



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE LAMINACIÓN DE UN PERFIL  
S MEDIANTE FEM**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

**P R E S E N T A:**

**ENRIQUE PADILLA GARCIA**



DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ

CIUDAD UNIVERSITARIA 2015

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente dentro de sus aulas. Gracias Facultad de Ingeniería por todas las enseñanzas y experiencias proporcionadas a lo largo de estos años.

A mi director de tesis M. en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz por las enseñanzas brindadas a lo largo de mi preparación académica, así como por el apoyo y tiempo brindado para la realización de este trabajo. Gracias por todos los consejos proporcionados a lo largo de mi estancia en la UDIATEM.

Al M. en C. Osvaldo Ruiz Cervantes por el apoyo brindado para la generación de los primeros modelos, los cuales fueron la base para la realización de este trabajo y por las aportaciones y comentarios para la mejora de este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz y al Ing. Jorge Luis Romero Hernández por todos las aportaciones y comentarios que hicieron durante la revisión de este trabajo.

A mis padres, Teresa y Salvador, por la comprensión, el cariño, los sacrificios y el apoyo brindado durante esta etapa. Gracias a ustedes este logro ha sido posible.

A mi hermana, Elizabeth, por el apoyo y cariño brindados durante todos estos años. Gracias por ser una de las mejores profesoras que he tenido.

Al Ing. Mauricio Cristobal Granados por los consejos y apoyos brindados durante la realización de este trabajo, pero en especial por la gran amistad brindada durante todos estos años.

A mis compañeros y amigos: Pantoja, Jorge Luis, Gerardo, Kevin, Erik, Ricardo, Salvador Linares y Claudia por su valiosa amistad y por todos aquellos buenos momentos que compartimos.

Un agradecimiento especial al Ing. Alan Saucedo Osorno por los consejos brindados durante la realización de este trabajo.

# Prólogo

Las altas exigencias comerciales han obligado a la industria del conformado a desarrollar nuevos productos y procesos que cumplan con los más altos estándares de calidad. Uno de los elementos más importantes para el éxito en el diseño de productos y procesos es la implementación de nuevas tecnologías que proporcionen agilidad y confiabilidad para responder a tales exigencias.

Debido a esto, el uso de las simulaciones numéricas en la industria del conformado se ha incrementado considerablemente, ya que su implementación permite reducir los costos referidos al desarrollo de un proceso en particular.

En este trabajo se hablará específicamente del proceso de laminación de una viga S, la cual comúnmente se utiliza en estructuras para edificaciones.

La mayoría de las simulaciones para el laminado de perfiles se han realizado a través de una paquetería de elemento finito basándose en una metodología Arbitraria Lagrangiana-Euleriana (ALE); con las cuales en varios casos se han obtenido análisis termomecánicos bastante certeros.

Por otro lado, se encuentra la formulación Acoplada Euleriana-Lagrangiana (CEL por sus siglas en inglés). La cual principalmente ha sido utilizada para resolver problemas relacionados con el contacto fluido-estructura, sin embargo, el alcance de esta metodología ha presentado ventajas sobre un análisis sólido tradicional, principalmente en presencia de deformación severa; debido a lo cual el presente trabajo aplica esta metodología.

El objetivo consiste en verificar si la metodología CEL es aplicable a la laminación de una viga S, además de analizar el efecto del escalamiento de velocidad aplicado al proceso y comparar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos por He Qinqiang en 2013 para un proceso similar.

Este trabajo consta de 5 capítulos; en el primero se plantean los aspectos generales del proceso de laminación de perfiles, las variables del proceso, el herramental utilizado y la modelación matemática de éste.

El segundo capítulo presenta una recopilación de trabajos realizados acerca del modelado del proceso de laminación de perfiles mediante elemento finito con el objetivo de presentar datos que contribuyeron a la generación del modelo y que además sirvieron como punto de comparación de los resultados obtenidos.

En el tercer capítulo se dan a conocer los pasos realizados, los parámetros, las propiedades y las condiciones utilizadas para la generación de este nuevo modelo.

Los resultados obtenidos por la simulación realizada se presentan en el capítulo cuatro, en este capítulo se analizaron la distribución de esfuerzos, deformación, flujo de material y fuerza de laminación presentadas a lo largo del proceso.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del análisis de resultados.



# Índice

|  |     |
|--|-----|
| <b>Agradecimientos</b> .....   | I   |
| <b>Prólogo</b> .....   | II  |
| <b>Índice</b> .....  | III |
| <b>Nomenclatura</b> .....  | IV  |
| <b>Capítulo 1 Laminado de Perfiles</b> .....   | 1   |
| 1.1 Laminado de perfiles.....  | 1   |
| 1.2 Tipos de perfiles.....   | 3   |
| 1.3 Rodillos de laminación.....  | 4   |
| 1.4 Lubricación.....   | 5   |
| 1.5 Laminado de una viga W.....  | 6   |
| 1.6 Análisis del proceso de laminación de perfiles.....  | 7   |
| 1.7 Parámetros de la laminación de perfiles.....   | 11  |
| <b>Capítulo 2 Análisis del proceso de laminación de perfiles mediante el método de elementos finitos</b> ..... | 14  |
| 2.1 Análisis tridimensional no isotérmico del laminado de perfiles.....  | 14  |
| 2.2 Deformación y distribución de temperatura en el laminado de una viga S mediante pasos múltiples.....       | 19  |
| 2.3 Modelo termo-mecánico del proceso de laminación de una viga S.....   | 23  |
| <b>Capítulo 3 Modelado del proceso de laminación de una viga tipo S mediante el método CEL</b> .....           | 27  |
| 3.1 Análisis Acoplado Euleriano Lagrangiano (CEL).....   | 27  |
| 3.2 Laminación de una viga tipo S.....   | 29  |
| 3.3 Geometrías.....  | 29  |
| 3.4 Propiedades del material.....  | 32  |
| 3.5 Parámetros del proceso.....  | 32  |
| 3.6 Mallado.....   | 33  |
| <b>Capítulo 4 Análisis de resultados</b> .....   | 36  |
| 4.1 Distribución de la deformación.....  | 36  |
| 4.2 Distribución de esfuerzos.....   | 40  |
| 4.3 Flujo de material.....   | 43  |
| 4.4 Fuerza de laminación.....  | 45  |
| 4.5 Energía interna y cinética.....  | 47  |
| 4.6 Tiempo de cómputo.....   | 48  |
| <b>Capítulo 5 Conclusiones</b> .....   | 49  |
| <b>Referencias</b> .....   | 51  |



## Nomenclatura

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\bar{V}_0$         | Vector de posición del punto $V_0$ .  |
| $\bar{V}_1$         | Vector de posición del punto $V_1$ .  |
| $\bar{V}_2$         | Vector de posición del punto $V_2$ .  |
| $\bar{V}_3$         | Vector de posición del punto $V_3$ .  |
| $V_0$               | Punto $V_0$ .   |
| $V_1$               | Punto $V_1$ .   |
| $V_2$               | Punto $V_2$ .   |
| $V_3$               | Punto $V_3$ .   |
| $V_x$               | Velocidad a lo largo del eje X.   |
| $V_y$               | Velocidad a lo largo del eje Y.   |
| $V_z$               | Velocidad a lo largo del eje Z.   |
| $W_i$               | Potencia requerida para deformar el material plásticamente.                             |
| $W_e$               | Potencia necesaria para superar las fuerzas de cizallamiento en la entrada de material. |
| $W_x$               | Potencia necesaria para superar las fuerzas de cizallamiento en la salida de material.  |
| $W_f$               | Potencia necesaria para superar la fricción.  |
| $\bar{\sigma}$      | Esfuerzo de cedencia.   |
| $\varepsilon$       | Deformación.  |
| $\dot{\varepsilon}$ | Velocidad de deformación.   |
| $J$                 | Jacobiano.  |
| $t$                 | Tiempo.   |
| $T$                 | Temperatura.  |

# Capítulo 1 Laminado de Perfiles

## 1.1 Laminado de perfiles

El laminado es un proceso de deformación en el cual el material de trabajo reduce su espesor mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos giratorios opuestos. Los rodillos giran para impulsar al material y comprimirlo simultáneamente entre ellos.

El proceso básico es el laminado plano (Figura 1.1), que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular. Este proceso está relacionado directamente con el laminado de perfiles, en donde una sección transversal cuadrada se transforma en un perfil.

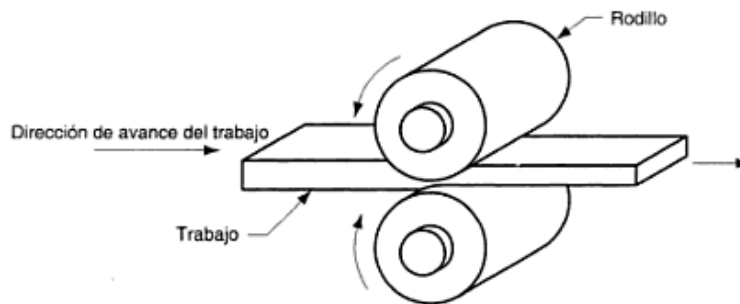


Figura 1.1 Proceso de laminado plano (Groover, 1997).

El proceso de laminado puede clasificarse en: trabajo en frío, trabajo en caliente y trabajo en tibio dependiendo de su temperatura de proceso. Los productos largos son laminados en caliente. Existen tres grupos que están esquemáticamente representados en la Figura 1.2.

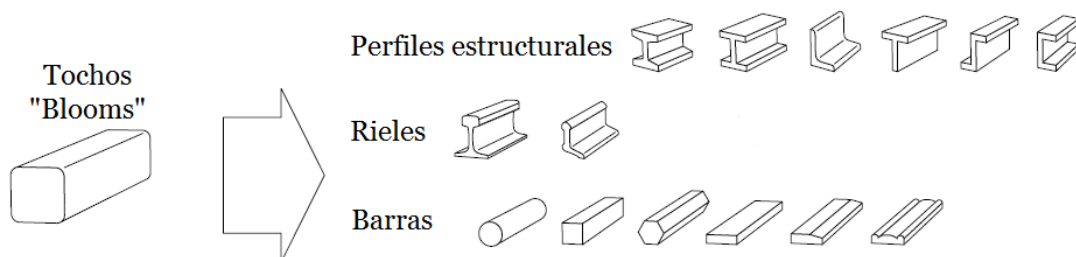


Figura 1.2 Productos de acero hechos mediante laminación (Groover, 1997).

En el laminado de perfiles, el material se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como vigas en I, ángulos y vigas tipo canal; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas corrugadas. El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada (Groover, 1997).

Al pasar el material de trabajo a través de un arreglo de rodillos especialmente diseñados (Figura 1.3) es posible laminar diversos perfiles. Debido a que la sección transversal del material se va a reducir de manera no uniforme es imprescindible un diseño cauteloso de la serie de rodillos para evitar defectos, mantener las tolerancias dimensionales y reducir el desgaste de las herramientas.

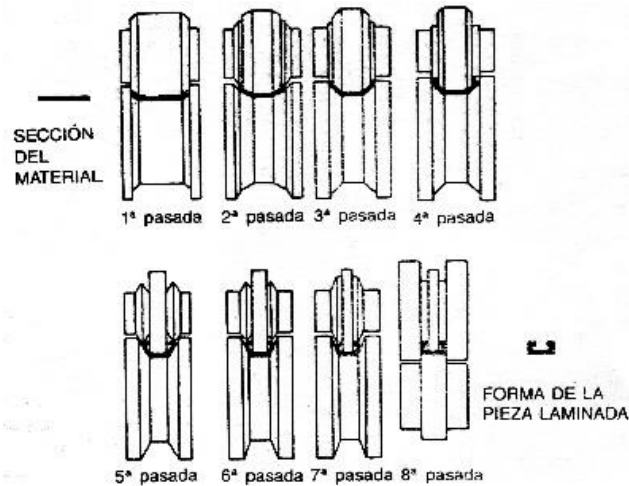


Figura 1.3 Etapas en el laminado de forma de una pieza de sección en u (Black, 1988).

Para obtener la forma deseada del producto final, el material de trabajo pasa a través de un tren de laminación, el cual se refiere al conjunto de cajas y elementos auxiliares como motores de accionamiento de los rodillos, guías de rodillos para la entrada y la salida del material, etc. (Enríquez, 2010).

Las cajas de laminación son el equipo elemental para el proceso de laminación (Figura 1.4). Consta de una estructura que sirve como chasis y de unos rodillos que realizan el conformado (Enríquez, 2010).

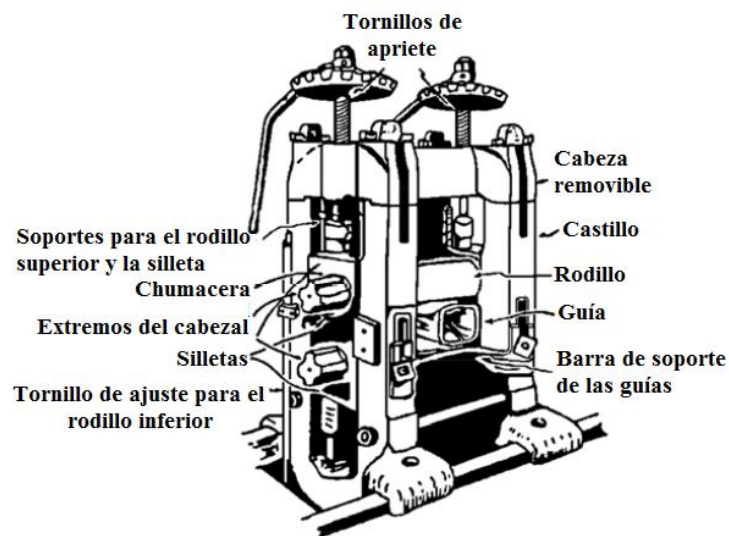


Figura 1.4 Caja de laminación (Ortiz, 2013).

Hay cajas dispuestas unas a continuación de otras, con separación tal que el perfil que se está laminando se encuentra simultáneamente bajo la acción de dos o más de ellas. En cada pasada, al disminuir la sección aumenta la longitud y, por consiguiente, cada caja debe absorber una longitud mayor que la anterior. Para compensar esta circunstancia, la velocidad de giro de los rodillos va aumentando proporcionalmente en las cajas sucesivas (Enríquez, 2010).

Para el caso del laminado de perfiles los trenes de laminado suelen estar formados por cajas dúo reversibles. Para perfiles de grandes secciones, las cajas se disponen siguiendo líneas paralelas; el movimiento del perfil durante la laminación les ha dado nombre especial: “*Cross country*”. Los perfiles de dimensiones pequeñas se laminan en trenes continuos o semicontinuos.

## 1.2 Tipos de perfiles

Existen varios tipos de perfiles laminados de acero, de los cuales se describirán algunos a continuación.

Perfil W (de patín ancho). Son los perfiles más usados. Son utilizados como vigas y columnas (Figura 1.5a), su descripción está dada por la siguiente nomenclatura:  $W(dxM)$ . En donde  $d$  representa el alma (peralte) y  $M$  el peso por unidad de longitud.

Perfil S (vigas estándar americanas). La diferencia de los perfiles S y los W es que los primeros tienen un patín más angosto y están inclinados en los extremos (Figura 1.5b), su descripción está dada por la siguiente nomenclatura:  $S(dxM)$

Perfil HP. Son perfiles de patín ancho. Se caracterizan por tener el mismo espesor en la parte del patín como en la parte central (Figura 1.5c), su descripción está dada por la siguiente nomenclatura:  $HP(dxM)$

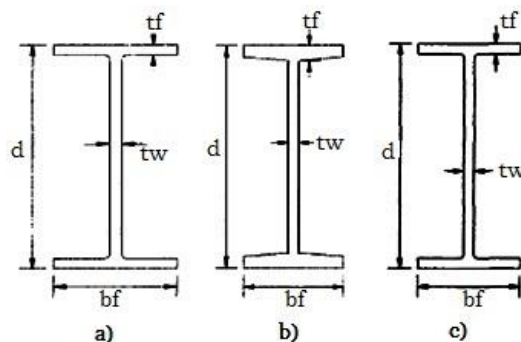


Figura 1.5 a) Perfil W, b) Perfil S y c) Perfil HP (Espinosa, 2005).

