada continua. Recibe el acero líquido desde la cuchara de la acería previo al vaciado, permitiendo al operador regular en forma precisa el flujo de metal al molde.

Baño en caliente: Para obtener acero galvanizado se pasa la banda a través de un baño de revestimiento de zinc derretido, seguido de una corriente de aire que controla el grosor del acabado de zinc.

Barra comercial (Merchant Bar): Son productos redondos, cuadrados, planos, flejes, ángulos y canaletas que los fabricantes, centros de servicios siderúrgicos e industriales cortan, doblan y moldean para crear productos. Por lo general los productos comerciales requieren de un procesamiento y manipulación especializados para satisfacer las necesidades del cliente, de modo que estos productos presentan mayores precios que los productos de acero puramente básicos.

Baterías de coque o coque ría (Coke Oven Battery): Conjunto de hornos que procesan el carbón y lo convierten en coque. Se construyen en grupos de diez a cien hornos, los cuales suelen tener 5 metros de alto, 14 metros de largo y menos de 40 cm de ancho.

Blanking: Un blank es un perfil de una lámina que posee las mismas dimensiones exteriores que la parte especificada (como la puerta o el capó de un automóvil) pero que aún no ha sido embutida.

Bobina laminada en frío (Cold-Rolled Strip/Sheet): El acero laminado en frío es considerablemente más delgado y resistente que el laminado en caliente, de modo que su valor por tonelada es muy superior.

Bobinas (Coils): Son láminas de acero que han sido enrolladas. Un slab, una vez laminado en un TBC, tiene una longitud superior a 400 metros; las bobinas constituyen la forma más eficaz de almacenar y transportar el acero laminado.

Briquetas: Pequeños terrones que se forman al comprimir el material. El HIB (Hot Iron Briquetting, Briqueteo de Hierro en Caliente) es un mineral de hierro concentrado que sustituye al Hierro Reducido Directamente (hierro esponja) o a la chatarra para uso en hornos eléctricos.

Cañería con soldadura a tope (Butt-Weld Pipe): Es la cañería estándar que se utiliza en plomería. La plancha para tubos calentada se pasa en forma continua a través de los rollos soldadores, los que dan forma al tubo y juntan a presión los bordes calientes para generar una soldadura resistente.

Galvalume TM: Plancha de acero con un revestido único de 55% de aluminio y 45% de zinc resistente a la corrosión. El revestimiento se aplica en un proceso continuo de baño en caliente, que mejora la resistencia del acero a la intemperie. Galvalume TM es marca registrada de BHP Steel, y el producto es conocido en el mercado de la construcción metalúrgica.

Hierro briqueteado en caliente (Hot-Briquetted Iron HB/): Hierro esponja que ha sido procesado para formar briquetas. En lugar de utilizar un alto horno, se elimina el oxígeno del mineral usando gas natural. De esto resulta una sustancia que es 90% a 92% de hierro. Puesto que el hierro esponja (DRI) puede hacer combustión espontánea durante su traslado, se prefiere el HBI cuando el material metálico debe ser almacenado o desplazado.

Hierro esponja (Direct-Reduced Iron, DR/): Mineral de hierro procesado que es lo suficientemente rico en hierro para utilizarlo como sustituto de la chatarra en acería en hornos eléctricos. Las impurezas presentes en el mineral de hierro triturado son expulsadas mediante el uso de grandes cantidades de gas natural.

Horas-hombre por tonelada (Man-Hours Per Ton): Medida de la eficiencia de mano de obra. Es el coeficiente de las horas totales trabajadas por empleados siderúrgicos en relación con las toneladas despachadas durante un cierto periodo. Los cambios en el nivel de inventario y el trabajo externo que se contrata afectan a la medición informada.

Horno de balancín (WalkingBeamFurnace): Es un tipo de horno de recalentamiento continuo en donde el slab se desplaza a través de distintas zonas de calentamiento al interior del horno. Al controlar la velocidad pueden lograr temperaturas precisas y consumen menos combustible durante la operación.

Horno eléctrico, de arco voltaico (ElectricArcFurnace, EAF): Horno de acería donde por lo general el 100% de la carga es chatarra. La energía necesaria se suministra en forma de arco que proviene de los electrodos de grafito hacia el baño de metal. Los hornos pueden ser de corriente alterna (AC) o de corriente continua (CC). En estas últimas unidades el consumo de energía y electrodos es menor, no obstante son más caros.

Horno Siemens-Martin (Open-HearthFurnace): Crisol ancho y de baja profundidad para refinar el arrabio o chatarra para su conversión en acero. El calor es suministrado a partir de una llama ubicada sobre la superficie, y el refinado demora de siete a diez horas. El Horno Siemens-Martin ha sido reemplazado por el horno básico al oxígeno.

