

# EL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE MEDICIÓN DE FUERZA DE LAMINACIÓN<sup>1</sup>

Enrique Botta<sup>2</sup>  
Felipe Poblete<sup>2</sup>  
Andrés Vigliocco<sup>2</sup>

## Resumen

La medición de fuerza separatriz es fundamental para la operación y la calidad del producto procesado en el laminador de chapas en caliente. En este trabajo se analizan los factores que afectan la medición de esta variable. Se incluye la influencia de las placas de suplemento, placas de balanceo, rocker plate, estado del piso del laminador y demás componentes afectados por la fuerza de laminación. El estudio se efectuó utilizando la técnica de análisis por modelo de elementos finitos.

**Palabras clave:** Modelos de elementos finitos; Fuerza de laminación; Celdas de carga.

## THE FEM STUDY AS A TOOL OF FAULT DIAGNOSTIC IN ROLLIFG FORCE MEASUREMENT SYSTEMS

## Abstract

Good measurement of the roll force in the hot strip mill is a must for a good operation and quality of the coil. In this paper the factors that influence the measurement of the roll force in a hot strip mill are analyzed. The influence in the measurement of the roll force of the balancing plate, rocker plate, shim plates, mill housing, pressure plates and all components affected by the rolling force are analyzed. The study was done using finite element model technology.

**Key words:** Finite element model; Roll force; Load cells.

<sup>1</sup> Trabajo a ser presentado en el 46º Seminario de Laminación – Procesos, Productos Laminados y Revestidos, 27 al 30 de octubre de 2009, Santos, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Ternium Siderar – San Nicolás – Buenos Aires - Argentina

## 1 INTRODUCCIÓN

Las exigencias necesarias para mejorar la confiabilidad y exactitud de los equipos de medición en los trenes de laminación se han incrementado con el objeto de mejorar la calidad de los productos laminados y fabricar éstos a menores costos.

Esto ha generado, en definitiva, un mayor grado de automatismo en los equipos de los laminadores, tanto en los nuevos como en la modernización de los existentes. Entre estas demandas indicamos:

- Necesidad de tolerancias mas estrechas en espesor debido exigiendo una medición de la fuerza separatriz mas exacta
- Una mayor producción y menores disturbios gracias a los sistemas de cambio rápido de cilindros
- Reducir los tiempos de paradas por mantenimiento
- Reducir los tiempos de parada por sobrecargas / atascamientos.

Uno de los parámetros más importantes del control de los laminadores es la fuerza separatriz, cuyo dispositivo de medición es comúnmente denominado “celda de carga”.

Cuando se instalan celdas de carga en un laminador es necesario conocer la distribución de cargas en el cuerpo del laminador y en sus componentes particularmente ya que puede ser errónea la indicación de fuerza y no por la celda de carga en si misma.

Al definir el tipo y modelo de celdas de carga a instalar en un laminador se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La celda de carga, debido al servicio al que está sometida, debe ser insensible a esfuerzos de corte , esfuerzos laterales, vibraciones, ataque de aceite y aguas y ocasionales sobrecargas estáticas y dinámicas.
- El equipo debe ser capaz de operar continuamente sin perder exactitud a pesar de las condiciones operativas severas, ya que no es conveniente realizar ajustes con frecuencia.
- Los tiempos de cambio de rodillos deben ser minimizados para maximizar la capacidad productiva del laminador.
- Las variantes de modelos celdas de carga deben ser suficientes para seleccionar la mejor medida y forma para la aplicación.

Las condiciones fundamentales a tener en cuenta en la medición, entre otras, son:

- La fuerza total debe pasar por la celda de carga
- La fuerza debe ser medida en una posición lo mas cercana posible al gap de los rodillos de trabajo
- Debe protegerse de fuerzas laterales y de torsión

Con estas consideraciones existen tres lugares posibles para la instalación de las celdas de carga en laminadores convencionales, cada posición tiene sus ventajas e inconvenientes. En general los fabricantes de celdas de carga ofrecen tres alternativas con modelos que difieren en la forma y de distinta capacidad nominal, considerando para esto un valor de tensión de  $10 \text{ kg/mm}^2$ . para el cálculo de la sección de la celda

La elección resulta del análisis del uso de la celda de carga, la disponibilidad de espacio, de la posibilidad del servicio y del costo de la instalación.