Viga tipo canal o “C”. Estos perfiles son utilizados como vigas y columnas cuando se tiene un espacio reducido (Figura 1.6a), su descripción está dada por la siguiente nomenclatura:  $M(dxM)$ .

Perfil T. Son perfiles que se obtienen cortando en dos un perfil M o W, por lo que poseen un área alrededor del cincuenta por ciento del área original (Figura 1.6b), su descripción está dada por la siguiente nomenclatura:  $WT(dxM)$ .



Ángulo perfil. Este tipo de perfiles pueden tener las mismas dimensiones en ambos lados o no dependiendo de su aplicación en específico (Figura 1.6c). Son utilizados para reforzar vigas y columnas y su descripción está dada por la siguiente nomenclatura: L (dxbxt).

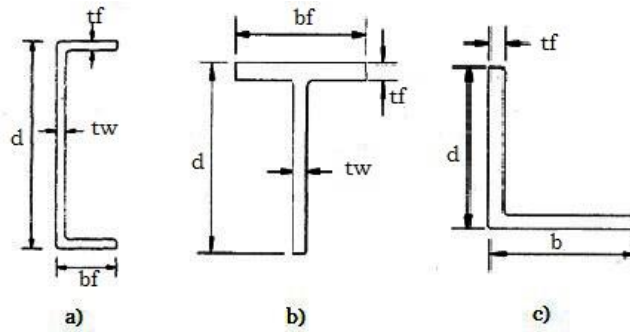


Figura 1.6 a) Perfil C, b) Perfil T y c) Ángulo perfil (Espinosa, 2005).

### 1.3 Rodillos de laminación

El material de los rodillos de laminación debe poseer ciertas propiedades mecánicas como resistencia mecánica y al desgaste. Los materiales más empleados para la fabricación de éstos son principalmente la fundición de hierro y el acero forjado.

Para laminar perfiles, bandas y flejes de acero, cobre, aluminio, latón, alpaca, plomo, estaño, plata, oro, etc., sobre todo cuando la deformación se produce en frío, se usan rodillos de acero forjado, con un tratamiento térmico que les confiere una gran dureza superficial. Estos rodillos son capaces de reducir el espesor de los materiales hasta medidas muy pequeñas por medio de pasadas sucesivas (Del Rio, 1980).

Los rodillos para laminación plana son de tabla lisa y para el laminado de perfiles se utilizan rodillos ranurados (Figura 1.7). Para evitar la flexión de los rodillos por efecto de las elevadas cargas de la componente vertical, la longitud de la tabla no debe superar más de 3.5 veces el diámetro (Enríquez, 2010).

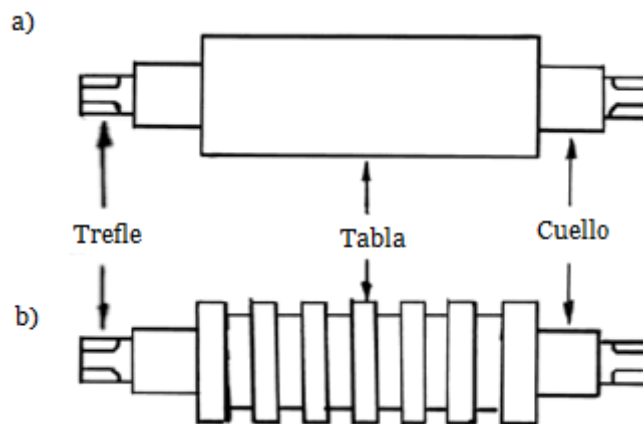


Figura 1.7 Partes de un rodillo a) rodillo plano y b) rodillo ranurado (Enríquez, 2010).



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



Las partes esenciales de un rodillo de laminación son: la tabla, que es la zona de trabajo, esta suele ocupar la mayor parte del cilindro y es donde se realiza el trabajo de laminación; el cuello, que son las dos partes cilíndricas que giran alojadas en los cojinetes y los extremos, con forma de trébol de cuatro hojas (trefles o trébedes) en los que se realiza el acoplamiento con la transmisión.

### 1.4 Lubricación

La función principal de un lubricante es reducir la fricción y el desgaste durante el proceso de laminado.

Las aleaciones ferrosas se laminan en caliente por lo que se utiliza agua para enfriar los rodillos y para romper la cascarilla sobre el material laminado. Las aleaciones no ferrosas suelen laminarse en caliente, utilizando como lubricantes diversos aceites compuestos, emulsiones y ácidos grasos.

En la laminación en frío se emplean lubricantes solubles en agua o lubricantes de baja viscosidad como aceites minerales, emulsiones, parafina y aceites grasos.

A continuación, se muestra una tabla con los principales lubricantes para diversos materiales utilizados en el proceso de laminación.

| <b>Tabla 1.1 Lubricantes para diversos materiales utilizados en el proceso de laminación (Schey, 2002)</b> |                  |                    |                         |
|--|------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Material de la pieza de trabajo</b>   | <b>Trabajo</b>   | <b>Lubricante</b>  | <b><math>\mu</math></b> |
| <b>Aleaciones de Sn, Pb, Zn</b>  |                  | FA-MO              | 0.05                    |
|  |                  | MO-EM              | 0.1                     |
| <b>Aleaciones de Mg</b>  | Caliente o tibio | MO-FA-EM           | 0.2                     |
| <b>Aleaciones de Al</b>  | Caliente         | MO-FA-EM           | 0.2                     |
|  | Frío             | 1.5% FA en MO(1-3) | 0.03                    |
| <b>Aleaciones de Cu</b>  | Caliente         | MO-EM              | 0.2                     |
|  | Frío             | MO-EM              | 0.1                     |
| <b>Aceros</b>  | Caliente         | Ninguno            | ST                      |
|  | Frío             | GR-EM              | 0.2                     |
| <b>Acero inoxidable, Ni y aleaciones</b>   | Caliente         | 10% FO-EM          | 0.05                    |
|  | Frío             | Ninguno            | ST                      |
|  |                  | FO-CL-EM           | 0.1                     |
| <b>Aleaciones de Ti</b>  | Caliente         | CL-MO              | 0.05                    |
|  | Frío             | -                  | -                       |
|  |                  | MO                 | 0.1                     |

\*Los guiones indican que se emplean varios componentes en el lubricante.

ST= Fricción adherida.

CL Parafina clorada.

EM Emulsión; los ingredientes listados se distribuyen finalmente en agua.

FA Ácidos y alcoholes grasos, por ejemplo, ácido oleico, ácido esteárico, alcohol estearílico.

FO Aceites grasos, por ejemplo, aceite de palma y aceite sintético de palma.

GR Grafito; usualmente en un fluido portador con base de agua.

MO Aceite mineral (la viscosidad en paréntesis, en unidades de centipoises a 40°C).

### 1.5 Laminado de una viga W

El proceso de laminación utilizado en la industria para la producción de vigas W puede ser descrito generalmente por las siguientes etapas. En primer lugar, el tocho se precalienta en un horno durante un tiempo programado. En segundo lugar, el tocho es transportado a un dispositivo con aerosoles decapantes con el propósito de eliminar las capas de óxido de hierro de la superficie del tocho caliente. Por último, se somete a un proceso de deformación en caliente mediante múltiples pasos de laminación en un tren reversible.

Se hace pasar el tocho de sección cuadrada a través de una caja desbastadora donde mediante sucesivos pasos adquirirá la forma deseada. Del Rio (1980) sugiere la siguiente sucesión de pasos para un perfil W (Figura 1.8).

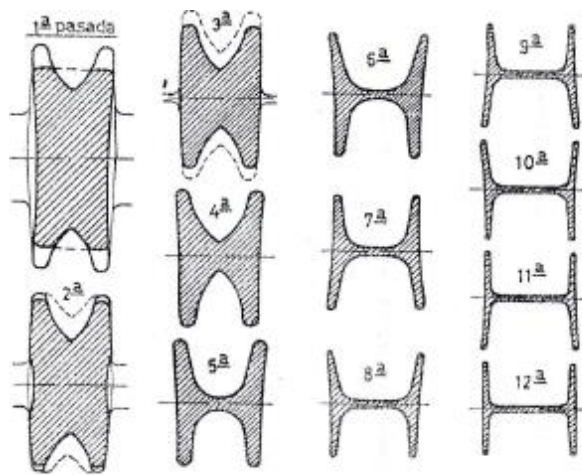


Figura 1.8 Métodos para laminar vigas W (Del Rio, 1980).

Al salir de la caja desbastadora el perfil pasará a través de una serie de cajas universales (Figura 1.9). Estas cajas (desbaste, canteado, terminado) se encargan de las pasadas de laminación finales en el laminador universal.

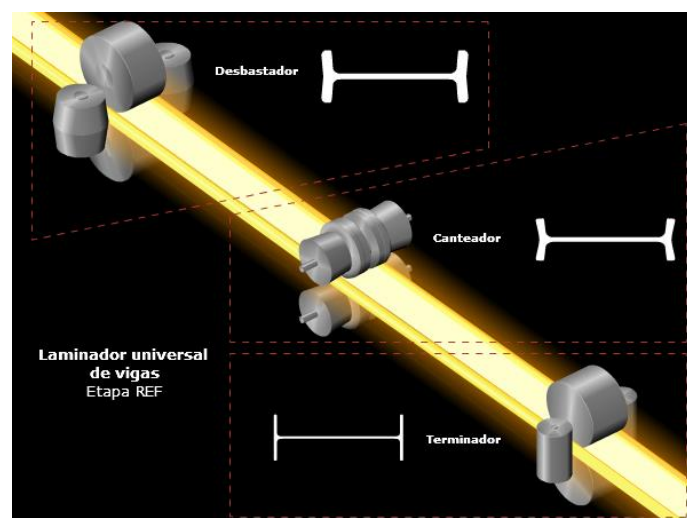


Figura 1.9 Laminador universal de vigas (World Steel Association, 2012).

Dentro de los componentes del laminador universal se encuentra el desbastador que consiste de dos rodillos verticales acompañados de un par de rodillos laterales, éstos son los responsables de la mayor parte de la deformación del material por lo que las mayores reducciones ocurren aquí.

Por otro lado, se encuentra el canteador que consiste de dos rodillos verticales de forma compleja. Hay muy poca reducción en área del material en esta caja, que es responsable de controlar la forma de la viga, en especial los patines de la viga (los dos extremos verticales del perfil).

Y por último el terminador que consiste de dos rodillos verticales y un par de rodillos laterales que pueden moverse independientemente. Los rodillos en esta caja son cilíndricos y responsables de controlar las dimensiones finales de la viga.

A continuación en la siguiente tabla se muestran algunas medidas de perfiles W comerciales (AHMSA, 2014).

**Tabla 1.2 Medidas comerciales de un perfil W (AHMSA, 2014).**

| Perfil IR | Perfil Área | Peso [Kg] | Área A [mm <sup>2</sup> ] | Alma d [mm] | Alma tw [mm] | Patín bf [mm] | Patín tf [mm] | K diseño [mm] | K detalle [mm] | k1 [mm] |
|-----------|-------------|-----------|---------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------|
| W150X102  | mm          | 13.392    | 1730                      | 150         | 4.32         | 100           | 5.46          | 11.80         | 17.50          | 12.700  |
| W150X102  | mm          | 17.856    | 2290                      | 153         | 5.84         | 102           | 7.11          | 13.50         | 19.10          | 14.288  |
| W150X102  | mm          | 23.808    | 3060                      | 160         | 6.60         | 102           | 10.30         | 16.60         | 22.20          | 14.288  |
| 150 x 152 | mm          | 50        | 2860                      | 152         | 5.84         | 152           | 6.60          | 13.00         | 19.10          | 14.288  |
| 150 x 152 | mm          | 55        | 3790                      | 157         | 6.60         | 153           | 9.27          | 15.60         | 22.20          | 14.288  |
| 150 x 152 | mm          | 60        | 4740                      | 162         | 8.13         | 154           | 11.60         | 17.90         | 23.80          | 14.288  |

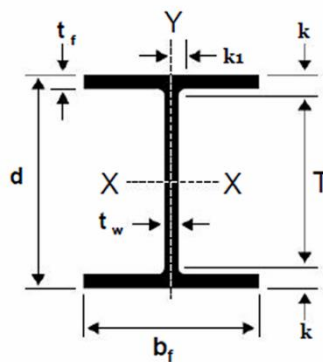
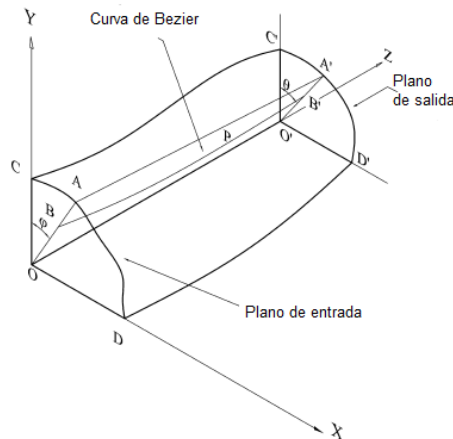


Figura 1.10 Parámetros de un perfil W (AHMSA, 2014).

## 1.6 Análisis del proceso de laminación de perfiles

Un método analítico generalizado ha sido propuesto para estudiar la forma externa y calcular la presión y el par para el proceso de laminación de perfiles (Abrinia, 2009). El método propuesto se basa en el análisis del límite superior. Para determinar los campos de velocidades cinemáticamente admisibles, se formulan matemáticamente líneas de flujo mediante la parametrización de curvas. La potencia calculada se minimiza con respecto a variables desconocidas para producir el valor más cercano a la potencia real necesaria.

El primer paso en la aplicación del método de límite superior es la identificación de campos de velocidad cinemáticamente admisibles a través de una suposición de la forma de las líneas de corriente en la zona de deformación. Basado en este campo de velocidad, se calcula la disipación de potencia total para el proceso de deformación del metal.



**Figura 1.11 Un cuarto de la zona de deformación considerado para la laminación de un perfil (Abrinia, 2009).**

La configuración geométrica que se muestra en la Figura 1.11 se basa en la elección de una línea de corriente  $BB'$  y una superficie con secuencia  $OAA'O'$ .

Las secciones de entrada y salida están limitadas por planos representados por  $OCD$  y  $O'C'D'$ , respectivamente. Para simplificar las relaciones se utiliza un sistema izquierdo de coordenadas. Se supone que cualquier partícula  $P$  en la zona de deformación se desplaza sobre dichas líneas de corriente y que la relación de proporcionalidad  $OB / OA = O'B' / O'A'$  se mantiene a lo largo de toda la trayectoria. Por lo tanto, esta suposición presenta un método para definir matemáticamente la zona de deformación en la laminación de perfiles de una sección arbitraria a otra sección arbitraria (Abrinia, 1990)

La formulación de una curva paramétrica de Bezier se utiliza para describir las líneas de corriente (Abrinia, 2009). Bezier utiliza polinomios de Bernstein como una mezcla de funciones para los vectores. También se sugiere el uso de puntos de control, donde una curva de grado  $n$  tiene  $n+1$  puntos de control  $V_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ ). La curva de Bezier pasa sólo a través de los primeros y últimos puntos de control y se aproxima hacia los puntos intermedios.

Como se ilustra en la Figura 1.12, la curva formulada pasa a través de los puntos  $V_0$  y  $V_3$ , y tiene tangentes en  $V_0$  de  $V_0$  a  $V_1$  y en  $V_3$  de  $V_2$  a  $V_3$ . También es evidente a partir de la figura que a medida que se mueven uno o más puntos de control, la forma de la curva de Bezier va cambiando de forma como consecuencia.