Instalaciones de acabado (FinishingFacilities): Parte del complejo de la siderúrgica que procesa el acero semielaborado.

Ladrillo refractario (RefractoryBrick): Ladrillo resistente al calor. Debido a que su punto de fundición es muy superior a las temperaturas de operación del proceso, el revestimiento con ladrillos refractarios se encuentra en la mayoría de los contenedores que están en contacto con metal fundido, como las paredes de un alto horno, las partes laterales de un cucharón y el interior de un BOF.

Laminación en frío (ColdReduction): Proceso que se aplica para obtener un el acero más delgado, liso y resistente que el que puede lograrse en caliente. El espesor se reduce de unos 2 a 6 milímetros hasta a veces menos de 0,2 mm y aumentando varias veces su longitud.

Laminador "Steckel" (Stecke/ Mill): Caja reversible con cajas de calentado en cada extremo donde la banda es enrollada, subida su temperatura y enviada de vuelta para facilitar su laminado.

Línea de aplanadora (Levelling Line): Proceso para aplanar cualquier deficiencia en la forma (bordes ondeados y curvaturas) en la lámina, previo al envío definitivo.

Línea de estañado (Tin Mill): Instalación de estañado continuo para producir láminas de acero estañado para uso en envases de alimentos y otros contenedores.

Lingote (Ingot): Un lingote es una forma de acero semi-elaborado. El acero líquido es vaciado en moldes, en donde se solidifica lentamente. Una vez que el acero está sólido se desmolda y los lingotes de 25 a 30 toneladas están listos para el laminado o forjado posterior.

Metales en polvo (Powder Meta/s): Tecnología de fabricación por medio de la cual el polvo metálico fino es compactado a alta presión y luego calentado a una temperatura levemente inferior al punto de fundición a fin de solidificar el material.

Metalurgia en cuchara de colada (Ladle Metallurgy/LME): Procesamiento intermedio del acero que ocurre inmediatamente después de salir del convertidor, pero antes del vaciado, mientras el acero todavía se encuentra en el cucharón. Al recalentar y revolver el acero, se controla la temperatura y composición química a fin de mejorar la calidad del metal.

Mineral de hierro (Iron Ore): Mineral que contiene suficiente hierro para su uso en el horno alto. A excepción de fragmentos de meteoritos encontrados en la tierra, el hierro no es un elemento libre encontrándose en forma de óxido.

Mini-Acerías (Mini-Mills): Normalmente se trata de una instalación que funde acero reciclado en forma de chatarra para generar productos siderúrgicos básicos. Aunque las mini-acerías están sujetas a los mismos requerimientos de procesamiento siderúrgico que las siderúrgicas integradas, difieren en gran medida respecto de tamaño mínimo eficiente, estilos de administración, relaciones laborales y mercados para el producto.

Palanquilla (Billet): Forma de acero semi terminado que se utiliza para productos "largos": barras, canales u otras formas estructurales. Una palanquilla se diferencia de un planchón por sus dimensiones exteriores; las palanquillas son de sección cuadrada y normalmente de 5 a 18 centímetros de arista.

Pelets: Son pequeñas bolas, formado a partir de partículas de mineral de hierro o caliza, que se endurecen mediante calor y presión.

Plancha para tubos (Skelp): Material siderúrgico básico para una fábrica de tubería. Se asemeja a un plano laminado en caliente, no obstante sus

propiedades permiten las exigentes operaciones de soldadura y formado requeridas para la producción de tubos.

Planchas blank a la medida (TailoredBlanks): Sección que es cortada a la medida y preparada a fin de ajustarse con las especificaciones para el diseño de embutido del fabricante. Debido a que el acero sobrante es recortado (para ahorrar en costos de envío), todo lo que le resta hacer al procesador es impartir la forma tridimensional mediante una matriz.

Planchón (Slab): Es el tipo más común de acero semi-elaborado. Los planchones tradicionales miden 25 centímetros de espesor y de 75 a 210 centímetros de ancho (y un promedio de 6 metros de largo), aunque el "planchón delgado", creado recientemente, tiene unos 2 centímetros de espesor.

Productos de uso intensivo de acero (Steel-IntensiveProducts): Productos de consumo como automóviles y artefactos que presentan una alta correlación de demanda con el acero. Debido a que el automóvil promedio de 1300 kilogramos contiene el 53% de ese peso en acero, el incremento en las ventas de autos aumenta la demanda del acero en forma directa.

Productos tubulares de uso petrolero (Oil Country Tubular Goods - OCTG): Nombre aplicado a productos de tubería utilizados en el negocio del petróleo. La tubería de revestimiento, cañería de perforación y tubería de pozos petrolíferos, dependiendo del uso, pueden fabricarse mediante procesos con o sin soldadura.