Las alternativas son:

1. Debajo del tornillo (Fig. 1): Cuando se instala la celda de carga debajo del tornillo se puede armar un conjunto compacto con el rodamiento, esta configuración facilita el manejo del sub-conjunto para mantenimiento. La ventaja principal que genera esta disposición es una muy buena distribución

de fuerzas, la instalación es simple y económica y no es necesario maquinar el stand para que entre en servicio. La desventaja es que requiere atención durante el cambio de rodillos ya que ocupa un espacio considerable en el gap de laminado y además el cable y los conectores están muy expuestos y deben ser protegidos contra la humedad y daño mecánico.

2. Debajo del rodillo inferior de apoyo (Fig. 2): Cuando se instala en esta posición es necesario disponer del espacio suficiente. La ventaja es que no se requiere especial atención durante el cambio de rodillos ya que deja libre el gap del laminador y está mejor protegida contra daños mecánicos. Las desventajas son que se debe maquinar el stand, lo que es muy costoso y que la exposición al agua y a la suciedad de la celda y las placas de presión hace difícil mantener las condiciones requeridas para esta aplicación.
3. Entre la tuerca y el tornillo (Fig. 3): La ubicación de la celda entre la tuerca y el cuerpo del laminador necesita una celda de forma anular. Este diseño de celda fue desarrollado especialmente para poder medir en laminadores existentes cuando las dos alternativas indicadas antes son impracticables. Esta aplicación en laminadores existentes es costosa porque hay que rediseñar la tuerca, pero tiene la ventaja que la celda está bien protegida mecánicamente. Su principal problema es la histéresis entre la tuerca y el housing y el acceso para mantenimiento.

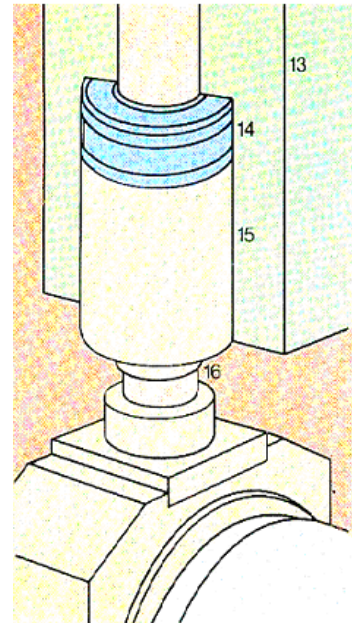
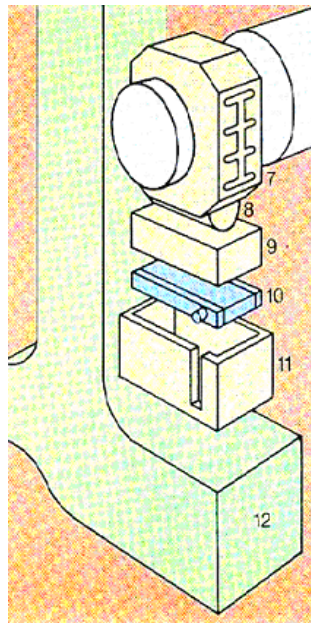
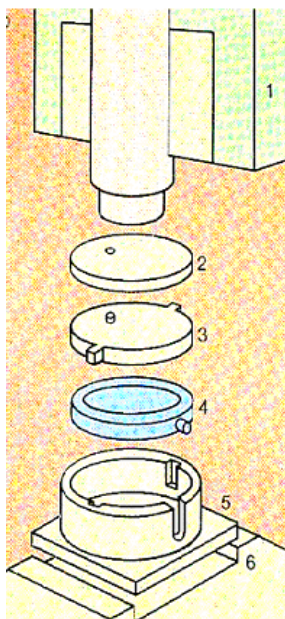


Fig. 1 – Debajo del tornillo    Fig. 2 - Debajo del rodillo de apoyo    Fig. 3 - Arriba de la tuerca

En general desde el punto de vista de la exactitud de la medición no hay diferencias significativas entre las tres posiciones de medición, considerando condiciones de mantenimiento adecuadas.