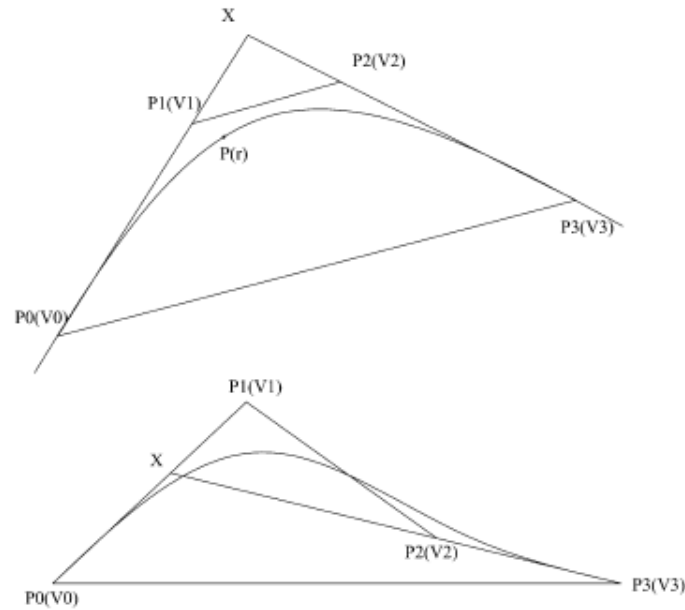


Figura 1.12 Curva de Bezier de 3 puntos (Abrinia, 2009).

Una curva de Bezier de grado 3 se define como:

$$\bar{r}(t) = (1-t)^3\bar{V}_0 + 3t(1-t)^2\bar{V}_1 + 3t^2(1-t)\bar{V}_2 + t^3\bar{V}_3$$

En su forma de matriz se tiene:

$$\bar{r}(t) = [1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}$$

Con el fin de expresar las líneas de corriente dentro de la zona de deformación en las curvas de Bezier, los vectores de posición  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  deben ser definidos adecuadamente:

$$\begin{aligned} \bar{V}_0 &= F_0(u, q)\bar{i} + G_0(u, q)\bar{j} \\ \bar{V}_1 &= a_1F_0(u, q)\bar{i} + b_1G_0(u, q)\bar{j} + c_1H_0(u, q)\bar{k} \\ \bar{V}_2 &= a_2F_1(u, q)\bar{i} + b_2G_1(u, q)\bar{j} + c_2H_1(u, q)\bar{k} \\ \bar{V}_3 &= F_1(u, q)\bar{i} + G_1(u, q)\bar{j} + H_1(u, q)\bar{k} \end{aligned}$$

Donde  $u$  y  $q$  son dos parámetros que varían entre 0 y 1 y controlan la posición de los componentes del vector en los planos de entrada y salida.  $F_0$  y  $G_0$  son funciones de  $u$  y  $q$  que determinan la ubicación del punto B y su vector de posición  $V_0$ . Los dos puntos de control intermedios se definen mediante estas mismas funciones con  $H_0$  para  $V_1$  y coeficientes arbitrarios  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$  y  $c_2$  que son agregados para ajustar la posición de los puntos de control intermedios. Como se representa en la Figura 1.12  $V_0$  y  $V_3$  son los vectores de posición de los puntos B y B', respectivamente.



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



$$\bar{r}(t) = f(u, q, t)\bar{i} + g(u, q, t)\bar{j} + h(u, q, t)\bar{k}$$

En un sistema de coordenadas cartesianas se tiene:

$$\begin{aligned}x &= f(u, q, t) \\y &= g(u, q, t) \\z &= h(u, q, t)\end{aligned}$$

La potencia  $W$  total requerida para deformar el material se expresa como la suma de los siguientes componentes: la potencia requerida para deformar el material plásticamente,  $W_i$ ; la potencia necesaria para superar las fuerzas de cizallamiento resultante de discontinuidades de velocidad en la entrada  $W_e$ , en la salida  $W_x$  y la potencia necesaria para superar la fricción,  $W_f$ . En términos matemáticos:

$$W = W_i + W_e + W_x + W_f$$

Donde:

$$\begin{aligned}W_i &= \bar{\sigma} \int_V \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot dV \\W_e &= \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{A_1} V_1 \cdot dA_1 \\W_x &= \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{A_2} V_2 \cdot dA_2 \\W_f &= \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{A_f} V_f \cdot dA_f\end{aligned}$$

Suponiendo que el material fluye de acuerdo a la regla de Levy-Mises y obedece a los criterios de falla de Mises, la condición de incompresibilidad en el flujo de material se puede expresar como:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

$V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$  son los componentes del vector de velocidad a lo largo de los ejes X, Y y Z, respectivamente. Igualando el vector unitario tangente para el punto P en la línea de corriente BB' al campo de velocidades se tiene:

$$\begin{aligned}V_x &= \frac{f_t}{h_t} V_z \\V_y &= \frac{g_t}{h_t} V_z \\V_z &= M(u, q, t)\end{aligned}$$

Un campo de velocidades cinemáticamente admisible debe cumplir esencialmente la condición de incompresibilidad, por lo que resolviendo para M:

$$M = \frac{C \cdot h_t}{h_t(f_u g_q - f_q g_u) + h_q(f_t g_u - f_u g_t) + h_u(f_q g_t - f_t g_q)}$$

Donde C es una constante que se determina a partir de las condiciones de contorno específicas de cada sección estudiada (Abrinia, 2009). Las velocidades calculadas utilizando la fórmula anterior cumplen automáticamente con el criterio de incompresibilidad.

Usando notación paramétrica la potencia total de laminación puede expresarse como sigue:

$$W_i = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_V \left( \frac{\dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2}{2} + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2 + \dot{\epsilon}_{zx}^2 \right)^{1/2} |J| dudqdt$$

Donde  $\dot{\epsilon}$  representa las diferentes velocidades de deformación,  $\bar{\sigma}$  es el esfuerzo y  $|J|$  es el determinante del Jacobiano para la transformación de coordenadas de x, y, z para u, q, t.

La potencia de laminación total puede expresarse mediante los componentes de velocidad como sigue. En la entrada:

$$W_e = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_0^1 (V_x^2 + V_y^2)_{t=0}^{1/2} \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, q)_{t=0}} dudq$$

En la salida

$$W_x = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_0^1 (V_x^2 + V_y^2)_{t=1}^{1/2} \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, q)_{t=1}} dudq$$

## 1.7 Parámetros de la laminación de perfiles

En el laminado de perfiles se utilizan ciertas formas intermedias o pases. El diseño de los canales del rodillo, se basa en la experiencia y difiere de una empresa a otra, incluso para la misma geometría de perfil laminado final. Existen pocos datos cuantitativos sobre el diseño de canales de rodillo disponibles en la literatura.

Básicamente, hay dos métodos de laminación para formas o secciones. El primer método es el de laminación universal (Figura 1.13). El segundo método es el “Caliber Rolling”.

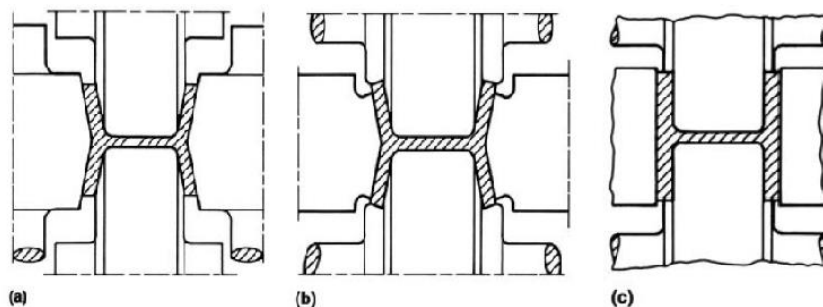


Figura 1.13 Laminación universal a) Caja universal de laminación, b) ensanchamiento de bordes y c) Terminación de la pieza (Xu-dong, 2006).



En la laminación de vigas W u otras secciones similares, el método de laminación universal permite más flexibilidad en comparación con el “*Caliber Rolling*” y requiere un menor número de pases. Esto se logra ya que este método proporciona cantidades adecuadas de reducción.

Para la laminación de un perfil W (figura 1.14) se toman en cuenta ciertos parámetros los cuales se mencionan en la Tabla 1.3.

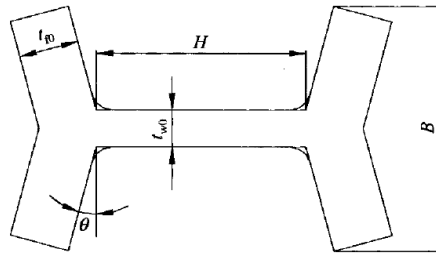


Figura 1. 14 perfil tipo W (Xu-dong, 2006).

| $t_{w0}$<br>[m] | $\lambda_w$<br>[%] | $t_{f0}$<br>[m] | $\lambda_f$<br>[%] | $D_h$<br>[m] | $D_v$<br>[m] | $t_z$<br>[°C] | $V$<br>[ms <sup>-1</sup> ] | $H$<br>[m] | $\lambda$ | $B$<br>[m] | $\Theta$<br>[°] |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------|---------------|----------------------------|------------|-----------|------------|-----------------|
| 0.015           | 7                  | 0.025           | 7.69               | 0.820        | 0.660        | 800           | 1                          | 0.268      | 0.9       | 0.109      | 2               |
| 0.020           | 9                  | 0.035           | 9.86               | 0.920        | 0.760        | 850           | 2                          | 0.368      | 1         | 0.158      | 4               |
| 0.025           | 11                 | 0.045           | 12.22              | 1.020        | 0.860        | 900           | 3                          | 0.468      | 1.1       | 0.208      | 6               |
| 0.030           | 13                 | 0.055           | 14.22              | 1.120        | 0.960        | 950           | 4                          | 0.668      | 1.2       | 0.258      | 8               |
| 0.035           | 15                 | 0.065           | 16.37              | 1.220        | 1.060        | 1000          | 5                          | 0.868      | 1.3       | 0.307      | 9               |
| 0.040           | 17                 | 0.075           | 18.82              | 1.320        |              | 1050          |                            |            |           |            | 10              |

$D_h$  Diámetro del rodillo horizontal  
 $D_v$  Diámetro del rodillo vertical  
 $\lambda_w$  Reducción del alma  
 $\lambda_f$  Reducción del patín  
 $V$  Velocidad del rodillo  
 $t_z$  temperatura de laminado  
 $\lambda$  Elongación  
 $\Theta$  Inclinación del rodillo vertical

En la laminación de perfiles debe considerarse el ensanchamiento del material, ya que la fricción en la dirección de laminación es mucho menor que en el sentido transversal. Durante la laminación de barras angostas, el ensanchamiento del material es mayor, además de que, en muchos casos, es deseable. Esto se debe a que la fricción lateral es de menor magnitud que en el caso anterior y, por lo tanto, la resistencia limita el flujo del material en sentido longitudinal (Ortiz, 2013).

Los factores que determinan la magnitud del ensanchamiento son:

- Reducción de altura
- Diámetro de los rodillos
- Tipo de material a laminar
- Temperatura del material
- Coefficiente de fricción entre el material y los rodillos
- Velocidad del proceso



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



Se ha comprobado que este último factor no tiene efectos para velocidades de 10 m/s. Arriba de esta velocidad, el ensanchamiento tiende a disminuir ligeramente. Existe una gran cantidad de expresiones de complejidad y precisión muy variada, una de ellas es la implementada por Sven Ekelund (1933), que aunque es compleja y necesita resolverse a partir de un proceso iterativo, garantiza resultados excepcionalmente buenos.

$$\frac{b_0^2 - b_f^2}{2} = 4m\sqrt{\rho\Delta h} \Delta h - 2m(h_0 + h_f)\sqrt{\rho\Delta h} \ln\left(\frac{b_f}{b_0}\right)$$
$$m = 1.6\mu \frac{\sqrt{r\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_f}$$

Donde:

$b_0$ = Ancho inicial del material

$b_f$ = Ancho final del material

$\rho$ = Radio de trabajo de los rodillos

El coeficiente de fricción está dado por  $\mu = 1.05 - 0.0005T$

Para rodillos de acero y para rodillos de fundición vaciados en coquilla  $\mu = 0.8 - 0.0005T$

Donde

T= Temperatura de laminación en °C

## Capítulo 2 Análisis del proceso de laminación de perfiles mediante el método de elementos finitos

En el presente capítulo se describirá el análisis realizado a diversos procesos de laminado de perfiles basados en el método de elementos finitos (MEF) centrandó la atención en modelos del proceso de laminación de una viga S. Al conocer los resultados obtenidos en los análisis realizados por otros autores se busca tener datos como referencia que contribuirán a la generación de un nuevo modelo del proceso.

### 2.1 Análisis tridimensional no isotérmico del laminado de perfiles

En este modelo se desarrolló un programa de elementos finitos tridimensional para el análisis de procesos de laminación de perfiles, considerando la transferencia de calor, con base en un enfoque termo-viscoplástico. Para tomar en cuenta las complejas ranuras del rodillo, se propuso un algoritmo de tratamiento de contacto en tres dimensiones basado en el procedimiento de intersección de línea-superficie (LSI).

Utilizando el programa desarrollado se simularon procesos de laminación de perfiles con secciones tales como cuadrados ovalados (S-O), óvalos redondeados (R-O) y diamantes cuadrados (S-D) considerando diferentes condiciones de fricción, con y sin efectos de la temperatura. Los resultados numéricos se compararon con los resultados empíricos disponibles en la literatura (Shinokura, 1982). También se aplicó el programa desarrollado a problemas más complejos de laminación como es el caso de laminación de una viga S en el cual se simuló con el propósito de investigar la distribución de temperatura en la pieza deformada.

Se supuso un caso de fricción constante  $m_f = 0.8$  posteriormente se llevó a cabo un análisis isotérmico para la comparación de resultados con un análisis no isotérmico. Las geometrías del rodillo para el laminado de S-O, R-O, y S-D se muestran en la Figura 2.1. El esfuerzo de cedencia utilizado en las simulaciones se obtuvo de la fórmula empírica para aceros al carbono a temperaturas elevadas propuestas por Shida en 1969.

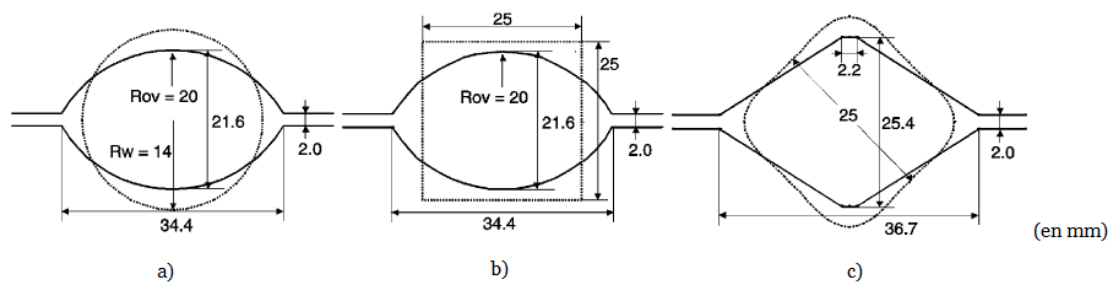


Figura 2.1 Forma de los rodillos y geometrías iniciales de los tochos para a)S-O, b)R-O y c)S-D (Kim, 2002).

Las temperaturas iniciales del rodillo y del medio ambiente fueron asumidas a 313 K y la temperatura inicial del tocho se supuso de 1323 K. El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_{env}$  y el coeficiente de transferencia de calor con lubricación eficaz  $h_{lub}$  se supusieron de 30 y 4800 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente. La constante de Stefan-Boltzmann y la emisividad fueron  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K y 1, respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor por conducción  $k$  y la capacidad calorífica  $\rho C_p$  se suponen a partir de la ecuación de la energía para lo cual los valores obtenidos fueron de 54 W/m K y 3642 kJ/m<sup>3</sup>K, respectivamente. La velocidad de laminación se consideró de 0.2333 rev/s.

La deformación de la malla para el laminado de los perfiles S-O, R-O, y S-D considerando un factor de fricción constante de 0.8 y como un proceso no isotérmico se representa en la Figura 2.2.