Q-BOP: Horno Básico al Oxígeno modificado donde el oxígeno y demás gases son impulsados al interior desde el fondo, en lugar de desde la parte superior. Aunque el Q-BOP revuelve el baño de metal en forma más vigorosa, permitiendo un procesamiento más rápido, el diseño produce fundamentalmente los mismos grados de acero que el horno BOF donde el oxígeno es soplado desde arriba. Hoy en día el diseño de hornos de avanzada combina las tecnologías previas: 60% de oxígeno es impulsado desde la parte superior y el resto es impulsado desde el fondo.

Recocido (Annealing): Es un proceso de tratamiento térmico que se aplica a una bobina laminada en frío (la cohesión en la textura del metal se estira cuando se lamina en frío, dejando el acero frágil y quebradizo) para "recristalizar" la estructura de la textura del acero permitiendo que se formen nuevas cohesiones a altas temperaturas. Se aplica calor a la plancha de acero a una temperatura

determinada durante el tiempo suficiente y luego se enfría. Existen dos formas de destemplantar rollos de acero laminados en frío: el proceso batch y el continuo.

Rendimiento (Yield): Relación entre la cantidad de producción de acero terminado con el total de acero en bruto (o líquido) producido. La producción ha mejorado en forma significativa durante las últimas décadas.

Siderúrgica integrada (Integrated Mill): Estas instalaciones fabrican el acero procesando mineral de hierro y otras materias primas en altos hornos.

Sintering: Proceso aplicado al mineral de hierro que combina partículas que contienen hierro -una vez que son recuperadas de los filtros de control ambiental -y las convierte en pequeños pellets.

Sistema de inyección de carbón pulverizado (Pulverized Coal Injection System: PCI): Avance para reducir la dependencia del coque de una acería integrada (debido a problemas ambientales con su producción). Hasta el 30% del combustible que alimenta al alto horno puede ser este polvo de carbón tipo talco, el cual es inyectado a través de toberas ubicadas al fondo del alto horno.

Tolerancias (Tolerances): Las especificaciones de un cliente pueden referirse a dimensiones o a las propiedades químicas del acero que ha pedido. La tolerancia mide la diferencia permisible en las especificaciones del producto entre lo que el cliente pide y lo que la siderúrgica entrega. No existe una tolerancia estándar pues cada cliente mantiene su propio objetivo de varianza. Cuanto menor sea el rango más alto es el coste.

Tren de bandas en caliente (Hot-Strip Mill): Un conjunto de cajas reductoras en línea que permite reducir un slab de 20 a 25 centímetros de espesor en un rollo de acero de menos de 6 milímetros de espesor.

Tren reversible (Reversing Mill): Cajas utilizadas utilizados para reducir el espesor de la lámina de acero haciéndola pasar hacia adelante y hacia atrás entre las cajas.

Tren tándem (Tándem Mill): Es un tipo de laminador que imprime a la bobina mayor resistencia, una superficie pareja y uniforme y un menor espesor. A diferencia de los laminadores simples, un laminador en tándem lamina el acero mediante una serie de laminadores (por lo general de tres a cinco) en fila para lograr la calidad de superficie y espesor deseados.

Tren témpor (TemperMill): Da el acabado a la bobina recocida laminada en frío mediante el mejora del acabado o textura para desarrollar las propiedades mecánicas finales requeridas. Por lo general imprime al acero la textura de superficie (reluciente, opaca o estriada) deseada por el cliente.

CALIDAD

A prueba de errores: Sistema desarrollado por Shingo a partir de 1961, que consiste en incorporar salvaguardas tecnológicos en un proceso para reducir los errores humanos inadvertidos. En el poka-yoke, la detección de un error (mediante contacto material, células fotoeléctricas, interruptores sensibles, etc.) acciona una alarma (luz intermitente, zumbido de sirena, etc.) y/o provoca una acción de prevención (paro automático).

Administración de la calidad total (total qualitymanagement, TQM): Visión integral para que una empresa mejore todos los aspectos de calidad y satisfacción a clientes, incluyendo velocidad de respuesta y servicios. Esta comienza en la alta dirección de la empresa y asigna responsabilidades tales como el control estadístico de procesos (SPC), grupos de acción correctiva, análisis causa-efecto y metodologías para la solución de problemas, entre otros.

Ambiente del negocio: Incluye al mercado, gobierno, clientes, proveedores, economía, competencia, etc.

ANSI: Instituto Nacional de Normas Americanas / American NationalStandarInstitute.

Aseguramiento de calidad: Conjunto de acciones planificadas y sistemáticas implantadas dentro del sistema de la calidad y demostrables si es necesario, para proporcionar la confianza adecuada de que una entidad cumplirá requisitos para la calidad.

