

HERRAMIENTAS DE GRAFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA FORMA DE LA CHAPA A LA SALIDA DEL LAMINADOR EN FRÍO ¹

Christian Cezanne ²

Daniel Oldani ²

Marcos Olagaray ³

Resumen

En la actualidad se encuentran altamente desarrollados los equipamientos para medición y control de la forma de la chapa a la salida de un laminador en frío. Sin embargo, no se cuenta con herramientas que permitan una clara visualización y representación gráfica de la forma del material a lo largo de una bobina. El presente trabajo describe el desarrollo de los algoritmos que permiten procesar los datos entregados por un medidor de forma para representar la evolución de la forma del material a lo largo de la bobina. Para ello se descompone la forma en sus principales componentes: bordes caídos, ondulación de centro, ondulaciones de borde y defectos localizados (canales, quarter bucles, etc.). También se presenta el desarrollo de una representación tridimensional de la forma y se describen los algoritmos para clasificar cualitativamente la bobina en función de la evolución de estas componentes a lo largo de la misma. El desarrollo e implementación de estas herramientas en el laminador en frío de Ternium Siderar planta Ensenada, facilitó el diagnóstico y resolución de problemas de forma, permitiendo disminuir las caídas cualitativas por defectos de forma al 50% de los valores históricos.

Palabras clave: Forma de la chapa; Medidor de forma; Grafico de forma.

FERRAMENTAS DE GRAFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA PLANICIDADE DA CHAPA À SAÍDA DO LAMINADOR A FRIO

Resumo

Atualmente, os equipamentos de medição e controle da planicidade da chapa à saída do laminador a frio são altamente desenvolvidos. Entretanto, não se dispõe de ferramentas que permitam uma clara visualização e representação gráfica da planicidade do material ao longo da bobina. Este trabalho descreve o desenvolvimento dos algoritmos que permitem processar os dados fornecidos pelo medidor da planicidade para representar a evolução da planicidade do material ao longo da bobina. Para isso, decompõe-se a planicidade em seus componentes principais: bordas quedas, ondulação central, ondulações de borda, e defeitos localizados (canais, quarter buckles, etc.). Apresenta-se também o desenvolvimento de uma representação tridimensional da planicidade e descrevem-se os algoritmos para classificar qualitativamente a bobina em função da evolução dessas componentes ao longo da bobina. O desenvolvimento e a implementação dessas ferramentas no laminador a frio de Ternium Siderar, fábrica Ensenada, facilitou o diagnóstico e a resolução dos problemas de planicidade, permitindo diminuir as quedas qualitativas por esses defeitos ao 50% dos valores históricos.

Palavras-chave: Planicidade da chapa; Medidor de planicidade; Gráfico de planicidade.

¹ *Contribucion técnica a 44º Seminário de Laminación – Procesos y Productos Laminados Y Revestidos, 16 al 19 de Octubre de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.*

² *Ingeniero Mecánico, Gerencia de Laminación – Ternium Siderar – Argentina*

³ *Ingeniero Electrónico – VAI Ingdesi - Argentina*

1 INTRODUCCIÓN

Existen diversos métodos directos e indirectos para medir la forma a la salida de un laminador en frío^[1] Sin embargo todos se basan en la división del ancho de la chapa en franjas de ancho fijo y la medición de la desviación de la forma de cada franja respecto del plano.

En el caso del laminador en frío de Ternium Siderar Planta Ensenada, la medición se realiza indirectamente mediante un rodillo medidor de forma dividido en 32 secciones de 52mm de ancho ubicado entre la Jaula 4 y el bobinador. Cada una de estas secciones mide la fuerza de tiro en la franja correspondiente. La diferencia de tiro específico entre una franja y el tiro específico promedio es proporcional a la diferencia de longitud de esa franja respecto de la distancia que hay entre la última Jaula del laminador y el bobinador. Por lo tanto, una franja más floja que el tiro promedio representa una ondulación del material. No obstante, si la desviación respecto del tiro promedio no es excesiva, el defecto de forma no se pondrá de manifiesto incluso al liberar la chapa de todo vínculo sobre una superficie plana, y se lo llama forma latente. La forma visible al liberar la chapa de todo vínculo se llama manifiesta.

Los defectos de forma se miden en IU (internacional unit), y el mismo es proporcional a la diferencia de tensión respecto del promedio según la ley de Hooke (ϵ [IU] = σ [MPa] / E [=206000 MPa]).

2 DATOS DE PARTIDA PARA EL CÁLCULO

El rodillo medidor de forma del laminador en frío de Siderar Ensenada entrega una serie de mediciones de desvío de tensión específica respecto de la tensión específica promedio dentro del ancho de la chapa (Figura 1).