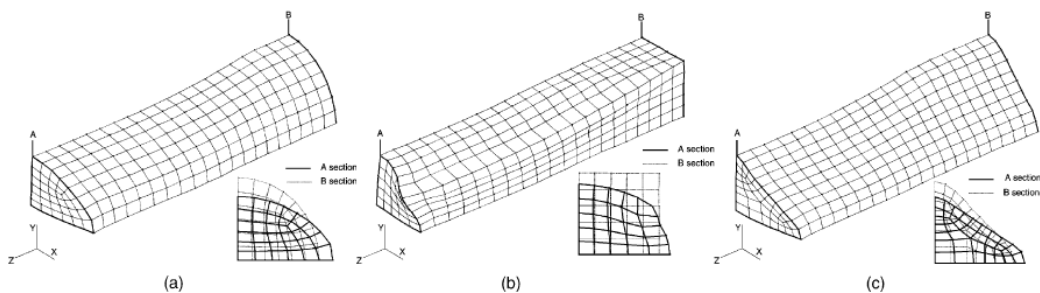


Figura 2.2 Deformación de malla para los perfiles a) R-O, b) S-O y c) S-D con  $m_f = 0.8$  y un análisis no isotérmico (Kim, 2002).

Las deformaciones para diversas condiciones de fricción se muestran en la Figura 2.3. Los resultados del análisis isotérmico no fueron presentados debido a que las diferencias entre los resultados del modelo isotérmico y el modelo no isotérmico resultaron muy pequeñas. Esto se observó en los pasos para la generación del perfil R-O, la diferencia de extensión entre los dos análisis fue de sólo 0.024 mm lo que representa 0.15% de la extensión total. A partir de estos resultados, se encontró que la distorsión de la malla del tocho deformado incrementa con condiciones de fricción más altas, también en este análisis se observó que la temperatura no resultó ser un factor importante en la determinación de estos valores.

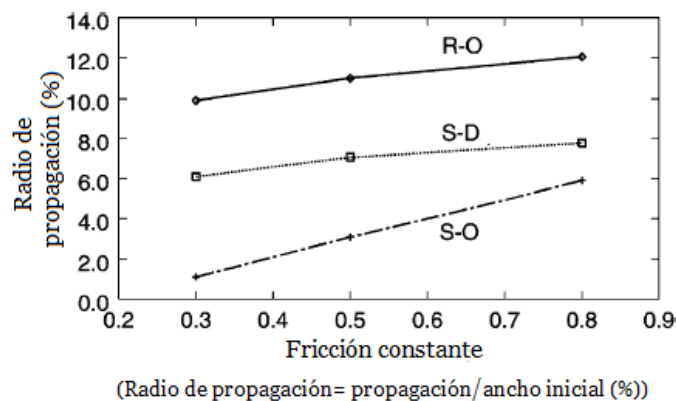
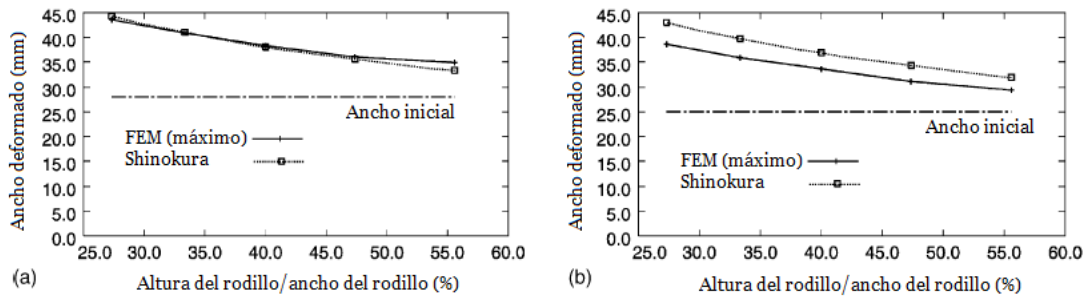


Figura 2.3 Radio de malla considerando diferentes valores de fricción (Kim, 2002).

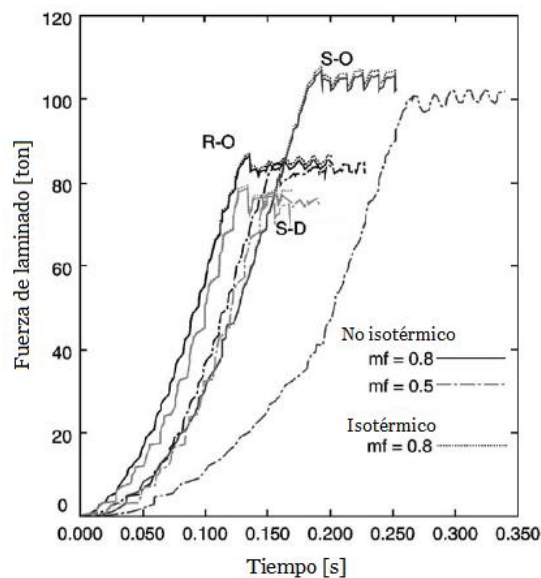
Para investigar el efecto de la geometría de las ranuras del rodillo sobre la distorsión de malla durante la deformación de los perfiles S-O y R-O, se simularon pasos con varios factores de forma (Altura/anchura de la ranura del rodillo) considerando nuevamente un factor de fricción de  $m_f = 0.8$ . Esto se muestra en Figura 2.4.



**Figura 2.4 Comparación entre diversos factores de forma y resultados propuestos por Shinokura para los perfiles a) R-O y b) S-O (Kim, 2002).**

Los resultados de la simulación se compararon con cálculos mediante la regla empírica para la difusión, propuesta por Shinokura en 1982. Se observa en la Figura 2.4a que los resultados numéricos fueron precisos al compararlos con los resultados empíricos, y en la Figura 2.4b se observa que los valores obtenidos fueron más pequeños respecto con los resultados empíricos; lo cual podría deberse a la inexactitud de los datos del material utilizado.

La Figura 2.5 muestra la comparación de la fuerza de laminación considerando diversas condiciones de fricción, con y sin considerar la transferencia de calor. Se observa que al aumentar la fricción la carga requerida es mayor y que las variaciones debido a la temperatura son mínimas lo cual se debe a que la deformación ocurre en un corto periodo de tiempo.



**Figura 2.5 Fuerza de laminación en diferentes condiciones de fricción y temperatura (Kim, 2002).**

Sin embargo, el efecto de la temperatura sobre la fuerza y la deformación del tocho no pueden ser ignorados cuando tiene lugar la caída de temperatura en la etapa de enfriamiento.

En la Figura 2.6 se muestran las distribuciones de temperatura para R-O y S-O para el caso de  $m_f=0.8$ . La región con una temperatura inferior se sitúa en el centro de la interfaz tocho-rodillo ya que la generación de calor por fricción fue mínima en esta zona.

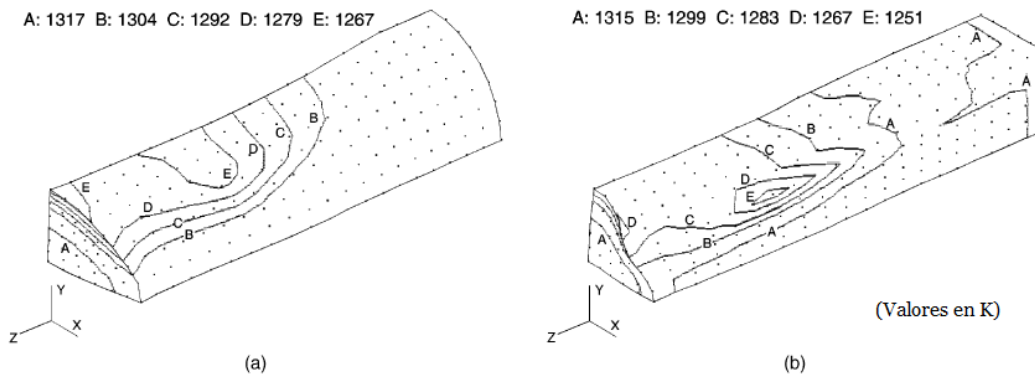


Figura 2.6 Distribución de temperatura para un perfil a) R-O y b) S-O (Kim, 2002).

Las disminuciones de temperatura afectaron a la distribución de esfuerzos en el tocho como se muestra en la Figura 2.7, aquí se compara el esfuerzo efectivo durante el laminado en un proceso isotérmico y un proceso no isotérmico para el perfil R-O. Se encontró que los esfuerzos más altos aparecen cerca de la región de temperatura más baja para los casos no isotérmicos.

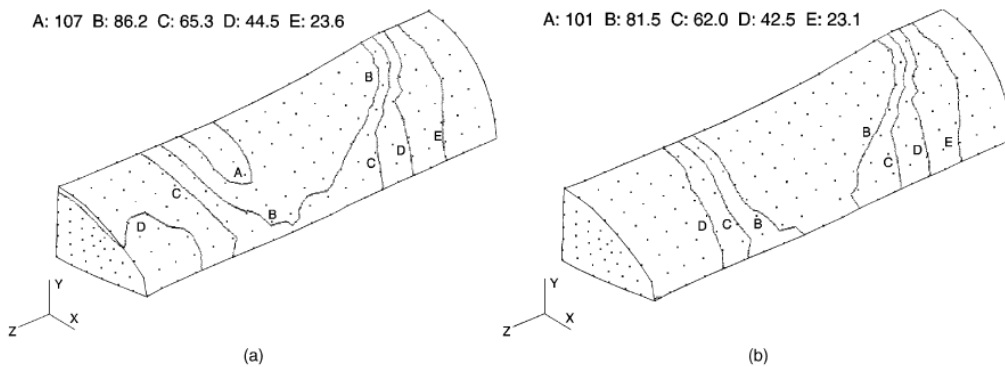


Figura 2.7 Distribución del esfuerzo efectivo durante el laminado en un proceso a) Isotérmico y b) no Isotérmico (Kim, 2002).

Como se mencionó previamente también se simuló la laminación de una viga S. El perfil del rodillo utilizado está representado en la Figura 2.8. La velocidad del rodillo y el factor de fricción fueron establecidos como  $0.3 \text{ s}^{-1}$  y  $0.8$  respectivamente.

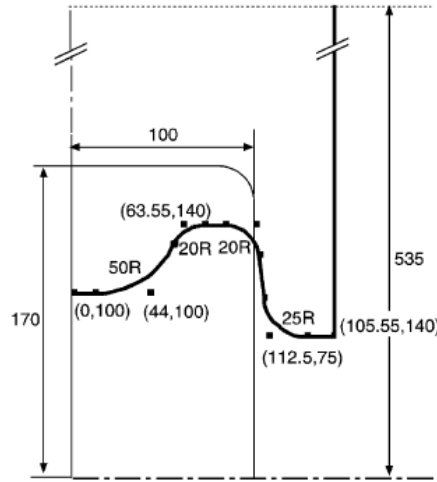


Figura 2.8 Perfil de rodillo (Kim, 2002).

Las temperaturas iniciales del rodillo y del tocho se fijaron a 313 K y 1425 K. Las propiedades del material para la transferencia de calor fueron los mismos que los valores utilizados en las simulaciones anteriores.

La deformación de la malla para varios lapsos de tiempo se muestra en la Figura 2.9, Se observa que la distorsión es excesiva en la parte media del perfil por lo que se necesitaría la presencia de rodillos auxiliares para mantener la forma.

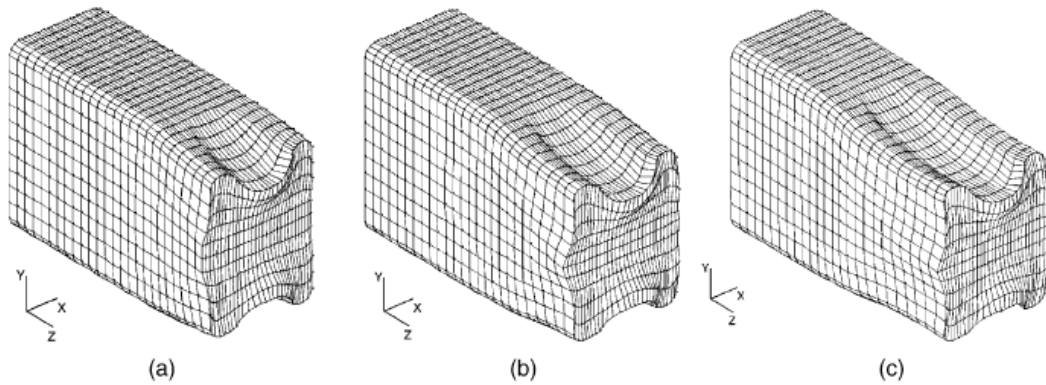


Figura 2.9 Distorsión de la malla en un lapso de tiempo a) 0.2388 s, b) 0.3214 s y c) 0.4342 s (Kim, 2002).

Las distribuciones de temperatura y deformación se muestran en la Figura 2.10. A partir de estos datos se constató que la temperatura del tocho deformado es mayor en la interfaz rodillos-tocho provocado por la generación de calor debido a la deformación plástica y la fricción.

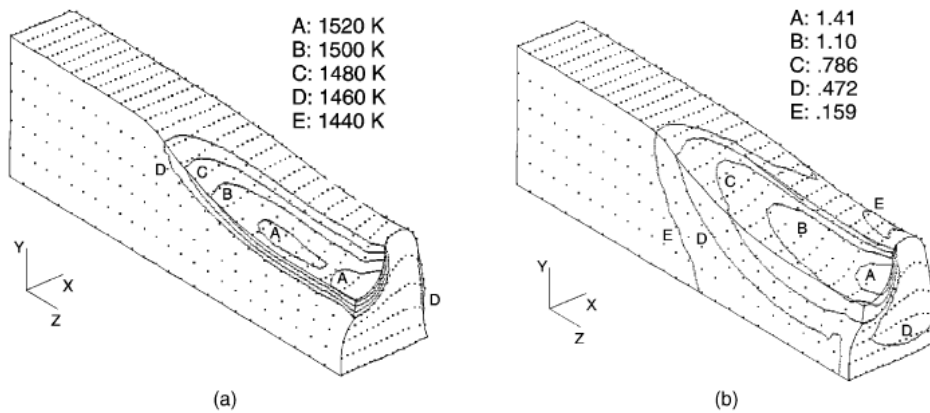


Figura 2.10 Distribuciones de a) Temperatura y b) esfuerzo efectivo en el tocho (Kim, 2002).

Este trabajo mostró que la fricción tiene un efecto significativo sobre la fuerza necesaria para deformar el tocho (Figura 2.7) y en la separación de los rodillos en comparación con el mínimo efecto que tuvo la temperatura. Sin embargo, como lo mencionó el autor, si la etapa de enfriamiento entre dos pasos se considerara durante la simulación, el efecto de la temperatura dejaría de ser insignificante.

## 2.2 Deformación y distribución de temperatura en el laminado de una viga S mediante pasos múltiples

Los métodos para el análisis de la deformación y las temperaturas descritos a continuación corresponden al proceso de laminación de una viga S. Para el análisis de las deformaciones se utilizó el método tridimensional rígido/plástico de elementos finitos (FEM), mientras que para el análisis de la temperatura se utilizó una combinación de FEM tridimensional, FEM bidimensional y el método de diferencias finitas unidimensional (MDF).

Además, el método para el análisis de esfuerzo residual es el convencional de dos dimensiones elástico/plástico (FEM). El método se aplicó para una simulación de deformaciones y temperaturas del acero durante un proceso real de laminación, en tal proceso se llevó el material a través de 20 pasos y las distribuciones de deformación y temperatura se obtuvieron de la sección transversal del material.

Sólo un cuarto del material se analizó debido a su simetría. Además, se asignó un coeficiente de fricción con un valor de 0.4 (Komori, 2000).