En caso que las condiciones de trabajo se vayan deteriorando la medición se verá degradada.

En el laminador de chapas en caliente de Ternium Siderar las celdas de carga estaban ubicadas debajo del tornillo tal como se muestra en la Fig. 1.

A fin de disponer el espacio de la celda para incorporar un dispositivo que disminuya el tiempo de subir y bajar los cilindros durante el cambio de cilindros (y así aumentar la capacidad productiva del laminador) se decidió cambiar a la posición debajo del rodillo de respaldo inferior, reemplazando un bloque de suplemento del trineo del

cambio rápido de cilindros que se había instalado en el año 1995, por una celda del tipo rectangular, con un diseño como el indicado en la Fig. 2. Las mismas fueron puestas en servicio en el año 2001.

Al cabo de un año de operación se comenzaron a detectar errores de medición que se manifestaban por un incremento de la diferencia de fuerza medida entre la celda del lado operación y la celda del lado motor. Luego se comenzaron a detectar cambios en la curva elástica. Por último, comienzan a aparecer daños importantes en las celdas de carga que llevan a la necesidad de reemplazo por deformación permanente y/o rotura.

Esta situación crece en forma alarmante durante los siguientes dos años llevando a una situación sumamente crítica a la medición de fuerza en el laminador. Para mantener las mediciones, en ese período se debieron reemplazar varias celdas, incrementando los costos de mantenimiento debido al alto costo de las mismas.

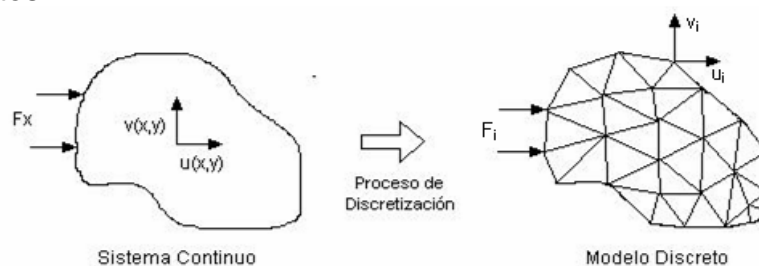
Por lo tanto se decidió efectuar un estudio detallado de las causas del problema y sus posibles soluciones.

Todo indicaba que los daños a las celdas se originaban en una concentración de tensiones en zonas localizadas de la misma que llevaban las sobrecargas localizadas. Estos valores de sobrecarga evidentemente superaban los de diseño de las mismas por lo que se decide desarrollar el estudio a través de métodos que permitan analizar la distribución de tensiones a lo largo de todos los componentes que son afectados por la fuerza separatriz a fin de determinar las condiciones de servicio mas favorables.

## 2 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

### 2.1 Introducción

El método de los elementos finitos (MEF) se trata de un método general para la solución de problemas de contorno explicitados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, para ellos se hace uso de la subdivisión de una región donde están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas "elementos finitos".



$u, v$ : Vector desplazamiento -  $F$ : Fuerzas exteriores  
Fig. 4 - Discretización de un elemento continuo.

El proceso se indica en la Fig. 4: primero, la geometría es definida por el diseñador o creada por algún programa CAD, luego se define el modelo matemático a resolver, es decir el tipo de ecuaciones, las condiciones de borde, propiedades materiales y otros detalles. Una vez efectuada esta definición el programa resuelve las ecuaciones y provee los resultados en forma apropiada para el analista.

Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos o funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal.

## 2.2 Método de Cálculo

Un típico análisis de Elementos finitos involucra los siguientes pasos:

- 1) Dividir la estructura continua en elementos finitos (proceso de mallado).
- 2) Formular las propiedades físico - mecánicas de cada elemento.