Auditoría: Estudio que revisa el pasado, el presente y el futuro de la compañía para ver que cada área de la misma esté logrando los máximos resultados de sus esfuerzos.

Benchmarking: Sistema de información referencial sobre las mejores prácticas de los mejores.

Calibración: El conjunto de operaciones que tienen por finalidad determinar los errores de un instrumento para medir y de ser necesario, otras características metroológicas.

Calidad de especificación: Especificaciones que se emplean como bases en la fabricación de un producto.

Calidad del diseño y de aceptación: Llamada calidad objetivo. Una industria desea crear un artículo con cierto nivel de calidad; de allí la calidad objetivo.

Calidad del producto: La calidad de un producto se puede definir como su capacidad para satisfacer las necesidades y expectativas del consumidor. Se puede definir también como la aptitud para su uso (que sea idóneo para el uso al que está destinado). En las normas internacionales la palabra Calidad esta definida como: Conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades explícitas o implícitas establecidas.

Calidad percibida: Evaluación personal y subjetiva de los productos y/o servicios por parte del consumidor.

Calidad: Conjunto de características de una entidad que le confieren su aptitud para satisfacer tanto necesidades establecidas como implícitas.

CE / EN / EU: Conformidad Europea / Norma Europea / Unión.

Cero defectos: 1.-Término que denota un producto sin defectos. 2.-Lema que se utiliza a veces durante las campañas para mejorar la calidad.

Certificación: Procedimiento por el cual se asegura que un producto, proceso, sistema o servicio se ajusta a las normas o lineamientos o recomendaciones de organismos dedicados a la normalización nacionales o internacionales.

Círculo de calidad: Conjunto de personas organizadas para resolver sistemáticamente problemas relacionados con su trabajo y/o para mejorar la Calidad. Su finalidad es prevenir y no repetir errores.

Cliente: Quién recibe un producto o un servicio o cualquier persona sobre la que repercute el producto o el proceso. Los clientes pueden ser externos (no son

miembros de la empresa que produce el producto que les afecta) o internos (afectados por un producto fabricado por su propia empresa).

Competencia: Organizaciones que hacen los mismos productos/servicios o sustitutivos.

Competitividad: Concepto identificado con optimización de los recursos y sustentado en el principio de racionalidad económica.

Control de calidad total (TQC): Sistema de métodos de producción que genera bienes o servicios de calidad, acorde con los requisitos de los consumidores. Es desarrollar, diseñar, manufacturar y mantener un producto de calidad que sea el más económico, el más útil y siempre satisfactorio para el consumidor.

Control del proceso: Es la evaluación sistemática del comportamiento de un proceso y la ejecución de acciones correctoras en el caso de no conformidad.

Control estadístico del proceso (SPC): La sistemática evaluación del comportamiento del proceso y la sistemática aplicación de las acciones de corrección necesarias. Generalmente la evaluación se efectúa mediante herramientas estadísticas.

Costos de calidad: Sistema para identificar, clasificar, cuantificar monetariamente, jerarquizar, influir y controlar los costos de una organización, a fin de incrementar su competitividad, mediante el logro de mejores niveles de calidad, costo y servicio.

Costos de no calidad: Costos ocasionados por no cumplir con los requerimientos de los productos, los servicios, los procesos y los sistemas.

Cultura: Conjunto de valores, necesidades, expectativas, creencias, políticas, normas y costumbres aceptadas y practicadas por una organización o un grupo social.

Despliegue de la función de calidad (QFD): Método o enfoque administrativo originado en 1972 en los astilleros de la Mitsubisihi en Kobe, que sirve para ayudar a las empresas a concentrarse en las necesidades y las expectativas jerarquizadas de los clientes, establecer las especificaciones de los diseños, del desarrollo, de la fabricación.

Diagrama de flujo de la producción: También llamado diagrama de Deming, es el diagrama del proceso de la administración para la calidad.

Empresa: Unidad productiva o de servicio que constituida de acuerdo a aspectos prácticos o legales, se integra por recursos humanos, materiales y técnicos valiéndose de la administración para alcanzar sus objetivos.

Estandarización: Para la administración científica, un estándar es una unidad de medida adoptada y aceptada comúnmente como criterio y la estandarización es la aplicación de estándares en una organización, buscando alcanzar un resultado determinado.

Excelencia: Sustantivo español que denota grado eminente de perfección.

Innovación: Una nueva forma de hacer mejor las cosas.

ISO 9000: Conjunto de normas de la International Organization for Standardization que permiten certificar que una organización opera mediante sistemas administrativos que aseguran el cumplimiento de los requerimientos del producto y/o el servicio lo que las normas denominan aseguramiento de calidad.

ISO: Siglas de Organización Internacional de Normalización, con sede en Ginebra, Suiza.