Aunque se analizaron todas las regiones, el método de análisis para la temperatura sólo presentó los resultados para el plano XZ. La Figura 2.11a muestra el plano XZ y la distribución de temperatura a lo largo del eje z, donde h denota la coordenada z del contacto material-rodillo y t denota la temperatura.



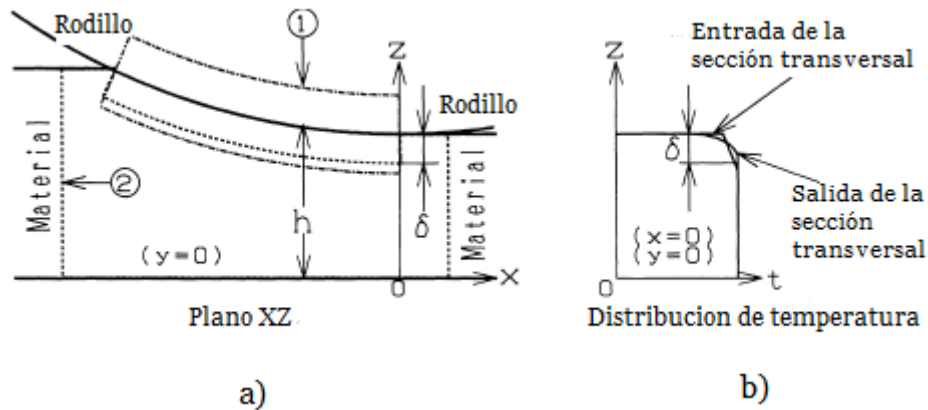


Figura 2.11. a) Flujo de material a lo largo del plano XZ y b) distribución de temperatura a lo largo del eje Z (Komori, 2000).

En la región cerca de la superficie de contacto de material-rodillo (Figura 2.11b), debido a que el gradiente de temperatura en la dirección normal a la superficie de contacto es mucho mayor que en la dirección tangencial, ésta se consideró como despreciable. Por lo tanto, la temperatura en esta región fue analizada por el MDF. El análisis de la temperatura se realizó desde el momento en que el material toca al rodillo y hasta que el material se separa de éste. La energía de deformación plástica del material y la energía producida por la fricción entre el material y el rodillo se supusieron que se transformaron completamente en calor.

La atención se centró en el gradiente de temperatura en esta región, en el material sobre el eje  $z$ . La distancia entre la superficie de contacto y el punto donde el gradiente de temperatura se vuelve casi cero se definió como  $\delta$ .

La temperatura en las distintas zonas de la región cerca de la superficie de contacto (Figura 2.11b) fue analizada por el FEM tridimensional. Los nodos que se encuentran en la superficie de contacto se mueven en la dirección normal a la superficie de contacto. La cantidad de movimiento es  $\delta$ . La condición de frontera de los nodos se supone adiabático. La transferencia de calor y la radiación se asumió que ocurría en la superficie libre del material.

El esfuerzo residual del material al final del proceso de laminación fue analizado por el FEM bidimensional elástico/plástico. Para desarrollar lo anterior se supuso que la relación de la transformación  $V$  de austenita ( $\gamma$ ) a perlita dependía de la temperatura  $t$ , para simplificar el análisis:

$$\begin{aligned}
 V &= 0 & (800^\circ\text{C} \leq t) \\
 V &= \frac{800 - t}{140} & (660^\circ\text{C} \leq t \leq 800^\circ\text{C}) \\
 V &= 1 & (660^\circ\text{C} \leq t)
 \end{aligned}$$

Además, se supuso que las propiedades de la perlita eran similares a las propiedades de la ferrita ( $\alpha$ ). Los datos para los valores de la conductividad térmica y el calor específico de acero al carbono fueron obtenidos a partir de la literatura. El calor latente de transformación se supuso de 60 kJ / kg. El coeficiente de expansión térmica lineal “a” y el módulo de Young E se definieron como sigue:

$$a = 1.11 \times 10^{-6} + 5.6 \times 10^{-6} \frac{t}{1000} \quad (\alpha)$$

$$a = 2.2 \times 10^{-6} + 11.2 \times 10^{-6} \frac{t}{1000} \quad (\gamma)$$

$$E = 206 - 38 \frac{t}{1000} - 60 \left( \frac{t}{1000} \right)^2 \quad (GPa)$$

También se supuso una velocidad de deformación de  $10^{-8}$ / s.

La Figura 2.12 muestra una serie de pasos para el proceso de laminación real de una viga S. Las dimensiones originales del perfil son 560x400x105x140 [mm] y las dimensiones finales son 600x300x20x12 [mm]. El número de pasos de laminación es 20. La temperatura inicial del material es 1300°C.

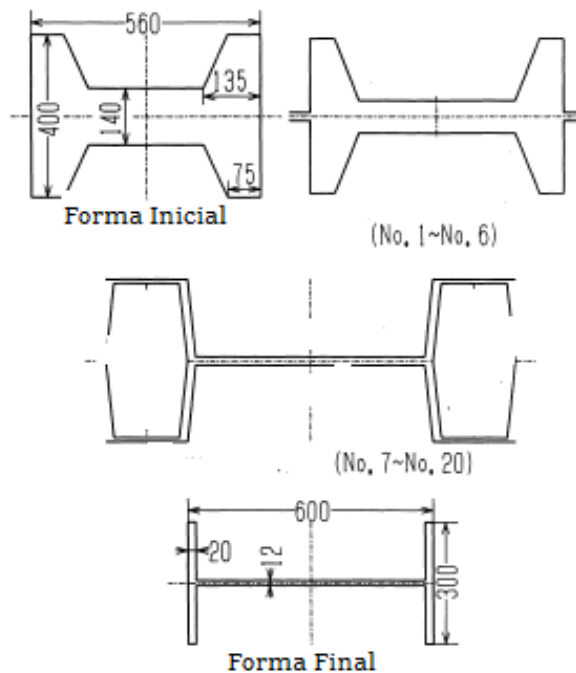


Figura 2.12 Pasos de laminación de una viga S (Komori, 2000).

La Figura 2.13 muestra la malla tras el análisis de los pasos No. 6 y No. 20 de laminación.

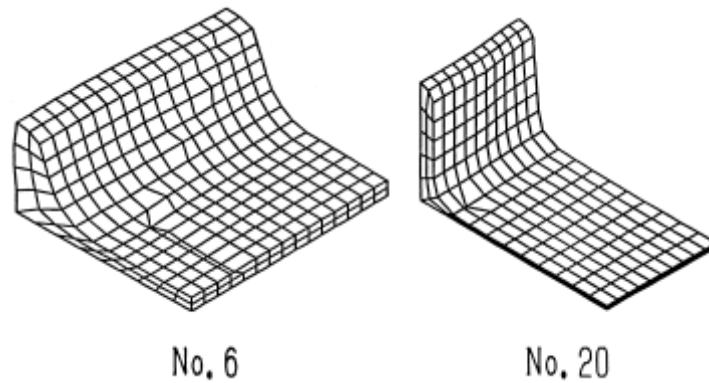


Figura 2.13. Mallado tras el paso por los trenes No.6 y No 20 (Komori, 2000).

La Figura 2.14 muestra las distribuciones de deformación equivalente tras el análisis de los diversos pasos de laminación. La magnitud de la deformación equivalente es pequeña en el borde del patín, mientras que es grande en el centro del perfil. Se obtiene que el ancho de patín calculado a partir del análisis coincide con el obtenido experimentalmente.

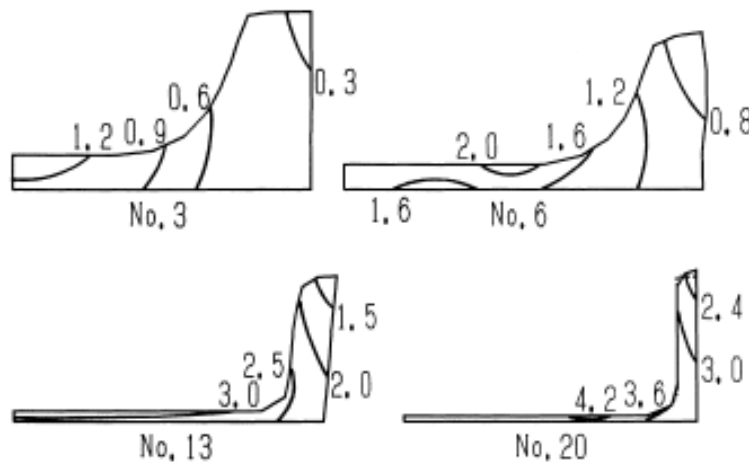


Figura 2.14 Distribuciones de deformación (Komori, 2000).

La Figura 2.15 muestra la carga y el par ejercidos en cada tren de laminación. En los trenes de laminación universales, la carga y el par para el rodillo horizontal disminuye al aumentar el número de pasos de laminación. Por otro lado, el par de torsión para el rodillo vertical es aproximadamente cero.

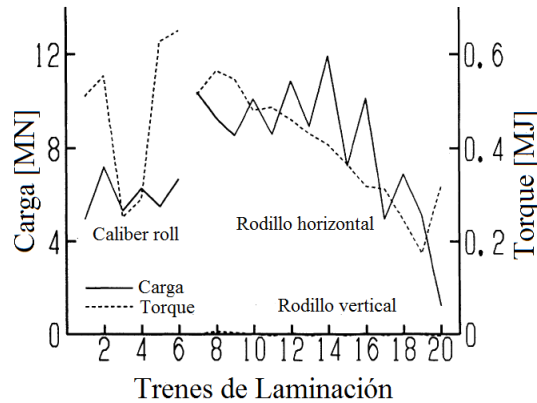


Figura 2.15 Carga y par ejercidos en cada tren de laminación (Komori, 2000).

### 2.3 Modelo termo-mecánico del proceso de laminación de una viga S

Para el posterior análisis se consideró el proceso de laminación para la producción de H200x200x8/12, el cual es un tamaño típico para un perfil de acero tipo S que comúnmente se encuentra en sitios de construcción. El tocho tiene una sección transversal 240x375 mm<sup>2</sup> y 5000 mm de longitud. Se consideraron nueve pasos en una caja de laminación reversible con ranuras y separaciones específicas para cada uno.

El modelo consta de dos rodillos y un tocho deformable con media simetría; el coeficiente de fricción entre los rodillos se definió como:

$$f = 1.05 - 5 \times 10^{-4}T - 5.6 \times 10^{-2}v$$

donde T[°C] es la temperatura del tocho y V [m / s] es la velocidad de laminación. Esta ecuación se implementó en ABAQUS® a través de la subrutina VFRIC definida por el usuario.

En el modelo ambos rodillos se asumieron como rígidos. Para los rodillos todos los grados de libertad se ven limitados excepto la rotación alrededor del eje z, donde se define un valor de velocidad angular descrito en la Tabla 2.1. El tocho deformable fue mallado con elementos C3D8RT y para cada caso de análisis se le asignó al tocho una velocidad inicial en la dirección x; estos valores se encuentran descritos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros del proceso de laminación en caliente para una viga S (Qingqiang, 2013)

| Paso | Calibre     | Separación de los rodillos [mm] | Velocidad angular de los rodillos [RPM] | Velocidad del tocho [m/min] |
|------|-------------|---------------------------------|---|-----------------------------|
| 1    | Calibre 1-1 | 147                             | 48.1                                    | 120                         |
| 2    | Calibre 1-2 | 82                              | 73.9                                    | 180                         |
| 3    | Calibre 2-1 | 122                             | 55.7                                    | 150                         |
| 4    | Calibre 2-2 | 72                              | 67.6                                    | 180                         |
| 5    | Calibre 2-3 | 37                              | 68.1                                    | 180                         |
| 6    | Calibre 2-4 | 12                              | 68.6                                    | 180                         |
| 7    | Calibre 3-1 | 20                              | 66.1                                    | 180                         |
| 8    | Calibre 3-2 | 12                              | 66.1                                    | 180                         |
| 9    | Calibre 4   | 12                              | 64.5                                    | 180                         |

Un modelo esquemático de la laminación se muestra en la Figura 2.16. Los dos primeros pasos se laminan en el calibre 1 con diferentes parámetros de laminado; los próximos cuatro pasos se laminan en el calibre 2, dos pasos en el calibre 3 y un pase en calibre 4. El programa de laminación se mostró en detalle en la Tabla 2.1. Para ahorrar tiempo de cómputo se consideró la simetría del tocho por lo cual solo fue modelado la mitad de este y simulado en ABAQUS®.

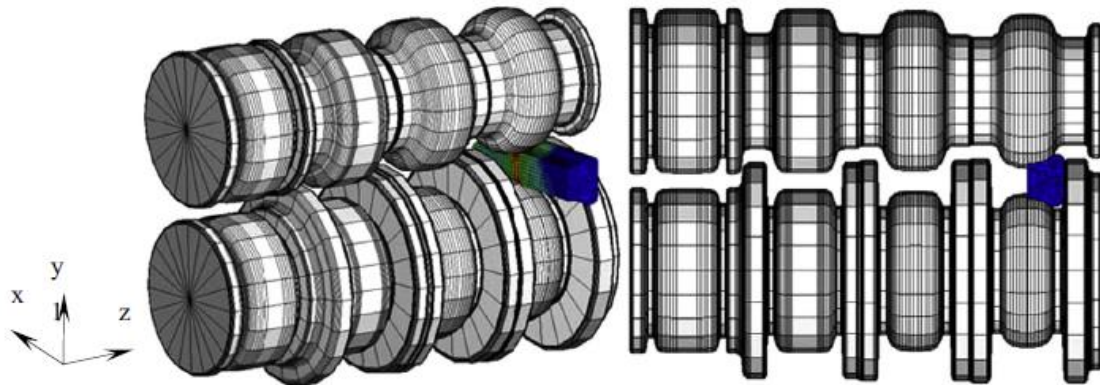


Figura 2.16 Modelo tridimensional para el laminado de un perfil S (Qingqiang, 2013).

El coeficiente de transferencia de calor entre los rodillos y el tocho se establece en la Tabla 2.2 y fue aplicado a través de la subrutina definida por el usuario VFILM; este coeficiente se supone dependiente de la distancia mínima de separación entre las superficies de contacto del rodillo y el tocho.

| Tabla 2.2 Valor del coeficiente de transferencia de calor (Qingqiang, 2013) |                              |
|---|------------------------------|
| Coeficiente de transferencia de calor [W/(m <sup>2</sup> K)]                | Distancia de separación [mm] |
| 35.5  | 0                            |
| 10  | 0.1                          |
| 0   | 0.5                          |

El proceso de laminación completo incluyendo los nueve pasos de laminación que se simularon utilizando los parámetros que se muestran en la Tabla 2.3.

| Tabla 2.3 Parámetros de entrada usados en la simulación numérica (Qingqiang, 2013) |                      |                   |
|--|----------------------|-------------------|
| Parámetro  | Valor                | Unidades          |
| Temperatura inicial del tocho  | 1270                 | °C                |
| Temperatura del medio ambiente   | 50                   | °C                |
| Fracción de calor inelástico   | 0.9                  |                   |
| Módulo de Young  | 110                  | GPa               |
| Coeficiente de Poisson   | 0.3                  |                   |
| Coeficiente de expansión térmica   | 1.2x10 <sup>-5</sup> | K <sup>-1</sup>   |
| Calor específico   | 580                  | J/(Kg°C)          |
| Densidad   | 7833                 | Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductividad  | 52                   | J/(m s °C)        |

En la Figura 2.17, se presentan los resultados de la distribución de temperatura calculada en el tocho en el último paso de laminación. También muestra que una temperatura inicialmente homogénea se vuelve gradualmente no homogénea.