Módulo de elasticidad (Módulo de Young)	E
Módulo de rigidez al esfuerzo cortante	G
Coefficiente de Poisson	$\eta$
Matriz de rigidez del elemento	K
Matriz de rigidez de la estructura (global)	Ke
Espesor de la placa	t
Fuerza nodal exterior	ri
Vector de desplazamientos	u
Matriz de tensiones	S
Matriz del problema discretizado	H
Fuerzas nodales	F

- 3) Ensamblar los elementos para obtener el modelo matemático.
- 4) Aplicar el vector carga exterior que actúa sobre la estructura.
- 5) Especificar las condiciones de vínculo de la estructura respecto al espacio.
- 6) Resolver el sistema lineal de ecuaciones algebraicas y determinar los vectores desplazamientos nodales.
- 7) A partir de los desplazamientos nodales calcular el mapa de distribución de tensiones.

La potencia del método consiste en su versatilidad ya que la estructura analizada, en este caso la celda de carga del tren laminador, puede estar sometida a cargas y condiciones de vínculo arbitrarias.

## 2.3 Método de Análisis

La modelización fue desarrollada como un cuerpo sólido tridimensional por medio del programa de CAD I-deas (propiedad de la división automatización y controles de Siemens) cubriéndose las etapas de *Modelizado*, *Condiciones de vínculo*, *Mallado*, *Resolución por Método de Elementos Finitos* y *Postprocesado de datos*. A partir del conocimiento de las dimensiones de las piezas que componen los sistemas y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y físicas de sus materiales, condiciones de vínculo y grados de libertad asociados, se preparó el modelo computacional con el objetivo de determinar el mapa de tensiones de cada una de las piezas que componen este sistema.

## 2.4 Criterio de Falla Adoptado

Se indica que un material ha llegado a la rotura cuando llega a un límite de sollicitación tal que las tensiones poseen un valor para el cual el material no es utilizable para el fin que se lo destina, en caso de un material dúctil la rotura está en correspondencia con el límite de fluencia

Hay casos de resistencia de materiales sencillos como el estado lineal de tracción ó el estado de corte puro donde es fácil determinar las causas de la rotura, pero hay estados tensionales mas complicados, en general dobles o triples donde no es directa esta determinación. Además sería muy difícil realizar un ensayo de una probeta sometida al mismo estado tensional de la del estudio porque implicaría maquinas y equipos muy complicados

Las teorías de rotura tratan de elaborar hipótesis tendientes a establecer las causas primordiales del colapso de materiales, en general no son demostrables y solo pueden justificarse experimentalmente, además las distintas teorías son solo aplicables a distintos casos

Se considera:

a.- Sólo se realiza un ensayo de tracción, que es el mas fácil de ejecutar.

b.- Se define la “tensión de comparación” como aquella que actuando sobre una barra sometida a un esfuerzo de tracción origina un estado tensional igualmente peligroso que el estado de tensiones real.

El criterio de falla adoptado es la Teoría de la máxima energía de distorsión (Huber, Henckly, Von Mises). Esta dice que “en un cuerpo sujeto a un estado de tensiones cualquiera, el comienzo de la fluencia en un punto, ocurre solamente cuando la energía de distorsión por unidad de volumen correspondiente a dicho estado de tensión, alcanza el valor de la energía de distorsión de la sollicitación por tracción simple, cuando se alcanza el limite de fluencia”.

Por lo tanto la tensión de Von Mises es el valor que nos permite comparar un estado compuesto de tensiones en una estructura con un ensayo de tracción simple realizado en una máquina universal de ensayo. Esta teoría se adapta perfectamente a los materiales dúctiles

Como ejemplo, en el caso del perfil ensayado en un estado doble de tensiones, la energía de distorsión está dada por:

$$W_F = [(1 + \eta) / 3 \cdot E] \cdot [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot T_{xy}^2]$$