Manuales: Conjunto organizado de documentos que se utilizan como herramienta para administrar una organización.

Mejora continua: Proceso que conduce a la total satisfacción del cliente. Consta de tres etapas básicas: planificar para la calidad, organizar para la calidad, y controlar para la calidad.

Modelo: Una descripción simplificada de un sistema para ayudar en los análisis, cálculos y predicciones.

TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y ESTADÍSTICA

Aleatorio: Al azar, estocástico. La noción de que un fenómeno ocurre en forma aleatoria se da cuando no sigue un patrón particular que se pueda describir directamente por ecuaciones.

Algoritmos genéticos: Técnicas de optimización que usan procesos tales como combinación genética, mutación y selección natural en un diseño basado en los conceptos de evolución natural.

Amplitud: Es la distancia entre los valores máximo y mínimo observados en un conjunto o distribución de datos.

Análisis exploratorio de datos: Uso de técnicas estadísticas tanto gráficas como descriptivas para aprender acerca de la estructura de un conjunto de datos.

Análisis prospectivo de datos: Análisis de datos que predice futuras tendencias, comportamientos o eventos basado en datos históricos.

Análisis retrospectivo de datos: Análisis de datos que provee una visión de las tendencias, comportamientos o eventos basado en datos históricos.

Árbol de decisión: Estructura en forma de árbol que representa un conjunto de decisiones. Estas decisiones generan reglas para la clasificación de un conjunto de datos.

Atributo: Característica cualitativa de un objeto o individuo.

Base de conocimiento: En inteligencia artificial, una recopilación del conocimiento y reglas sobre un tema específico.

Base de datos multidimensional: Base de datos diseñada para procesamiento analítico on-line (OLAP). Estructurada como un hipercubo con un eje por dimensión.

CART Árboles de Clasificación: Una técnica de árbol de decisión usada para la clasificación de un conjunto de datos. Provee un conjunto de reglas que se pueden aplicar a un nuevo (sin Anexo IV: Glosario de términos clasificar) conjunto de datos para predecir cuáles registros darán un cierto resultado. Segmenta un conjunto de datos creando 2 divisiones.

Clasificación: Consiste en el etiquetado de los registros, de forma que se pueda establecer un modelo que permita clasificarlos.

Clustering (agrupamiento): Proceso de dividir un conjunto de datos en grupos mutuamente excluyentes de tal manera que cada miembro de un grupo esté lo "más cercano" posible a otro, y grupos diferentes estén lo "más lejos"

posible uno del otro, donde la distancia está medida con respecto a todas las variables disponibles.

Coefficiente de correlación: Es una medida de dependencia estadística lineal entre dos características o variables. Es un número r que se encuentra en el intervalo $[-1, 1]$. Un valor cerca de uno indica que a medida que el valor de una variable aumenta, el valor de la otra también tiende a aumentar. Si el valor está cerca de -1 a medida que el valor de una variable aumenta, el valor de la otra variable tiende a disminuir. Una correlación de cero indica que no hay dependencia lineal estadística entre las dos variables, aunque no indica que las variables sean independientes (excepto en el caso en que las variables tengan distribución normal). Una correlación distinta de cero no es evidencia suficiente para concluir que hay una relación de causa y efecto entre las variables.

Coefficiente de determinación: Computacionalmente es el cuadrado del coeficiente de correlación. Expresa la proporción de la varianza de la variable dependiente que es explicada por la variable independiente. SSR es la suma de cuadrados debido a la regresión, SST es la suma total de cuadrados (corregida) y SSE es la suma de cuadrados debido al error.

Coefficiente de variación: Variabilidad relativa a la media. Expresa la proporción de variabilidad de una característica por cada unidad de la media. Computacionalmente se obtiene dividiendo la desviación estándar por la media.

Cuadrados mínimos (least squares): Es un método matemático que sirve para ajustar líneas o funciones a datos. En este método se reduce al mínimo la suma del cuadrado de las distancias (verticales) de los puntos observados a la función que se quiere ajustar.

Cuartilas (quartiles): Son tres valores que dividen los datos observados en cuatro partes iguales. El valor central es llamado mediana, y los otros dos cuartilas superior (03) y inferior (01), respectivamente. Pueden representarse gráficamente mediante un diagrama de caja.

Data Warehouse: Sistema para el almacenamiento y distribución de cantidades masivas de datos.

Datos (data): Valores que se obtienen al observar directamente los resultados de una variable en la muestra o población. Pueden ser numéricos o cualitativos.

Datos anormales: Datos que resultan de errores o que representan eventos inusuales.

Datos cuantitativos (quantitative data): Valores que se obtienen al observar directamente los resultados de una variable numérica (no de atributo).

Desviación absoluta media: Es una medida de distancia promedio de los valores observados a su media. La distancia de cada valor a la media se mide tomando el valor absoluto de la diferencia entre ese valor y la media.