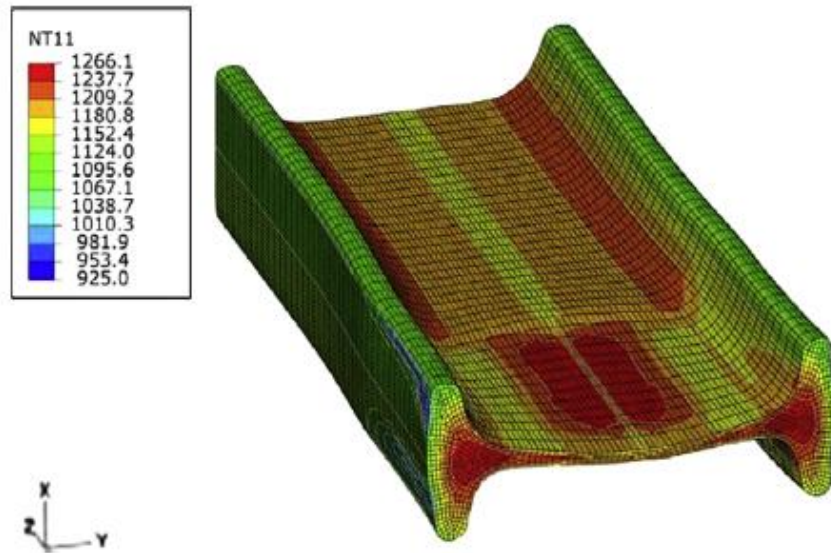


Figura 2.17 Distribución de temperatura en el tocho (Qingqiang, 2013).

En la Figura 2.18 se presenta la comparación entre los valores calculados y medidos de la carga de laminado durante el proceso. La similitud en los valores medidos y calculados muestra una buena capacidad predictiva de los modelos constitutivos para el acero Q235 desarrollados en este trabajo.

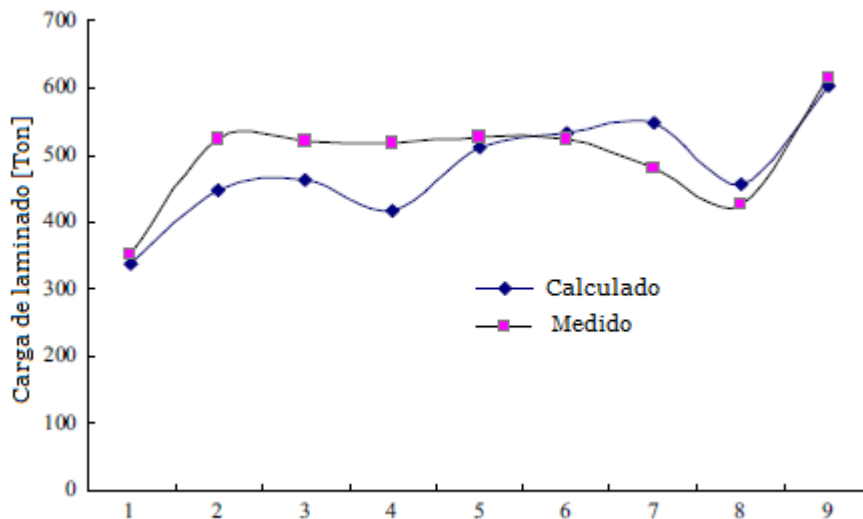


Figura 2.18 Comparación entre la carga medida y la carga calculada durante el proceso de laminación de una viga S (Qingqiang, 2013).



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



Los resultados obtenidos tienen que tomarse en consideración ya que son muy precisos como son el caso de los pasos 1,5,6,8 y 9 pero valores como los registrados en los pasos 2,3 4 y 7 poseen un error considerable de casi 100 toneladas.

La mayoría de los modelos presentados en este capítulo se han desarrollado considerando el efecto térmico que presenta el proceso. En algunos casos el efecto puede ser despreciado y en otros casos no debe serlo como es el caso de la transferencia de calor que existe debido al enfriamiento que se genera entre pasos. Otras de las consideraciones relevantes resultan en el coeficiente de fricción ya que tiene una gran influencia sobre la carga necesaria para la deformación.

Otro factor importante es el diseño de los rodillos y el diseño de los pasos de laminación, muchos autores han señalado que para su diseño se han basado en métodos empíricos y en la experiencia por lo que no existe solo un modo de manufacturar un perfil, ni un número de pasos determinados.



## Capítulo 3 Modelado del proceso de laminación de una viga tipo S mediante el método CEL

En este capítulo se presentará el modelado del proceso de laminación de una viga tipo S mediante el uso del software Abaqus® implementando el método acoplado euleriano lagrangiano (CEL por sus siglas en inglés).

El modelo realizado replica la mayoría de las condiciones presentadas en los experimentos realizados por He Qingqiang, en 2013, con ciertas excepciones. La principal modificación fue la distribución de los rodillos de laminación, éstos en el modelo de Qingqiang se presentaron como un laminador dúo reversible y en el presente trabajo se presenta como un tren de laminación semicontinuo. Este cambio se realizó con la finalidad de reducir el número de elementos presentes en el dominio euleriano, con lo cual se obtuvo una reducción significativa en el tiempo de cómputo.

### 3.1 Análisis Acoplado Euleriano Lagrangiano (CEL)

El análisis euleriano es una técnica del método de elementos finitos en el que se le permite al material fluir a través de los elementos de una malla fija. En la formulación de elementos finitos más tradicional (método lagrangiano), el material está estrechamente asociado a la malla, la cual se mueve y se distorsiona junto a este. Debido a estos problemas de calidad presentados por elementos asociados con una malla deformable, la técnica euleriana resulta eficaz en el tratamiento de los problemas que implican grandes deformaciones.

El método arbitrario lagrangiano euleriano (ALE), es un mallado adaptativo que combina las características de ambos análisis dentro de la misma malla. Se suele utilizar para controlar la distorsión de los elementos sometidos a grandes deformaciones, sin embargo al utilizarlo se presentan problemas como la precisión en los cálculos debido a la transferencia de datos de la malla distorsionada (Cristóbal, 2015).

En segundo lugar se tiene el método acoplado euleriano lagrangiano (CEL) que permite la interacción de ambos elementos dentro del mismo modelo. Resulta eficaz en el tratamiento de los problemas que implican deformaciones excesivas, por lo cual se optó por esta metodología para simular el proceso de laminación de perfiles ya que este método permitiría evitar la distorsión excesiva de elementos y por lo tanto se tendrá una mejora en la precisión de los resultados.

En este tipo de análisis los nodos están fijos en el espacio y el material es capaz de fluir a través de éstos. Los elementos eulerianos no siempre contienen un 100% de material, muchos de ellos pueden estar parcial o completamente vacíos. A lo largo del análisis estos elementos pueden estar llenos en un rango de 0 a 1, por lo tanto el límite del material se calcula en cada incremento del análisis, dicho algoritmo se conoce como "*Volume Fraction Tool*" (VFT) (Simulia, 2014). Por definición, si el material llena completamente un elemento la fracción de volumen es uno, en cambio, si no existe material presente en un elemento la fracción es cero (Figura 3.1).



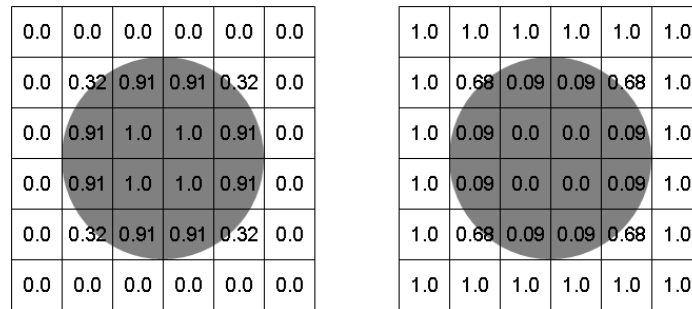


Figura 3.1 Campos discretos mediante el VFT, a) parte interna de la región de referencia y b) parte externa de la región de referencia (Simulia, 2014).

La deformación que se da en el dominio se logra mediante el algoritmo “*Lagrange plus-remap*” que es una combinación del cálculo lagrangiano y una transición a cálculo euleriano. Durante la fase lagrangiana, los nodos se fijan temporalmente al material y los elementos se deforman dentro de éste, al pasar a la fase euleriana la deformación es suspendida y los elementos deformados son remallados automáticamente, de esta manera se calcula la nueva distribución de material en el dominio euleriano (Simulia, 2014).

En la figura 3.2 se muestra el análisis de la deformación de un remache comparando el análisis lagrangiano contra el análisis CEL; se puede observar que en ambos análisis existen penetraciones de material, en el primer caso se produce debido a la distorsión de malla, mientras el segundo caso es debido a las aproximaciones geométricas y rastreo de condiciones de frontera con elementos parcialmente llenos de material para visualizar el dominio euleriano, estos defectos se resuelven mediante un refinamiento de malla (Figura 3.3).

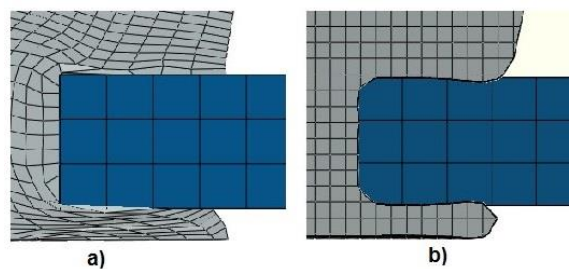


Figura 3.2 Penetración en la superficie de contacto a) Análisis lagrangiano y b) Análisis CEL (Simulia Dassault Systemes, 2014).

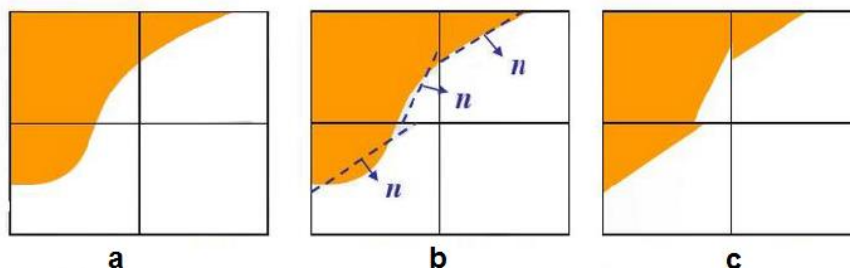


Figura 3.3 Evolución del algoritmo lineal de reconstrucción de geometrías a) geometría original, b) reconstrucción y c) geometría final (Simulia, 2014).



### 3.2 Laminación de una viga tipo S

Este modelo cuenta con 9 pasos de laminación y con 4 rodillos con diferentes canales implementados a lo largo de un tren de laminación semicontinuo.

Por cuestiones de capacidad de cómputo se modeló únicamente  $\frac{1}{4}$  parte del modelo original. Sumado a esto se consideró una décima parte de la longitud inicial del material: 0.5 [m]. Además, debido al excesivo tiempo de cómputo se aplicó un factor de escalamiento de velocidad en el que se aumentaron 5 y 10 veces las velocidades reales.

El modelo presentado en este trabajo se consideró isotérmico, sin transferencia de calor, por lo que a diferencia del modelo de He Qingqiang este modelo presenta un coeficiente de fricción a temperatura constante, por lo cual se asignó un valor fijo para éste a lo largo del proceso.

### 3.3 Geometrías

El material de trabajo se modeló como una pieza sólida 3D euleriana con dos planos de simetría, además se generaron diversas particiones y un corte a lo largo de la pieza con el objetivo de reducir el número de elementos presentes en la malla (Figura 3.4).

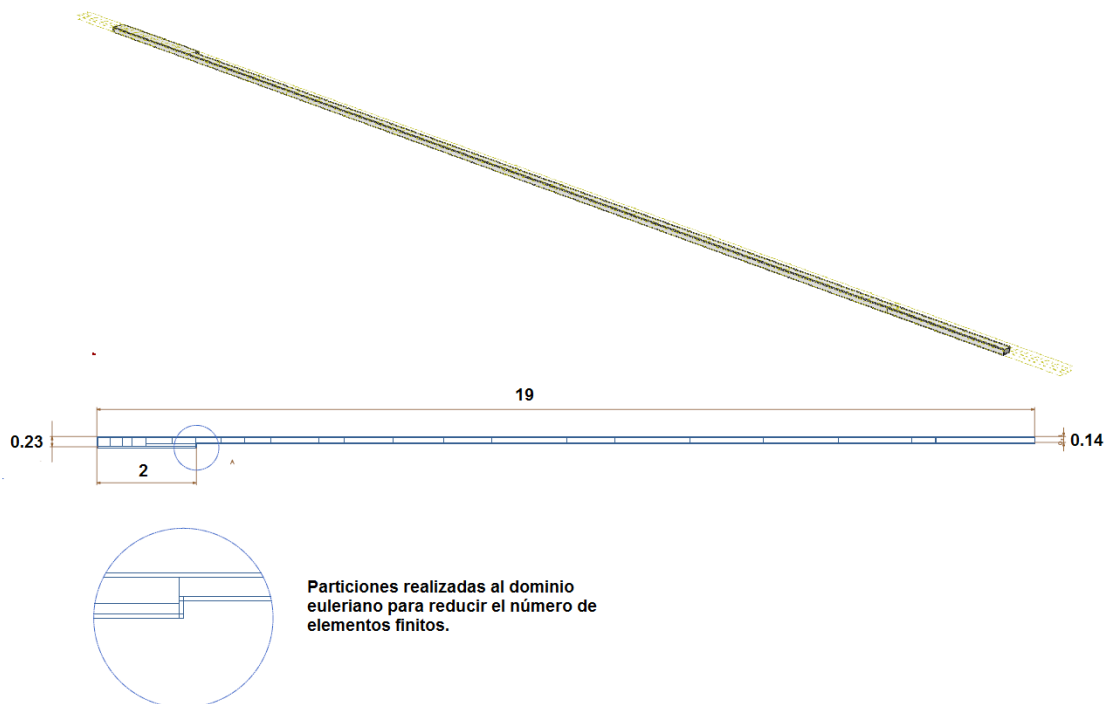


Figura 3.4 Geometría del dominio euleriano que contiene el material, dimensiones en [m].

Los rodillos se modelaron como cuerpos discretamente rígidos. Las geometrías de los rodillos se presentan a continuación:

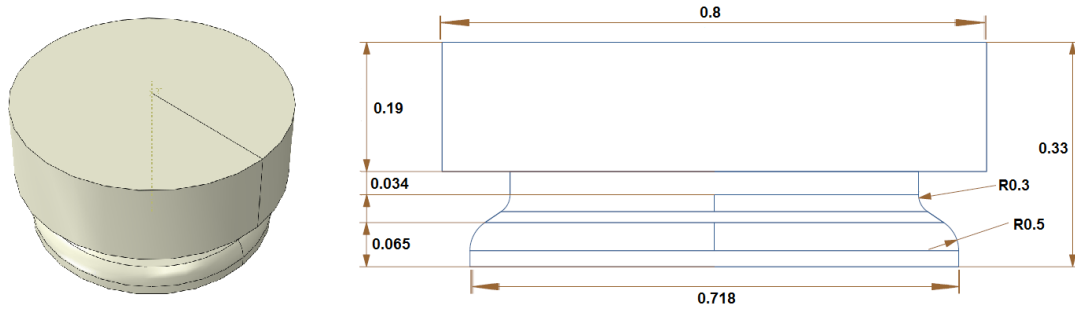


Figura 3.5 Geometría del rodillo 1, dimensiones en [m].