Mientras que en un ensayo de tracción realizado en una máquina universal, la energía de distorsión esta dada por:

$$W_F = [(1 + \eta) / 3 \cdot E] \cdot \sigma_c^2$$

Igualando la energía de distorsión en los dos casos, se tiene que la tensión de comparación será:

$$\sigma_c = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot T_{xy}^2)}$$

Donde:

$W_F$  Energía de deformación

$E$  Modulo de elasticidad ( Modulo de Young)

$\sigma_x$  Tensión sobre el eje X

$\sigma_y$  Tensión sobre el eje Y

$\sigma_c$  Tensión de comparación

$T_{xy}$  Esfuerzo de corte perpendicular al eje X

$\eta$  Coeficiente de Poisson

Este es el valor a comparar con la tensión admisible del material obtenida en la máquina de ensayo de tracción.

Las imágenes desarrolladas para cada estado de carga corresponden a un gradiente de escala de tensiones de acuerdo a la quinta teoría de falla de Von Mises.

Estos valores de tensiones presentados en cada una de las imágenes podrán ser comparados con los valores de tensión de fluencia del material determinados a partir de un ensayo uniaxial realizado en una máquina de ensayos de tracción.

El estudio permitió calcular la distribución de tensiones sobre los componentes del sistema de medición, en especial la celda de carga, considerando los estados de carga que produce el cilindro de apoyo inferior a través de la placa “rocker plate” que tiene un radio de curvatura de 1600 mm, luego se estudió la influencia de distintas condiciones anormales sobre la celda de carga:

- Influencia de la distancia de la celda de carga al rocker plate
- Influencia de la cantidad de suplementos montados
- Desplazamiento de rocker plate
- Falta de planitud en la base del laminador
- Falta de planitud en la superficie superior de la placa de apoyo inferior de celda.

## 2.5 Modelización del Sistema

Se efectuó una modelización del sistema, considerando los componentes mostrados en la Fig 5.

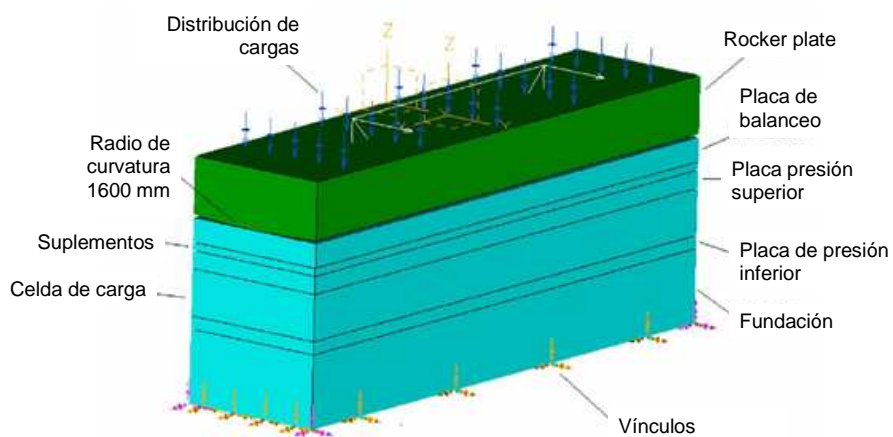


Fig. 5 - Disposición de los componentes del sistema de medición.

## 2.6 Evaluación de la Distribución de cargas

a) En condiciones normales de los distintos componentes del sistema.