Desviación estándar (standard deviation): Es una medida de distancia promedio de los valores observados a su media. La distancia de cada valor a la media se mide tomando el cuadrado de la diferencia entre ese valor y la media. Luego de obtener el promedio de esos cuadrados, tomamos la raíz cuadrada. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza.

Diagrama de caja y "bigotes" (box and whiskerplot): Es una gráfica que presenta un solo eje. En este se representan cinco valores: los valores mínimo y máximo, la primera y tercera cuartila y la mediana. Del valor mínimo a la primera cuartila, 01, se observa aproximadamente el 25% de los datos. De 01 a la mediana se observa la misma cantidad y así sucesivamente. Este diagrama permite ver las algunas características generales de la distribución, tal como simetría y dispersión.

Diagrama de puntos (dotplot): Es una gráfica que presenta un solo eje. En este se representa cada valor observado en la muestra con un punto sobre el lugar geométrico correspondiente al valor. Si se repitiera algún valor se dibuja un punto sobre el anterior. Es útil para visualizar la distribución de los datos, si éstos se agrupan alrededor de uno o más puntos, la dispersión, valor máximo, mínimo, moda.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Flat Rolling of Steel. William L. Roberts.
- [2] Cold Rolling of Steel. William L. Roberts
- [3] Flat Rolling Fundamentals “2000” – Vladimir B. Ginzburg
- [4] Surface Defects on Cold Rolled Strip and Sheet. H.G. Grünhofer, Th. Hesse, H. Nachtigäller, W. Roth, P. U. Schmithals, D. Schreiber, A. Selige und K. Skock.
- [5] Álbum de defectos de Productos Siderúrgicos. Parte V Bandas Recubiertas (Hojalata y Galvanizado). ILAFA,
- [6] Two-stand temper and double reduction mill at Dongbu Steel, Asan Bay Works. Y.H. Lee, B.I. Roh, W.I. Chun (Dongbu Steel Co), K. Aeberli, H.J. Pohl (Siemens AG)
- [7] Cold Double Reduction Rolling for Packaging Steels: Towards a Better Lubrication Control by Emulsion. N. Legrand, P. Masson, L. Amrane, I. Santi, M. Chauviré, L. Vermot des Roches.
- [8] M. A. Coulthard. Image processing for automatic surface defect detection. Image Processing and its Applications, 1989., Third International Conference on, 1989 pages 192-196 July.
- [9] P.H. Bolt, F. Friedel, H. Pircher, X. Cornet, S. Ehlers & F. Steinert, Investigation of the formation, constitution and properties of scale formed during the finishing rolling, cooling and coiling of thin hot strips. ECS steel RTD project technical report.

- [10] V. Ginzburg, Steel-rolling technology: theory and practice (Marcel Dekker Inc. New York, 1989).
- [11] J. Aach & G. Chuch. Alining gene expression time series with time warping algorithms. *Bioinformatics*, vol. 17, pages 495-508, 2002.
- [12] A. Bollinger, R. Khalifa & E. Turban. Integrating Knowledge management into enterprise environments for the next generation of decision support. *Decision Support Systems*, vol. 33, no. 2, pages 163-176, 2002.
- [13] L. Bottou & V. Vapnik. Local Learning Algorithms. *Neural Compt.*, vol. 4, no. 6, pages 888-900, March 1992.
- [14] Leo Breiman. Random Forests. *Machine Learning*, vol. 45, no 1, pages 5-32, 2001.
- [15] Nicolás de Abajo. Optimización mediante Data Mining de modelos para el diagnóstico de calidad en hojalata. PhD thesis, Universidad de Oviedo, 2001.
- [16] Nicolás de Abajo, Alberto B. Diez, Vanesa Lobato & Sergio R. Cuesta. ANN Quality Diagnostic Models for Packaging Manufacturing: An Industrial Data Mining Case Study. In 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining KDD'04 (Seattle, USA), pages 799-804, 2004.
- [17] Sergio R. Cuesta, Alfredo G. Robla, Valentin Torre & S. Peregrina. Visual Decision Support System for the Assessment of Steel Production Efficiency. *Journées Siderurgiques Internationales. International Steel Making Conference. Association Technique de la Siderurgique Française*, 2008.
- [18] Sergio R. Cuesta, Marco Rodriguez, Ignacio Diaz & Abel Cuadrado. Novel Systemic Approach for the Assessment of Production Efficiency in the Steel Industry. Accepted for EECR 2009 Conference on Energy Efficiency and CO2 reduction in the Steel Industry, 2009.
- [19] Decision support system for the comprehensive assessment of flat products quality. RFS-CR040150-Research Fund for Coal and Steel (RFCS), 2004-2007.
- [20] Ignacio Díaz. Detección e Identificación de Fallos en Procesos Industriales Mediante Técnicas de Procesamiento Digital de Señal y Redes Neuronales. Aplicación al Mantenimiento Predictivo de Accionamientos Eléctricos. PhD thesis, Universidad de Oviedo, 2000.
- [21] European steel technology platform (ESTEP): From a strategic research agenda to implementation. March 2006.