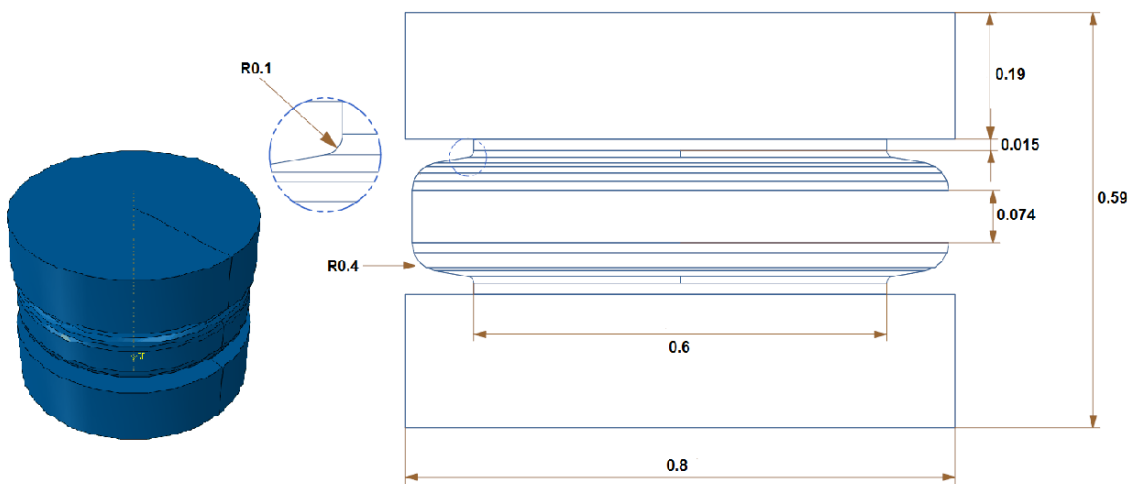


Figura 3.6 Geometría del rodillo 2, dimensiones en [m].

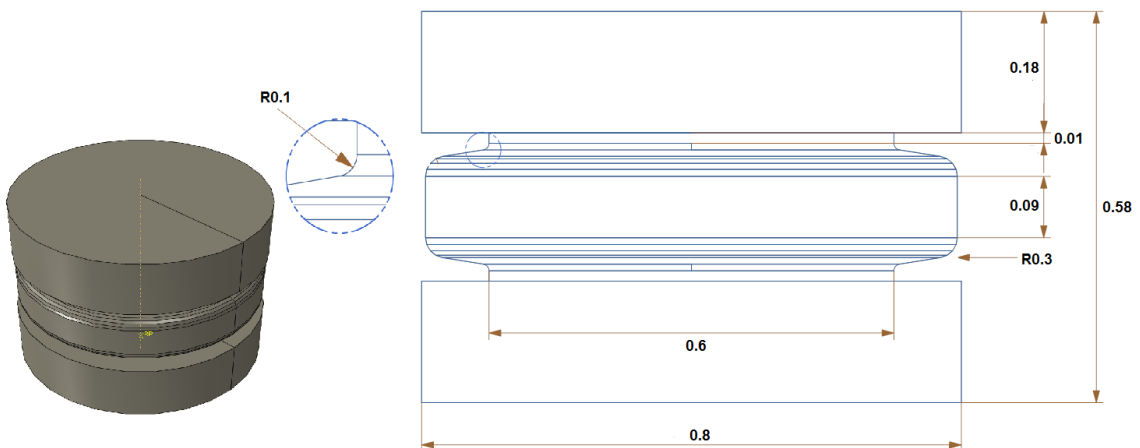


Figura 3.7 Geometría del rodillo 3, dimensiones en [m].

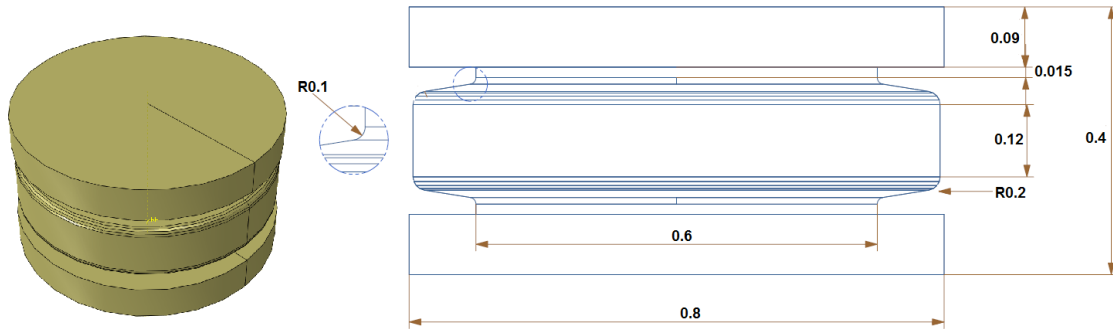


Figura 3.8 Geometría del rodillo 4, dimensiones en [m].

Para el ensamble, los rodillos fueron distribuidos a lo largo del dominio euleriano como se muestra en la figura 3.9. El rodillo 1 se encarga de realizar los dos primeros pasos; el rodillo 2 realiza los pasos 3, 4, 5 y 6; el rodillo 3 se encarga de laminar al material durante los pasos 7 y 8; el último paso es realizado por el rodillo 4.

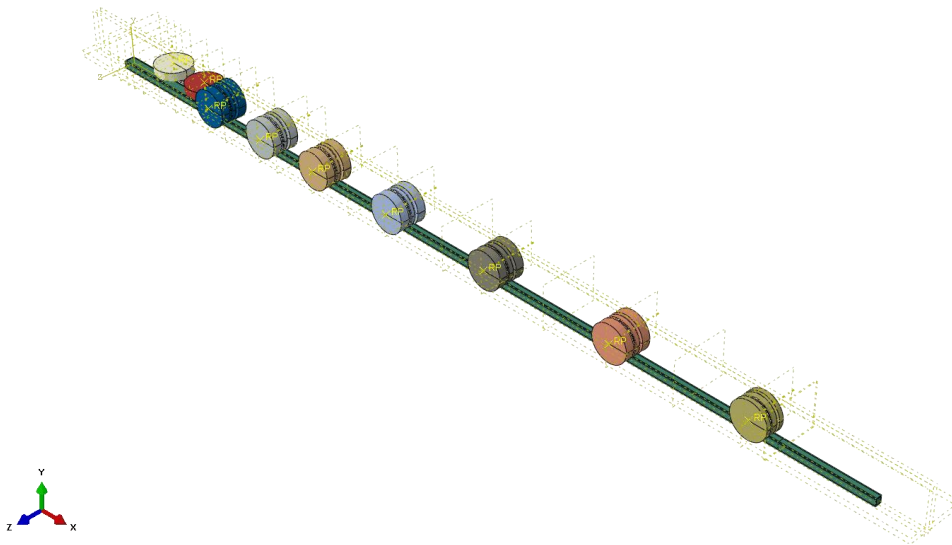


Figura 3.9 Ensamble del proceso de laminación.

El material, mostrado en color morado (Figura 3.10) fue definido dentro del dominio euleriano mediante particiones. Las dimensiones del material son las siguientes 0.3x0.1875x0.12 [m].

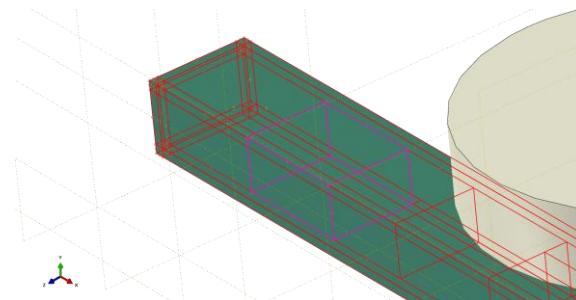


Figura 3.10 Asociación local del material.



### 3.4 Propiedades del material

Para el material del tocho se consideró acero Q235, para el cual se tiene la siguiente composición química:

| %C        | %Mn       | %Si       | %S     | %P     |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| 0.12-0.20 | 0.30-0.70 | 0.12-0.30 | ≤0.045 | ≤0.045 |

Se utilizaron las propiedades de este acero a una temperatura de 1300°C. El material posee una densidad de 7833 [Kg/m<sup>3</sup>], las propiedades elásticas se definieron de acuerdo al módulo de elasticidad de 110 [GPa] y la relación de Poisson de 0.33 (Qingqiang, 2013). En la figura 3.11 se muestra la curva esfuerzo-deformación para la zona de deformación plástica para temperaturas de 900°C y 1300°C.

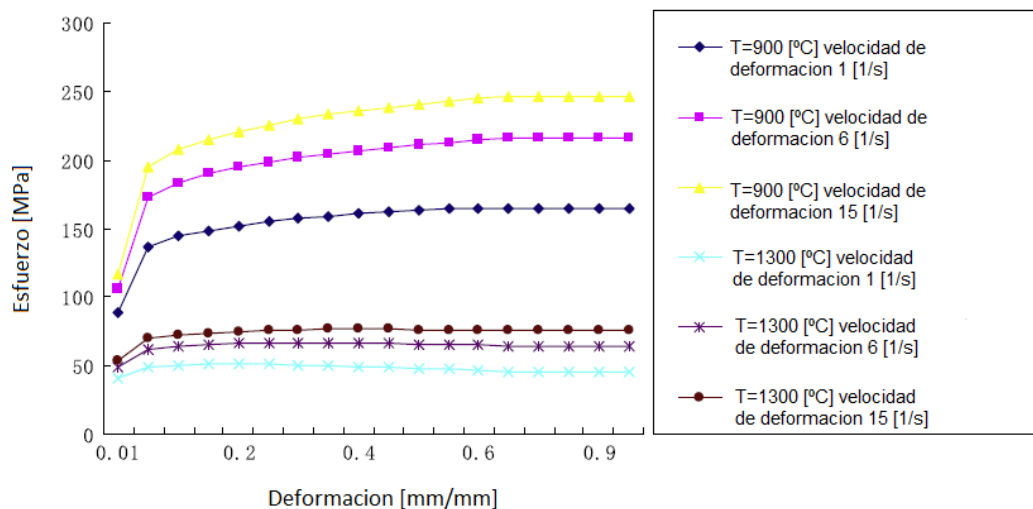


Figura 3.11 Curva Esfuerzo-deformación para el acero Q235 (Qingqiang, 2013).

### 3.5 Parámetros del proceso

El coeficiente de fricción entre los rodillos se definió como:

$$f = 1.05 - 5 \times 10^{-4}T - 5.6 \times 10^{-2}v$$

donde T[°C] es la temperatura del tocho y V [m / s] es la velocidad de laminación, de esta manera se obtuvo un coeficiente de fricción de 0.4. Para el análisis se utilizó la opción de contacto general para simular la interacción entre los rodillos y el material de trabajo.

En la Tabla 3.2 se muestran las velocidades y la separación entre rodillos para cada uno de los nueve pasos simulados en este trabajo, estos datos fueron tomados del trabajo realizado por He Qingqiang.

Debido al excesivo tiempo de cómputo se aplicó un factor de escalamiento de velocidad, se aumentaron las proporciones 5 y 10 veces a las velocidades reales.



**Tabla 3.2 Parámetros del proceso de laminación en caliente para un perfil S con 9 pasos**

| Paso | Rodillo | Separación de los rodillos [mm] | Factor 10                               |                               | Factor 5                                |                               |
|------|---------|---------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
|      |         |                                 | Velocidad angular de los rodillos [RPM] | Velocidad de laminación [m/s] | Velocidad angular de los rodillos [RPM] | Velocidad de laminación [m/s] |
| 1    | 1       | 147                             | 481                                     | 30                            | 240.5                                   | 15                            |
| 2    | 1       | 82                              | 739                                     | 30                            | 369.5                                   | 15                            |
| 3    | 2       | 122                             | 557                                     | 30                            | 278.5                                   | 15                            |
| 4    | 2       | 72                              | 676                                     | 30                            | 338                                     | 15                            |
| 5    | 2       | 37                              | 681                                     | 30                            | 340.1                                   | 15                            |
| 6    | 2       | 12                              | 686                                     | 30                            | 343                                     | 15                            |
| 7    | 3       | 20                              | 661                                     | 30                            | 330.5                                   | 15                            |
| 8    | 3       | 12                              | 661                                     | 30                            | 330.5                                   | 15                            |
| 9    | 4       | 12                              | 645                                     | 30                            | 322                                     | 15                            |

En este modelo se aplicaron dos simetrías al material, para simular únicamente  $\frac{1}{4}$  parte de éste, para reducir el tiempo de cómputo. Además, para evitar que el material fluyera fuera del dominio euleriano se aplicaron condiciones de velocidad cero en dirección perpendicular a las caras laterales del material.

Se asignó un nodo de referencia a cada uno de los rodillos, con el fin de restringir únicamente el giro de éstos. Evitando de esta manera cualquier otro movimiento posible, asegurando el giro y la estabilidad de los rodillos.

Para la simulación de este proceso se generaron nueve pasos dinámicos explícitos. Definiendo a cada paso como la división de etapas para el análisis de este proceso. En un análisis explícito los desplazamientos y velocidades se calculan en términos de cantidades conocidas al inicio del paso. Debido a la deformación excesiva del material se optó por este tipo de análisis que proporciona un costo computacional bajo en comparación con el método implícito.

### 3.6 Mallado

La malla euleriana consiste en una cuadrícula rectangular que se extiende a lo largo del material y más allá de sus fronteras, dándole al material un mayor espacio en el que se puede mover y deformar. Si alguna porción del material se mueve fuera de la malla se omite de la simulación.

Los elementos utilizados para mallar fueron los tridimensionales con 8 nodos (EC3D8R) y para determinar el tamaño adecuado de éstos en el modelo final se realizaron varios experimentos con un modelo más simple, en este caso una laminación plana. Estos experimentos consistían en variar el tamaño de los elementos para observar el efecto que tenían en la visualización final.

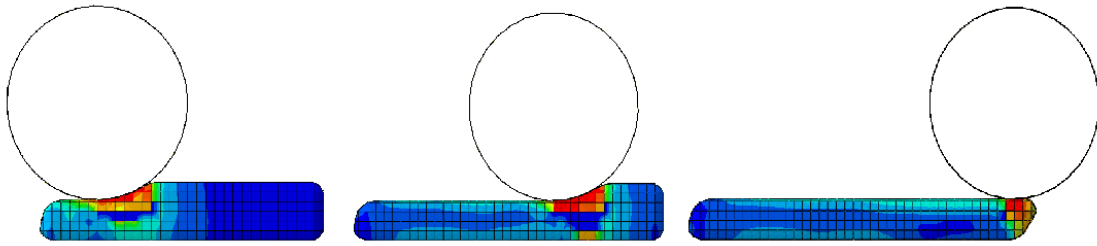


Figura 3.12 Laminado plano con metodología CEL.

A partir de estos experimentos se determinó que era necesario definir un tamaño mínimo para los elementos de la malla, esto debido a que si el elemento poseía un tamaño mayor al de la separación entre rodillos el material era incapaz de fluir a través de éstos.

Debido a lo anterior se determinó que el tamaño mínimo para los elementos sería de 0.006 [m], esto debido a que con este tamaño el material tenía al menos un elemento para desplazarse a través de los rodillos (Figura 3.13). Los rodillos fueron mallados con elementos de tamaño de 0.05 [m] como se puede observar en la Figura 3.14.

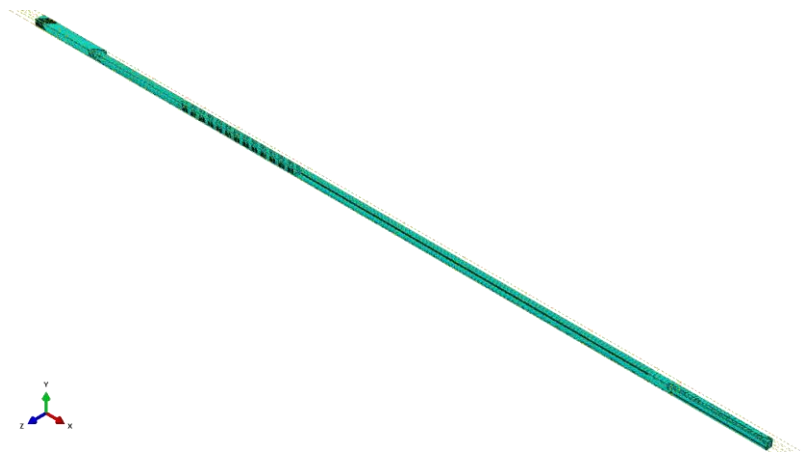


Figura 3.13 Mallado del dominio euleriano.