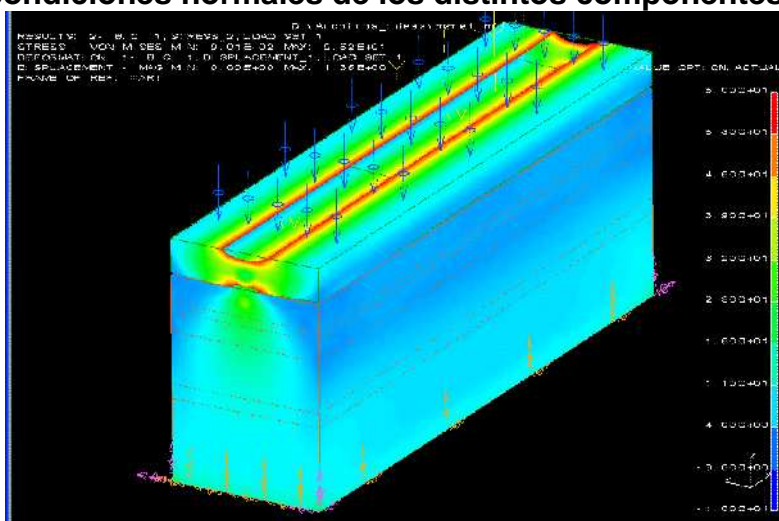
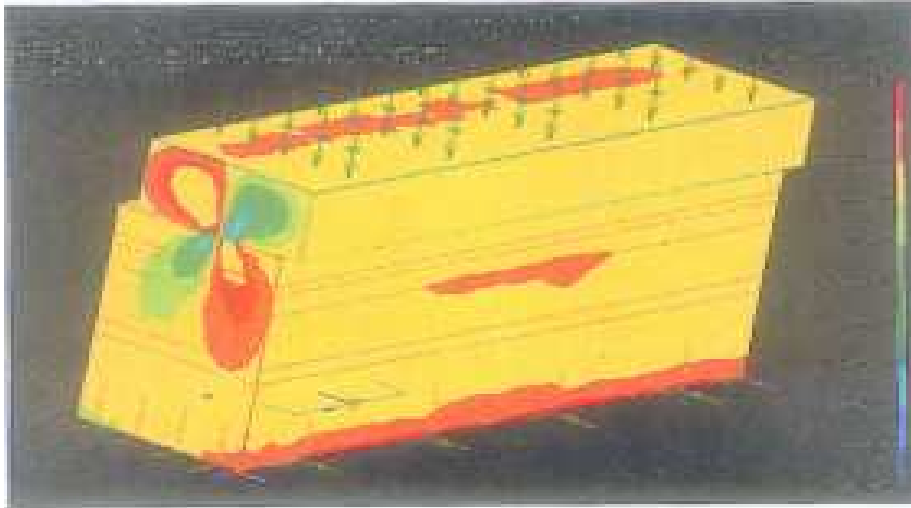


Fig. 6 - Distribución de tensiones (vista general)

Conclusiones parciales:

- Se observan diferencias de tensiones de Von Mises entre las caras superior e inferior de la celda (superior  $15\text{kg/cm}^2$ , inferior  $12\text{kg/cm}^2$ )
- Distribución homogénea de tensiones, no generándose tensiones tangenciales ni desplazamientos laterales

**b) Cuando el rocker está desplazado 25 mm, realizando diferentes cortes para evaluar el estado de tensiones**



**Fig. 7 - Distribución de tensiones (vista general)**

Conclusiones parciales:

- Se observan diferencias de tensiones de Von Mises entre las caras superior e inferior, superior  $17\text{kg/cm}^2$  y cara inferior  $12\text{kg/cm}^2$
- Se observa una distribución de Von Mises no homogénea, generándose tensiones y esfuerzos laterales, cara lateral derecha  $12\text{kg/mm}^2$  y cara lateral izquierda  $4\text{kg/mm}^2$

**c) Cuando hay falta de planitud en la base del laminador**

- Se generó un plano de corte sobre la superficie de la celda de carga y se determinan las tensiones de Von Mises
- Se modifica la separación en 20 mm de la celda a la fundación demostrando el efecto de la falta de planitud sobre la celda
- Se determinan las tensiones en dos planos perpendiculares a la celda de carga, uno en la mitad y otro atravesando la mayor parte de la zona de falta de planitud (Fig. 9) determinando el mínimo (ver marca en Fig. 9), este plano horizontal está a 55 mm