- [22] Factory-wide and quality related production monitoring by data-warehousing exploitation. RFS-CR03041- Research Fund for Coal and Steel (RFCS), 2003-2006
- [23] R.J. Fruehan, Fortini O., H.W. Paxon & R. Brindle. Theoretical Minimum Energies To Produce Steel for selected conditions. Carnegie Mellon University. U.S. Department of Energy, May 2000.
- [24] F. A. Gama, G. de Oliveira Dornelas, B. Rosa, R. Ferreira & M. Macedo. The Steel Making Plant Business Intelligence Project. La Renue de Mettallurgie, Julliet-Aout, 2007.
- [25] Sébastien Gebus. Knowledge-based Decision Support System for Production Optimization and Quality improvement in the electronics industry. PhD thesis, Faculty of Technology, Department of Process and Environmental Engineering, Contro engineering lab. University of Oulu, 2006.
- [26] A. González- Marcos, Joaquín Bienvenido Ordieres Meré, Alpha Verónica Pernía Espinoza & Valentin Torre. Desarrollo de un cerrojo artificial para el skin-pass en una línea de acero galvanizado por inmersión en caliente. Pages 29-38. Revista de metalurgia, ISSN 0034-8570, Vol. 44, N°1, 2008.
- [27] G. A. Gorry & M.S. Scout-Morton. A Framework for Management Information Systems. Sloan Management Review, vol. 12, no. 3, pages 55-70, 1971.
- [28] IISI. World steel life cycle inventory methodology report. International Iron and Steel Institute, Oct 2002.
- [29] IISI. Sustainability report of the world steel industry. International Iron and Steel Institute, May 2006.
- [30] IISI. A global sector approach to CO2 emissions reduction for the steel industry. International Iron and Steel Institute, December 2007.
- [31] IISI. IISI short range outlook. International Iron and Steel Institute (IISI), November 2007.
- [32] IISI. International resource on sustainable and innovative use of steel in residential construction. <http://www.livingsteel.org>, vol. International Iron and Steel Institute, December 2007.
- [33] Jianxin Jiao & Mitchell M. Tseng. A pragmatic approach to product costing based on standard time estimation. International Journal of Operations and Production Management, vol 19, no. 7, pages 738-755, 1999.
- [34] Eamon Keogh. Exact indexing of dynamic time warping. Pages 406-417. In proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases, Hong Kong, 2002.
- [35] J. Molleda, D.F. García, D. Gonzalez, I. Peteira & J.A. Go. Fuzzy-based approach to real time detection of steel strips defective welds. Int. Symp. On

- Computational Intelligence for Measurement Systems and Appl. (IEEE-CIMSA), 2005.
- [36] J.B. Naylor, J. Griths & M.M. Naim. Knowledge-bases system for estimating steel plant performance. *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 21, no.7, pages 1000-1019, 2001.
- [37] Plataforma tecnológica española del acero (PLATEA): Agenda estratégica de investigación. Septiembre 2006.
- [38] J.R. Quinlan. Simplifying Decision Trees. *Internacional Journal of Human-Computer Studies*, vol.51, no. 2, pages 497-510, 1999.
- [39] Juan Antonio González Rodríguez. Predicción de la Calidad de Bandas Laminadas en Caliente mediante Modelos Inteligentes. PhD thesis, Universidad de Oviedo, March 1999.
- [40] C.E. Shannon. A. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pages 379-423, 623-656, July, October 1948.
- [41] Intelligent soft-center technology and automatic model-based diagnosis for improved quality, control and maintenance of mill production lines, (SOFTDETECT). RFS-CR04017- Research Fund for Coal and Steel (RFCS), 2004-2007.
- [42] La industria siderúrgica española, UNE 2006.
- [43] J. Vesanto & J. Hollmen. An automated report generation tool for the data understanding phase. *Hybrid Information Systems*, pages 611-626, 2002.
- [44] Lotfi Asker Zadeh. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decisions Processes. In R. R. Yager, S. Ovchinnikov, R. M. Tong & H. T. Nguyen, editeurs, *Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers by L.A. Zadeh*, pages 105-146, New York, 1987. John Wiley & Sons, Inc.
- [45] Y.H. Lee, B.I. Rohn, W.I. Chun, K. Aeberli, H.J. Pohl. Two-stand temper and double reduction mill at Dongbu Steel, Asan Bay Works.
- [46] N. Legrand, P. Masson, L. Amrane, I. Santi, M. Chauviré, L. Vermot des Roches. Cold Double Reduction Rolling for Packaging Steels: Towards a Better Lubrication Control by Emulsion.
- [47] LAKE, "Control of discontinuous yielding by temper rolling", *J. of Mec. Work. Techn.*, 12 (1985) p. 36-66
- [48] JUTTEAU, GRUMBACH, LE BON, PRUDHOMME, "Etude du skin-pass. Applications industrielles". *Rev. Met.*, Décembre (1982) . 991-1005
- [49] AMANO, "Finite Elements analysis of steady flow in metal processing", *Trans. ISIJ*, 16 (1976) p. 92-97