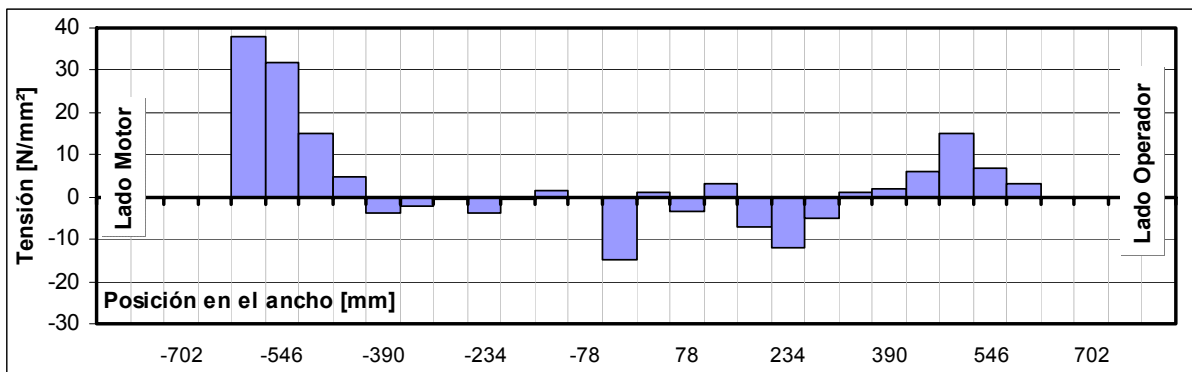
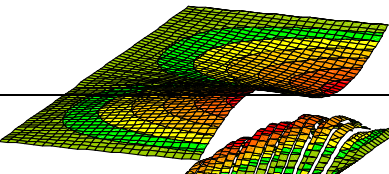
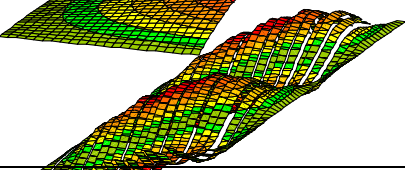
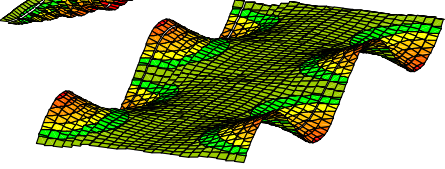
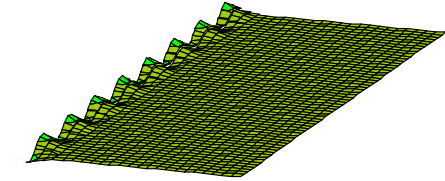
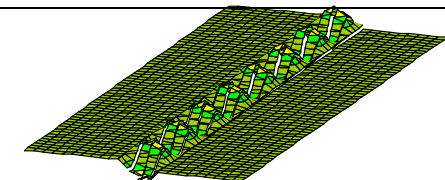
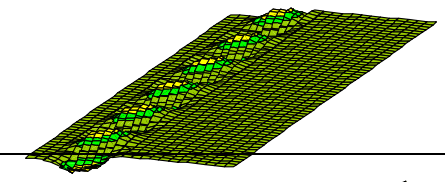
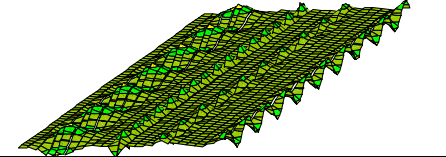


Figura 1: Distribución de tensiones (T_i) típica obtenida de un medidor de forma

De este mapa de tensiones se pretende obtener una cuantificación de los diferentes defectos de forma descritos en la literatura,^[2] realizando una descomposición matemática (Tabla 1).

Tabla 1: Defectos de forma típicos

Defecto	Forma de la chapa	Orden matemático
Desnivel o borde caído		Lineal
Ondulación centro		Cuadrático
Ondulación borde de gran penetración		Cuadrático
Ondulación borde localizada		Mayor a 2
Canales		
Quarter buckles		
Otros defectos localizados		

3 CÁLCULO DE LAS COMPONENTES DE LA FORMA

3.1 Desnivel o Borde Caído

Dado que se trata de una componente lineal de la forma, se deberá encontrar un recta que ajuste lo mejor posible la distribución de tensiones obtenida del rodillo medidor. Para ello se busca, por el método de mínimos cuadrados, la recta que mejor ajuste el diagrama de tensiones (Apéndice 1). Por lo tanto el desnivel estará expresado por una ecuación del tipo:

$$D(x) = bx, \quad \text{dónde } x \text{ es la posición en el ancho.}$$

Por convención, el cero del eje “x” está en el centro del ancho, y el semieje negativo representa el lado motor. El desnivel total del gráfico será entonces:

$$Desnivel = D\left(\frac{A}{2}\right) - D\left(\frac{-A}{2}\right) = b\frac{A}{2} - b\frac{-A}{2} = bA \quad \text{con } A = \text{ancho de la chapa}$$

Para pasar este desnivel de tensiones a un desnivel expresado en IU, se divide por el módulo elástico (=206000N/mm²):

$$IU_{desnivel} = \frac{Desnivel}{2.06} = \frac{b \cdot A}{2.06}$$

Con la convención utilizada, si el valor es positivo, el desnivel será tal que el lado motor está más flojo. Si es negativo, el lado flojo es el operador.

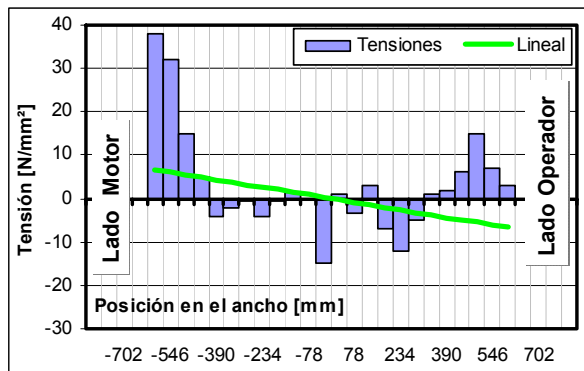


Figura 2: Distribución de tensiones y componente lineal calculada

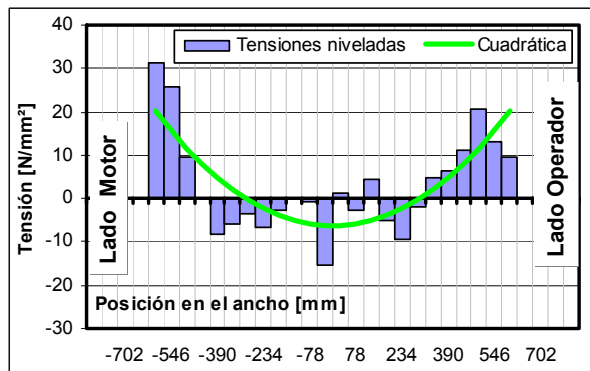


Figura 3: Distribución de tensiones nivelada y componente cuadrática

3.2 Ondulación Centro

Una vez evaluado el desnivel, se recalcula el diagrama de tensiones nivelado como:

$$T_{iNIV} = T_i - D(x_i)$$

Sobre este diagrama de tensiones se procede a evaluar la componente de ondulación centro cuadrática pura, haciendo el ajuste por cuadrados mínimos con una ecuación de la forma: $F(x) = ax^2 + c$ (Figura 3).

La ondulación centro se calculará como diferencia entre el máximo y mínimo valor de la curva cuadrática:

$$OC = F\left(\frac{A}{2}\right) - F(0) = a\frac{A^2}{4} + c - a\frac{0^2}{4} - c = a\frac{A^2}{4}$$

Por lo tanto el valor de IU de centro vale:
$$IU_{centro} = \frac{OC}{2.06} = a\frac{A^2}{8.24}$$

Si este valor es positivo (corresponde a un coeficiente “a” positivo), la ondulación será de centro. Si este valor es negativo, no habrá ninguna ondulación de centro, y el IU calculado corresponde a una ondulación de ambos bordes con penetración importante en el ancho de la chapa (Figura 4).

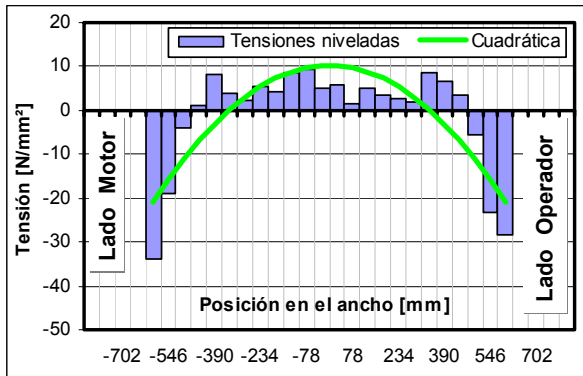


Figura 4: Caso de componente cuadrática negativa, con $IU_{CENTRO} = -30$ IU.

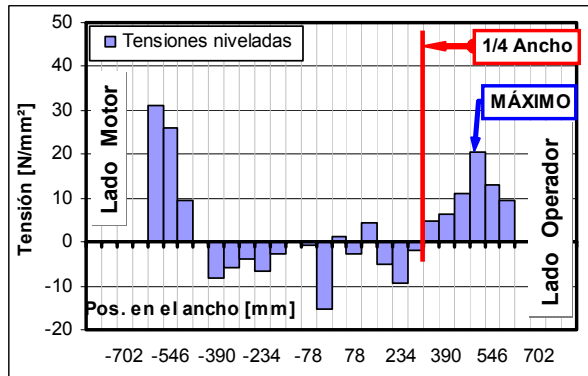


Figura 5: Determinación de la ondulación de borde localizada

3.3 Ondulación de Bordes Localizada

Para determinar la existencia de ondulaciones de borde localizadas, se analiza cada cuarto extremo del ancho por separado, utilizando las tensiones niveladas.

Tomemos como ejemplo el diagrama de tensiones nivelado, o sea luego de haber descontado la componente de desnivel, de la figura 5. Para empezar se determina la posición y valor de la máxima tensión ($T_{iNIV\ máxima}$) dentro del primer cuarto del ancho desde el lado operador. Con este valor se calcula la ondulación borde lado operador como diferencia respecto de la tensión en el borde:

$$IU_{L/O} = \frac{T_{iNIV\ máxima} - T_{L/O}}{2.06}$$

Si el resultado es cero, significa que el máximo está justamente en el borde y por lo tanto no hay ondulación de borde. El cálculo para el lado motor es análogo al lado operador. En el caso de que IU_{centro} sea negativa, se considera:

$$IU_{L/M} = IU_{L/M} + |IU_{centro}| \quad \text{y} \quad IU_{L/O} = IU_{L/O} + |IU_{centro}|$$

3.4 Error Remanente

El error remanente corresponde a todas las componentes de orden matemático mayor a 2 del diagrama de tensiones. Es lo que queda cuando se le descuentan al diagrama de tensiones original las componentes lineal y cuadrática (ver figura 6). Por

ende se calcula como: $ER_i = T_i - (a \cdot x_i^2 + bx_i + c)$.