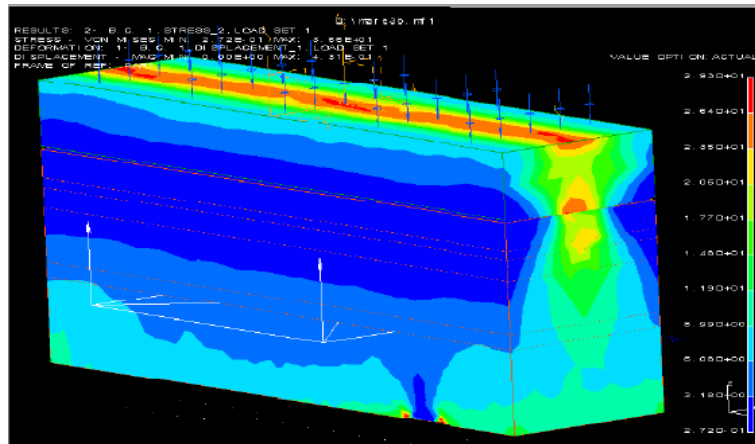


Fig. 8 - Distribución de tensiones.

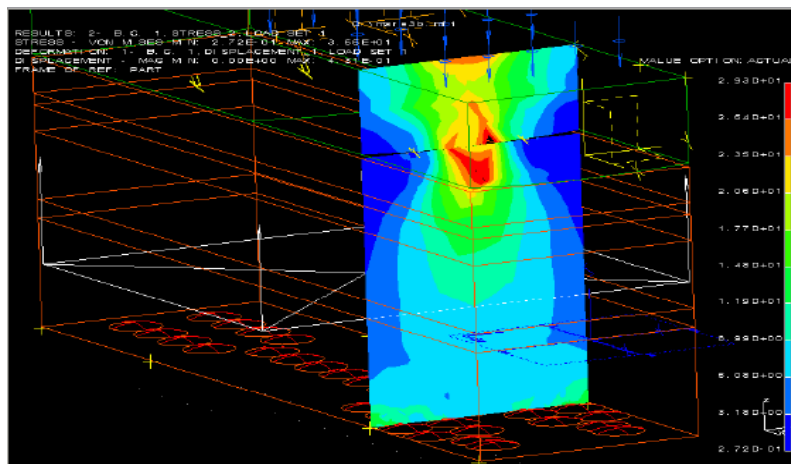


Fig. 9 - Distribución de tensiones, corte que atraviesa la zona de falta de planitud.

#### Conclusiones parciales.

- La falta de planitud en la base del laminador genera tensiones en la celda de carga no homogénea fundamentalmente en la cara inferior
- Alejar la celda del rocker mejora la distribución de tensiones, pero al acercarlo la fundación la falta de planitud empeora la distribución de tensiones en la cara inferior de la celda

#### d) Cuando hay falta de planitud en la superficie superior de la placa de apoyo inferior de celda

Se realizan diferentes cortes para determinar el estado de tensiones cuando la superficie de apoyo entre la celda y la placa de presión inferior está disminuida.

#### Conclusiones parciales

- Se observa variación de la tensión de Von Mises, estas son debida a que la superficie de contacto entre la celda y la placa de apoyo no es homogénea provocando zonas de concentración de tensiones del conjunto
- Las magnitudes de la tensión son: área central  $10 \text{ kg/mm}^2$  y área lateral  $2 \text{ kg/mm}^2$ .

### 3 CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO

1. El empleo de suplementos provocan una disminución de rigidez a la flexión del conjunto, originando una distribución de tensiones del tipo de

- gota mas pronunciada, esto contribuye a aumentar la no homogeneidad de tensiones sobre la celda de carga.
2. La desalineación del rocker plate, del orden de milímetros genera una distribución de tensiones no homogénea entre los laterales de la celda, dando origen a desplazamientos laterales.
  3. La corrosión en la base del laminador genera efectos de concentración de tensiones, estos afectan a la celda de carga si la distancia es del orden de los 55 mm. Los efectos simulados de corrosión o de falta de apoyo en las placas de apoyo de las celdas del orden de 200 cm<sup>2</sup> provocan una distribución de carga no homogénea de magnitudes importantes.
  4. Alejar la celda del rocker plate mejora la distribución de tensiones, como distancia límite debería tomarse 85 mm.