- [50] ECSC Convention 7210-KC/305 "Transfer de rugositéau skin-pass".
- [51] PANKIN, KRANENBERG, "Untersuchungenüber die Walzenrauheit un derenÜbertragung auf das BlechbeimNachwalzen", Stahl und Eisen, 88 (1968) N 10-16 Mai p. 484-491.
- [52] EKELUND, S. 1933 Steel, vol. 93 (August 21st and following numbers); translated from Jernkontorets Ann. 1927, vol. 111, p.39 and 19228, vol. 112, p. 67.
- [53] GEIRINGER, H. 1937 "Fondementsmathématiques de la théorie des corps plastiquesisotropes", vol. 86 of "Mémorial des sciences mathématiques" (Gauthier-Villars, Paris).
- [54] HITCHCOCK, J. 1935 "Roll Neck Bearings" (A.S.M.E. Research Publication), Appendix I.
- [55] KÁRMÁN, T. von. 1925 ZeitschriftfürangewandteMathematik und Mechanik, vol. 5, p. 139.
- [56] LODE, W. 1925 ZeitschriftfürangewandteMathematik und Mechanik, vol. 5, p. 142. See also Proc. International Congress in Applied Mechanics, Zürich, 1926.
- [57] MICHELL, J.H. 1902 Proc. Lond. Mathematical Soc., vol. 34, p.134. See also TIMOSHENKO, S., 1934 "Theory of Elasticity" (McGraw-Hill, New York and London), pp. 104 et seq.
- [58] NÁDAI, A. 1931 "Plasticity" (McGraw Hill, New York and London). 1939 Fl. Applied Mechanics, vol. 6, p. A-55.
- [59] PRANDTL, L. 1923 ZeitschriftfürangewandteMathematik und Mecanik, vol. 3, p. 401.
- [60] PRESCOTT, J. 1924 "Applied Elasticity" (Longmans, Green and Company, London), p. 633.
- [61] SIEBEL, E. 1924 Berichte des Walzwerksausschusses, VereindeutscherEisenhüttenleute, No. 37. See also Stahl und Eisen, 1925, vol, p. 1563.
- [62] SIEBEL, E., and Lueg, W. 1933 Mitteilungenausdem Kaiser Wilhelm InstitutfürEisenforschung, Düsseldorf, vol. 15, p.1. See also LUEG, W., Stahl und Eisen, 1933, vol. 53, part 1, p.346.
- [63] SIEBEL, E., and POMP, A. 1927 Mitteilungenausdem Kaiser Wilhelm InstitutfürEisenforschung, Düsseldorf, vol. 9, p. 157.
- [64] SIEBEL, E., and POMP, A. 1927Mitteilungenausdem Kaiser Wilhelm InstitutfürEisenforschung, Düsseldorf, vol. 9, p. 157. 1930 Do., vol. 12, p. 149.

- [65] SOBOLEVSKY, N.A. 1935 Blast Furnace and Steel Plant, vol. 23, pp. 685, 763, 850; 1936, vol. 24, pp. 149, 237, 313, 413.
- [66] TRINKS, W. 1937 Blast Furnace and Steel Plant, vol. 25, p. 617.
- [67] TSELIKOV, A. T. 1936 Metallurg (Russian), No. 6, p. 61.
- [68] LAKE, "Control of discontinuous yielding by temper-rolling", J. of Mec. Work. Techn., 12 (1985) p. 36-66
- [69] JUTTEAU, GRUMBACH, LE BON, PRUDHOMME, "Etude du skin-pass. Applications industrielles", Rev. Met., decembre (1982) p. 991-1005
- [70] TAMAHO, "Finite Elements analysis of steady flow in metal processing", Trans. ISIJ, 16 (1976) p. 92-97
- [71] ECSC Convention 7210-KC/305 "Transfert de rugosité su skin-pass".
- [72] FANKIN, KRANENBERG, "Untersuchungen über die Waisenrauheit und deren Übertragung auf das Blech usim Nachwalzen", Stahl un Eisen, 88 (1968) N 10-16 p. 484-491