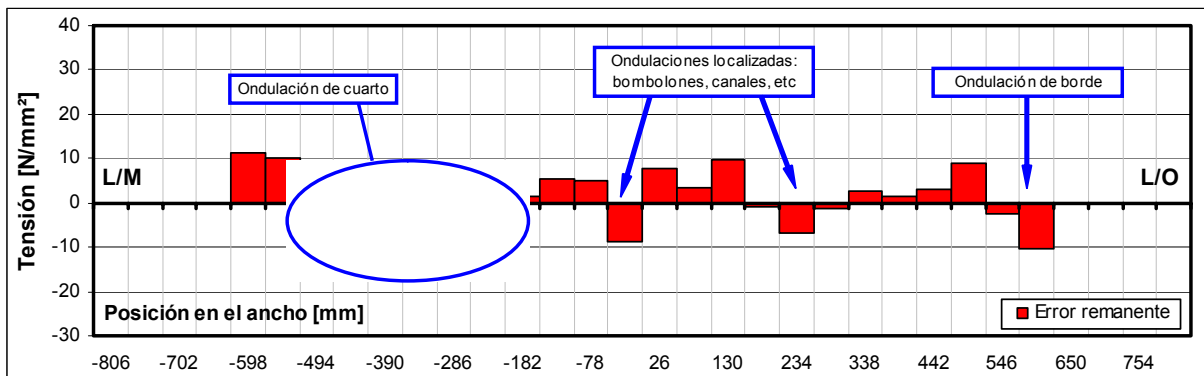


Figura 6: Error de forma remanente (componentes de orden matemático mayor a 2)

Como se trata del desvío de la curva “promedio” mejor ajustada hasta orden 2, se considera como hipótesis que las barras negativas corresponden a zonas onduladas respecto del “promedio”, mientras que las barras positivas corresponden a zonas suficientemente tensas como para no generar una ondulación residual. Por lo tanto se pueden expresar los IU de forma del error remanente como:

$$IU_{ERi} = \frac{T_i - (a \cdot x_i^2 + bx_i + c)}{2.06}, \quad \text{si } [T_i - (a \cdot x_i^2 + bx_i + c)] < 0$$

$$IU_{ERi} = 0, \quad \text{si } [T_i - (a \cdot x_i^2 + bx_i + c)] \geq 0$$

4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y CLASIFICACIÓN DE LA FORMA EN NIVEL 2

Se generan tres tipos de gráficos de forma:

- gráfico de forma global
- gráfico de forma localizado
- representación tridimensional de la forma

4.1 Gráfico de Forma Global

Se representa la variación de las componentes principales de la forma a lo largo de una bobina: IU_{DESNIVEL} , IU_{CENTRO} , $IU_{\text{L/O}}$, $IU_{\text{L/M}}$; y seteo del equipo controlador (bending y refrigeración selectiva en automático o manual). La convención adoptada para el cálculo del desnivel hará que un valor negativo corresponda al lado operador flojo. Por ello se adoptó la misma convención para las ondulaciones de borde, graficando la del lado operador sobre el semieje negativo y la del lado motor sobre el semieje positivo (Figura 7).

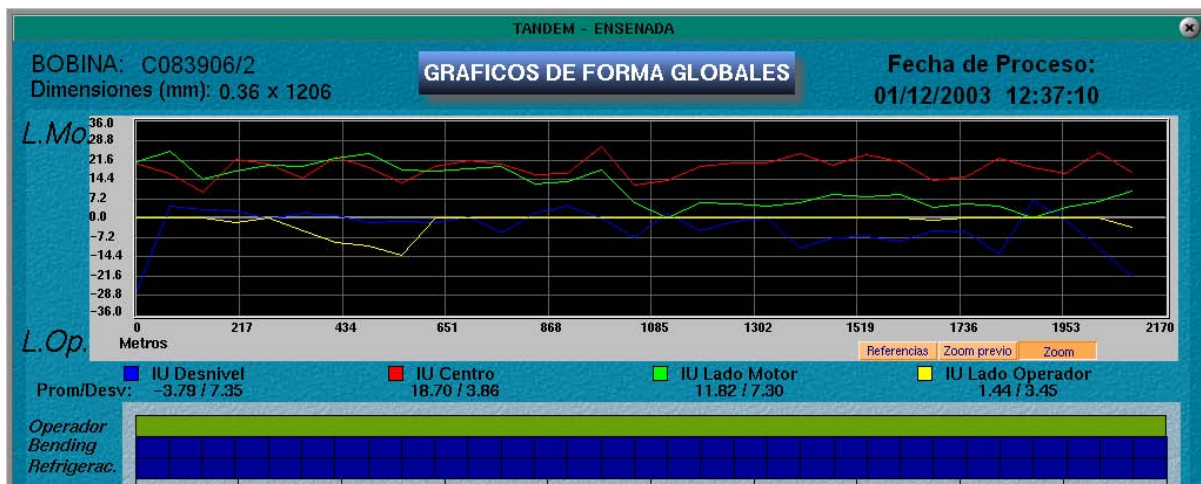


Figura 7: Variación de componentes principales de forma a lo largo de una bobina.

4.2 Gráfico de Forma Localizado

Se representan los IU del error de forma remanente (Figura 8). El código de colores del IU_{ERi} considera que todas las porciones de la chapa con una tensión residual mayor al promedio (ajuste lineal + cuadrático) no producen una ondulación residual (verde) y las de tensión residual menor producen una ondulación proporcional al desvío (amarillos y rojos).