#### **4 RECOMENDACIONES GENERADAS CON LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE ELEMENTOS FINITOS**

1. Minimizar el uso de placas de suplemento, montando una única placa de las dimensiones correspondientes.
2. Minimizar la desalineación entre el rocker plate y la placa de balanceo.
3. Localizar la celda a un mínimo de 90 mm de la fundación.
4. Maximizar la distancia entre el rocker y la celda de carga.
5. Eliminar todo tipo de corrosión del piso del laminador y entre las placas de apoyo y las celdas.

#### **5 IMPLEMENTACIÓN EN EL LAMINADOR DE CHAPAS EN CALIENTE DE TERNIUM SIDERAR**

Con el estudio y las recomendaciones se llega a las siguientes conclusiones con las correspondientes implementaciones:

1. No es posible eliminar los suplementos dado que estos ajustan la línea de paso ante los cambios de los rodillos de respaldo, un operador puede maniobrar la placa de balanceo e insertar los suplementos que correspondan, con placas de balanceo de diferentes medidas no sería posible  
No obstante se implementa:
  - Cambiar los suplementos por otros de diferentes medidas para tener que insertar solo uno.
  - Construirlos de material más duro y con mayor resistencia a la corrosión.
  - Un sistema para mantenerlos en correcto estado (limpieza, planitud etc.).
2. Cambiar la celda de carga por otra de menor ancho y la misma capacidad nominal, de esta manera se logra una mejor distribución de carga ya que la línea de carga del rocker plate intercepta mejor a la celda. Considerar la elección de sensores que soporten mejor los esfuerzos laterales y sobrecargas.
3. Rediseñar las placas de apoyo de la celda con material de mayor dureza y mayor resistencia a la corrosión utilizando una placa superior de mayor espesor y una placa inferior ajustada a la medida resultante.
4. Con los cambios en 2. y 3. se rediseñó el alojamiento de las celdas en el sistema de cambio de rodillos considerando las condiciones de planitud y

paralelismo que exige la aplicación, tomando a este como un subconjunto integrado por: el alojamiento, la celda de carga y las dos placas de apoyo de la celda.

Para facilitar los cambios se construyeron dos equipos de repuesto para fácil intercambio en paradas menores, con el armado previo el subconjunto de modo que la tarea consista sólo en montarlo y conectar el cable de las celdas de carga.

5. Considerando que en las inspecciones previas se encontró una corrosión excesivamente avanzada en las bases del laminador se decidió realizar el maquinado del piso de todos los stands.
6. Implementar un estricto programa de inspección de las placas de balanceo a realizarse durante los cambios de cilindro de respaldo.
7. Implementar un programa de inspección de los rocker plate cuando se realiza el mantenimiento preventivo de los rodillos de respaldo, confirmando la forma del mismo.

## **6 CONCLUSIONES FINALES**

Partiendo de un cambio de tecnología para obtener una mejora en la capacidad de producción del laminador, se llegó a una situación crítica debido a las fallas en la medición de la fuerza separatriz.

Para solucionar este problema se formó un grupo multidisciplinario en el que participaron profesionales de Ingeniería, Procesos y Mantenimiento.

Con base en una herramienta de simulación, el “método de elementos finitos” y verificaciones confirmadas con la práctica, se decidió implementar cambios significativos en distintos componentes del sistema de medición de fuerza y la estrategia de mantenimiento.

Como resultado, se logró mejorar significativamente las mediciones de fuerza, reduciendo al mismo tiempo las indisponibilidades operativas y los costos de mantenimiento.

## **BIBLIOGRAFIA**

Estudio FEM realizado por “Centro Regional de Formación Profesional y Asistencia Técnica” de Rosario. *Ing Pablo Sapia – Ing. Arturo Muchñack*

*El método de los elementos finitos - O.C Zienkiewicz*

*New generation of Pressductor roll-force meter – ABB (Ex ASEA)*

*Force sensing in rolling mills – George Kelk Corporation*

*Estabilidad II – Universidad Nacional del Nordeste*

*Método de los elementos finitos – UTN Bahía Blanca*