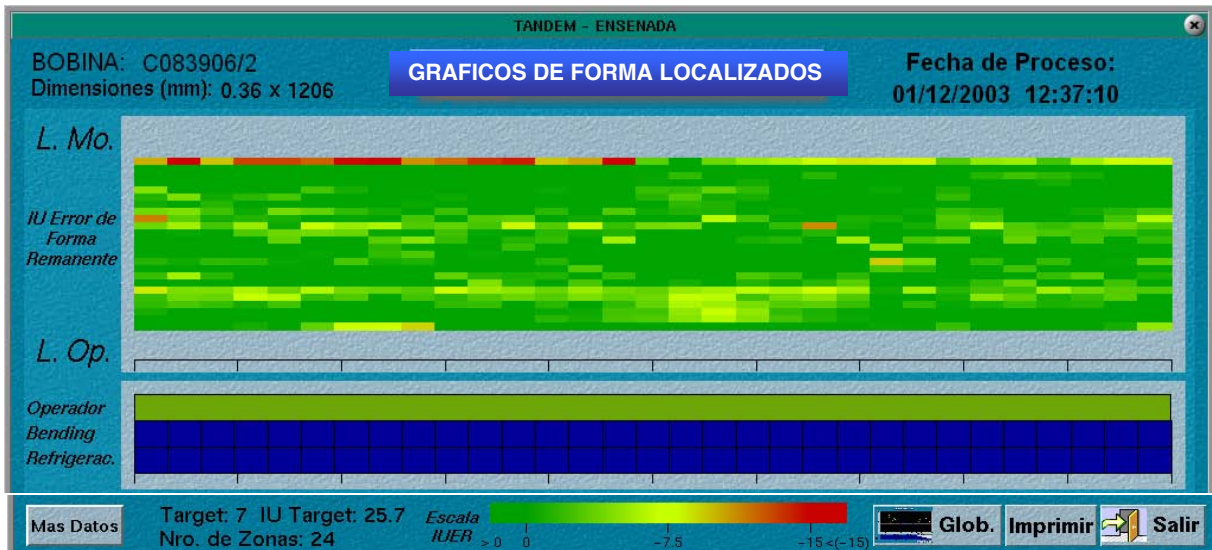


Figura 8: Evolución del error de forma remanente a lo largo de una bobina.

4.3 Representación Tridimensional de la Forma

Hasta este punto se ha realizado un análisis matemático de los diagramas de tensiones entregados por el equipo medidor de forma, determinando valores de ondulaciones asimétricas, centro, borde y localizadas. Sin embargo, nada se ha dicho respecto de la forma real de la chapa. En general es dificultoso imaginarse a partir del diagrama de tensiones, cómo se vería la forma del material si se lo dejara libre de todo vínculo.

El mecanismo que genera los desvíos de forma manifiestos es el pandeo. Supongamos un trozo de chapa con una ondulación de centro. En el mismo las fibras centrales son más largas que las de los bordes. A medida que se deforma elásticamente la chapa por un esfuerzo de tracción, la ondulación se hará cada vez menor hasta convertirse en un error de forma latente (no visible). En ese momento la chapa quedará totalmente plana, con las fibras de los bordes sometidas a un esfuerzo de tracción y las del centro casi sin tiro.^[3]

Si ahora se disminuye gradualmente el tiro aplicado, las fibras centrales comienzan a estar sometidas a un esfuerzo de compresión creciente. A partir de un determinado momento se producirá el pandeo de cada una de estas fibras, generando la ondulación de centro.

Esta es una descripción muy simplificada del origen de los defectos de forma. Para realizar una representación tridimensional de la forma sería necesario realizar una modelización del pandeo de cada fibra considerando que la misma está vinculada en toda su longitud a las fibras vecinas.

No obstante se pueden hacer una serie de hipótesis simplificativas:

- La ondulación de una determinada fibra es la composición (suma algebraica) de las ondulaciones correspondientes a esa fibra debido a las componentes de desnivel, centro y error remanente.
- La altura de onda es proporcional a los IU.
- El paso longitudinal de la ondulación es proporcional al “paso” transversal de ondulación, adoptando una onda del tipo sinusoidal.

Aplicando estas hipótesis, se puede evaluar cada componente de la siguiente manera:

- Ondulación centro: el paso transversal es igual al ancho de la chapa. Por lo tanto se fija un paso longitudinal de 1 unidad de longitud. La altura de onda en cada punto del ancho es proporcional a la diferencia entre el valor máximo de la curva cuadrática de ajuste y el valor de la cuadrática en ese punto.
- Desnivel: El paso transversal es el doble que el de la ondulación centro. Por lo tanto el paso longitudinal será de 2 unidades de longitud. La altura de onda en cada punto es proporcional a la diferencia entre el valor máximo de la recta de ajuste y el valor en ese punto.
- Los errores de forma remanentes se evalúan de la siguiente manera:
 - ✓ Se descartan todos los errores positivos
 - ✓ Cada grupo de errores negativos adyacentes se evalúa como una franja ondulada cuyo paso es:

$$PASO = \frac{ANCHO DE LA FRANJA}{ANCHO CHAPA} \times PASO ONDULACIÓN CENTRO$$

- ✓ La altura de onda de cada zona dentro de la franja es proporcional a los IU.

El siguiente ejemplo muestra gráficamente lo descrito:

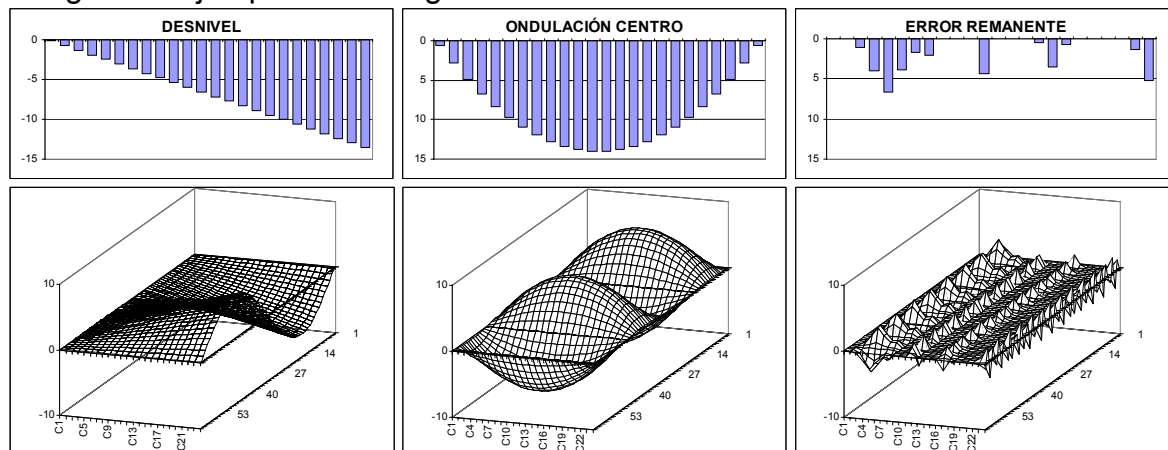


Figura 9: Obtención del gráfico de forma tridimensional para cada componente.

Una vez obtenida cada una de estas componentes, la suma de todas ellas será una representación gráfica tridimensional de la chapa laminada, donde se colorea cada franja longitudinal de acuerdo a su desvío respecto del objetivo de forma seteado en el equipo medidor y controlador (Target).

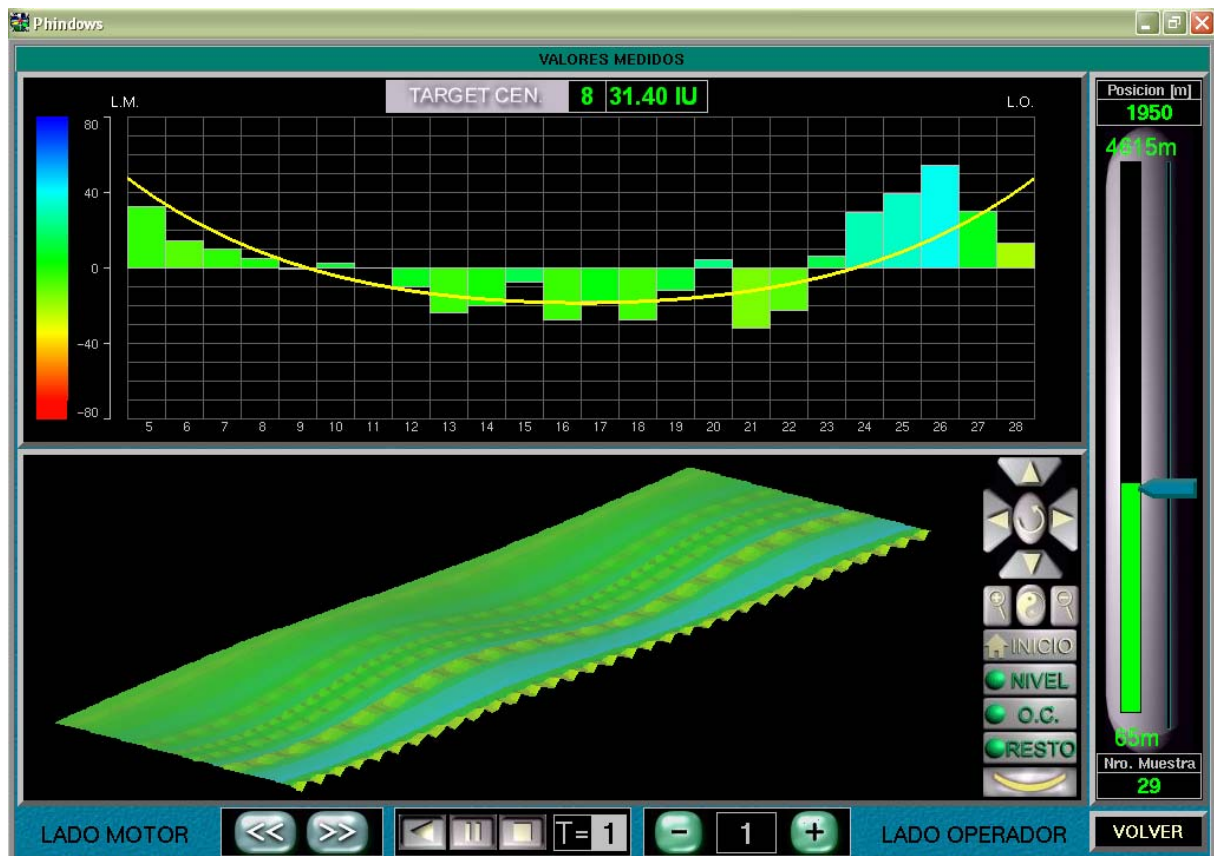


Figura 10: Representación tridimensional de la forma en un punto de una bobina.

5 Clasificación de la forma de la bobina:

Por último se define una clasificación de la forma de la bobina, evaluada de diferentes maneras. Como punto de partida y referencia se utilizó el trabajo “An approach for defining the flatness quality of cold-rolled strip”.^[4]

5.1 Índices Promedio

Se indican los IU promedio de las componentes de desnivel, centro, borde operador y borde motor.

5.2 Puntaje de Forma

Se definió un puntaje de 0 (malo) a 10 (óptimo) para cada defecto según el siguiente gráfico:

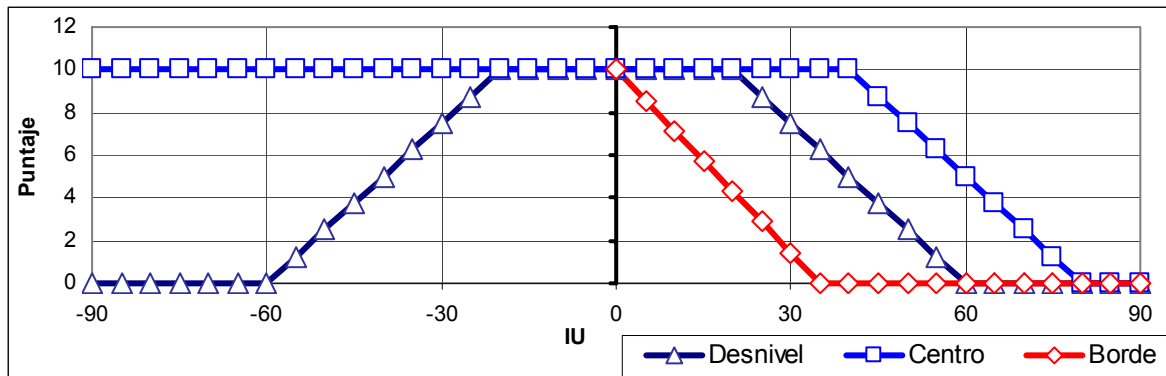


Figura 11: Puntuación de cada componente de la forma.

5.3 Puntaje Global de Forma

Los puntajes obtenidos para cada defecto en cada punto de la bobina, se combinan para dar un puntaje a la forma en ese punto:

$$\begin{aligned}
 \text{Puntaje.global} = & 0.5 \cdot \frac{kD \cdot \text{Punt desnivel} + kC \cdot \text{Punt Centro} + kB \cdot \text{Punt L/O} + kB \cdot \text{Punt L/M}}{kD + kC + 2 \cdot kB} + \\
 & + 0.5 \cdot \frac{\text{Punt desnivel} \cdot \text{Punt Centro} \cdot \text{Punt L/O} \cdot \text{Punt L/M}}{1000}
 \end{aligned}$$

Donde:

- ✓ kD = peso que se le da al desnivel = 1.0
- ✓ kC = peso que se le da a la ondulación centro = 2.0
- ✓ kB = peso que se le da a la ondulación borde = 1.0

El máximo puntaje global posible es 10. Se calcula el 50% mediante una suma y el resto mediante un producto para que un puntaje 0 (cero) en cualquiera de las componentes de un puntaje menor a 5 puntos en el total.

5.4 Clasificación de la Forma por Defecto y General

Se indica el porcentaje de la longitud total de la bobina dentro de 4 rangos de puntaje para cada una de las componentes de la forma. Por otro lado se clasifica la bobina en cinco posibles categorías (desde A=excelente hasta E=malo), teniendo en cuenta los porcentajes de longitud por debajo y por encima de puntajes límite. Estos límites fueron ajustados en función de los requerimientos de los clientes.

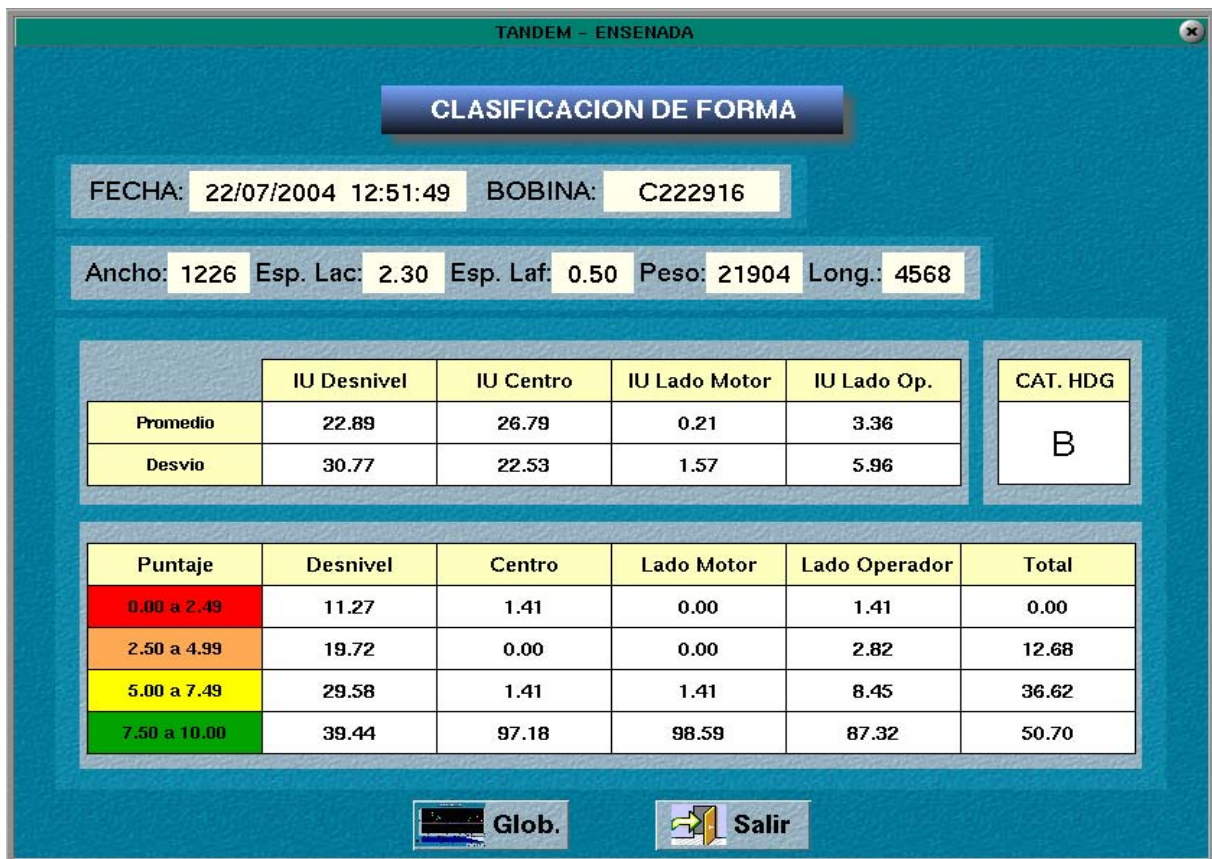


Figura 12: Clasificación integral de la forma de una bobina.

6 RESULTADOS

La implementación de las herramientas descritas en el presente trabajo permitió disminuir la caída cualitativa por defectos de forma en el laminador al 50% de los valores históricos:

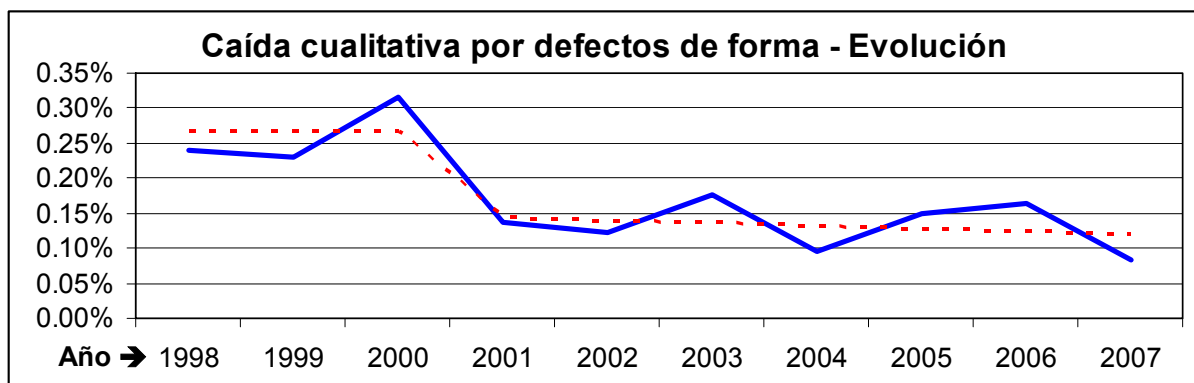


Figura 13: Evolución de los defectos de forma en la planta de Ensenada.

7 CONCLUSIONES

La implementación de las herramientas descritas en el presente trabajo facilita el diagnóstico temprano y resolución de problemas de forma a la salida del Tandem asociados a fallas de equipos, errores operativos y problemas con el material de entrada.

REFERENCIAS

- 1 ROBERTS, W – Cold rolling of steel – New York , Marcel Dekker Inc. , Cap. 11, p. 675 a 690, 1978
- 2 DOMANTI, S.; EDWARDS, J.; DAVIES, R.; PAARDEKOOPEL, S.; WALLACE, G. – 26th International Rolling Technology Course – Australia , Industrial Automation Services Pty. Ltd. , Cap 11 , p. 3 a 11, 2005
- 3 SHEPPARD, T. – Shape in metal strip: 'the state of the art' – Proceedings of Shape Control conference - London, The Metals Society, p. 12, 1976
- 4 BRAVINGTON, C.A.; BARRY, D.C. – An approach for defining the flatness quality of cold-rolled strip – Proceedings of Shape Control conference - London, The Metals Society, p. 39 a 45, 1976

APÉNDICE 1: Expresiones de cálculo para el ajuste por cuadrados mínimos:

1. Ajuste por cuadrados mínimos:

Para ajustar una serie de puntos $(x_i; y_i)$ mediante una función $y=f(x)$ por el método de cuadrados mínimos, debe determinarse la función $f(x)$; con los parámetros a ; b ; c , tal que:

$$g(x_i; y_i; a; b; c) = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a; b; c) - y_i]^2 \text{ sea mínimo}$$

2. Ajuste de la componente lineal:

Se pretende ajustar: $y = b \cdot x$

Por lo tanto debe determinarse el valor de b tal que:

$$g(x_i; y_i; b) = \sum_{i=1}^N [bx_i - y_i]^2 \text{ sea mínimo } \therefore g(x_i; y_i; b) = \sum_{i=1}^N [b^2 x_i^2 - 2bx_i y_i - y_i^2] \text{ sea mínimo}$$

Para ello se deriva la función g respecto de b y se iguala a 0:

$$\frac{dg(x_i; y_i; b)}{db} = \sum_{i=1}^N [2bx_i^2 - 2x_i y_i] = 0 \quad \text{Y se puede despejar el valor de } b: \quad b = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2}$$

3. Ajuste de la componente cuadrática:

En este caso se desea ajustar una serie distinta de puntos $(x_i; y_i)$ mediante una función:

$$y = ax^2 + c$$

Para ello debe minimizarse la función:

$$g(x_i; y_i; a; c) = \sum_{i=1}^N [ax_i^2 + c - y_i]^2$$

Por lo tanto se igualan a cero las derivadas parciales de la función g respecto de a y c . O sea:

$$\frac{dg}{da} = 0 \quad a = \frac{\sum x_i^2 y_i - \frac{\sum x_i^2 \sum y_i}{N}}{\sum x_i^4 - \frac{(\sum x_i^2)^2}{N}}$$

Derivando y despejando se obtiene que:

$$\frac{dg}{dc} = 0 \quad c = \frac{\sum y_i - a \sum x_i^2}{N}$$

Donde N es la cantidad de datos evaluados.