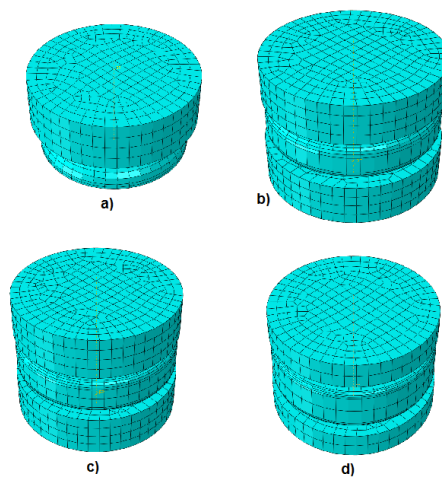


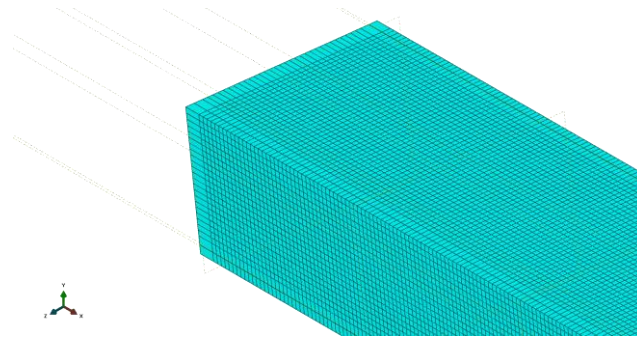
Figura 3.14 Mallado de los rodillos de laminación a) rodillo1, b) rodillo2, c) rodillo3 y d) rodillo 4.



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



Se redujo el número de elementos mediante un mallado más grueso en las fronteras del dominio, dejando un mallado uniforme en la zona donde existe material definido, como se observa en la Figura 3.15. El número total de elementos presentes en el modelo es de 1, 792, 793.



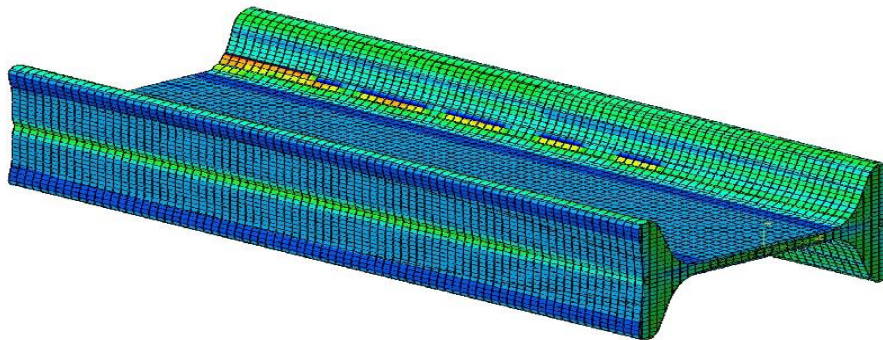
**Figura 3.15** Detalle del mallado en el dominio.



## Capítulo 4 Análisis de resultados

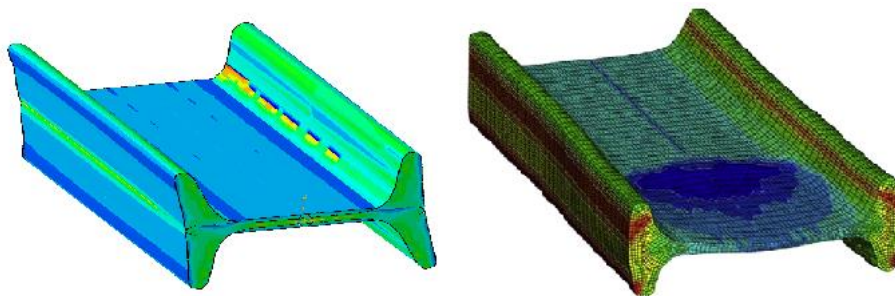
En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas acerca del proceso de laminación de una viga S mediante CEL. Se presentará el flujo de material, la distribución de esfuerzos y deformación a lo largo de tal proceso.

A continuación, se muestra la pieza completa y con cortes en los extremos para una mejor visualización de la geometría final (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Pieza final completa.

Mientras que en la Figura 4.2 se muestra la comparación entre la geometría final obtenida mediante la metodología CEL y la geometría de He Qingqiang obtenida mediante una metodología lagrangiana. Se aprecia que la primera presenta una geometría más uniforme en comparación con la lagrangiana.



**Figura 4.2** Comparación entre pieza laminada a) CEL y b) Lagrangiana.

### 4.1 Distribución de la deformación

Para la presentación de resultados se consideró el cuarto de simetría del material que fue laminado. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran la distribución de la deformación para las velocidades de laminación de 30 y 15 [m/s] respectivamente, recordando que estas velocidades fueron establecidas con un escalamiento de velocidades para la reducción del tiempo de cómputo.



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



En la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos del modelo a 30 [m/s] para la deformación presentada en el material a lo largo de los nueve pasos de laminación. Se nota que en este modelo la deformación presentada fue severa, debido a la alta velocidad a la que se estableció el modelo. Los puntos con mayor deformación fueron las partes centrales de la viga en donde se tenía el contacto directo con los rodillos. Los valores de deformación máxima resultaron elevados, pese a que se obtuvo la geometría deseada.

En la Figura 4.3A se observa la zona de contacto con el primer rodillo, esta zona presenta un valor máximo de deformación, la cual aumenta su área de contacto en la Figura 4.3B conservando valores máximos de deformación.

Por otro lado, se tiene que en la Figura 4.3C inicia el retraso de material en la parte inferior y lateral de la viga, esto debido a la redistribución de material provocada por el paso del rodillo, este retraso va aumentando durante los siguientes pasos (Figura 4.3D), hasta llegar al sexto paso donde el retraso de material se detiene (Figura 4.3E) y se mantiene constante en los pasos posteriores. Este comportamiento resulta parecido a lo presentado en un proceso real, en el cual ambos extremos de la viga terminarían siendo cortados debido a que la deformación no resulta homogénea en tales extremos, por lo cual solo se conservaría la parte central de la viga.

En la Figura 4.3F se ve la reducción de la altura en la cara lateral de la viga, este cambio de altura resulta paulatino en los pasos de laminación, con el objeto de conservar la geometría de la viga a lo largo del proceso.

En la Figura 4.4 se tiene una reducción del 48% en los valores de deformación presentada en el material comparado con el modelo a 30 [m/s]. La zona con mayor deformación fue la parte central de la viga que está en contacto con los rodillos, ya que presenta un comportamiento más puntual en contraste con el modelo anterior. También se aprecia en este segundo modelo que la deformación va tendiendo a ser uniforme a lo largo del material conforme se llevan a cabo los pasos de laminación.

En la Figura 4.4A se nota la zona de contacto con el primer rodillo, esta zona presenta un valor máximo de deformación, siendo muy puntual, la cual aumenta su área de contacto en la tabla 4.4B presentando valores más homogéneos y quedando por debajo de los valores máximos de deformación.

En la Figura 4.4C y 4.4D se observan valores máximos en la cara lateral de la viga, siendo estos muy puntuales. En estas imágenes se aprecia la reducción en los valores de deformación presentados en el contacto con la herramienta.

Por otro lado, en la Figura 4.4E se presenta la aglomeración de material provocado por el paso del rodillo, esta aglomeración posteriormente es redistribuida por el rodillo. También puede apreciarse que esta aglomeración se presenta en menor cantidad en pasos posteriores (Figura 4.4F y Figura 4.4G), debido a que la reducción en tales pasos resulta menor conforme avanza el proceso.

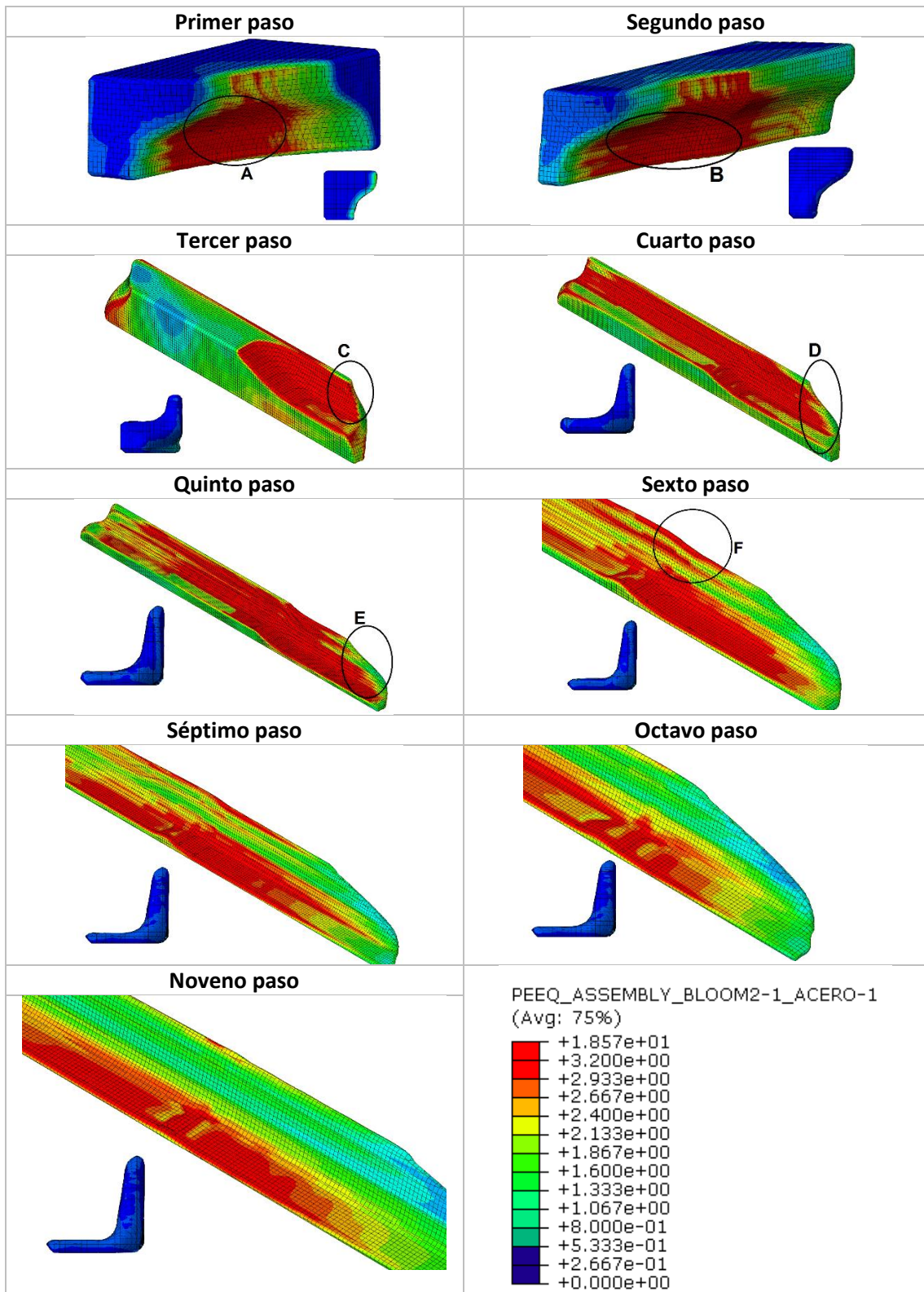


Figura 4.3 Distribución de la deformación modelo a 30 [m/s]

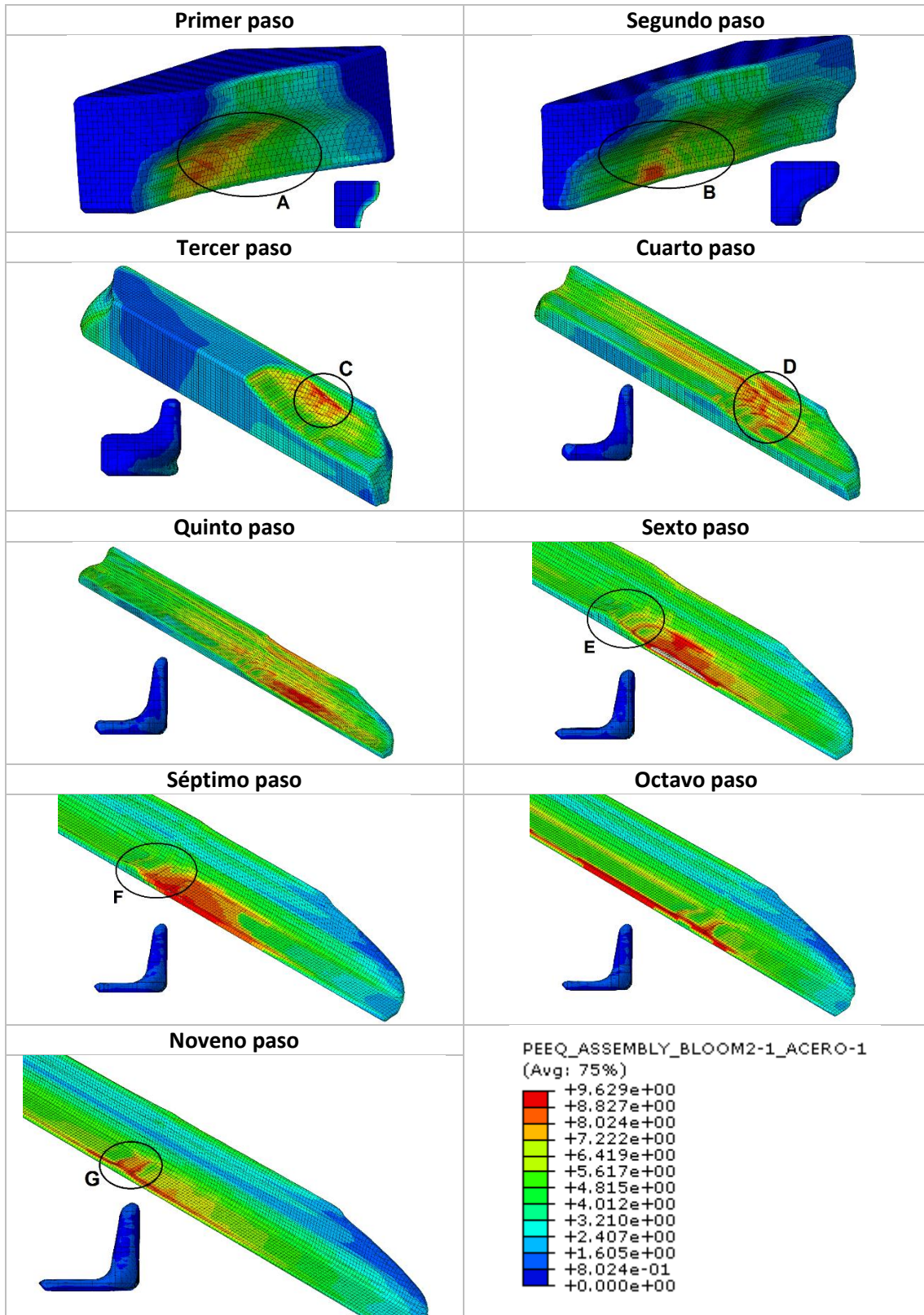


Figura 4.4 Distribución de la deformación modelo a 15 [m/s]



## 4.2 Distribución de esfuerzos

En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran las distribuciones de esfuerzos en el material a lo largo del proceso en los modelos a 30 y 15 [m/s] respectivamente.

En la primera se observa que el mayor esfuerzo se presenta durante el contacto con el rodillo, lo cual era el comportamiento esperado. También se tiene que después de cada paso el material pasa a una etapa de relajación de esfuerzos, la cual se presenta en color verde que comienza a atenuarse a un azul claro.

En la Figura 4.5A y 4.5B se ve el contacto del material con la herramienta, presentando en esta zona el máximo esfuerzo, siendo este mayor a los 50 MPa. Este comportamiento resulta ser lo esperado en un proceso real.

Mientras que en la Figura 4.5C se aprecia que en los bordes del material se presenta un esfuerzo máximo, mientras que en las caras laterales se presenta un esfuerzo mínimo. Esta zona presenta una transición exagerada de esfuerzos lo que indica que el tamaño de la malla en esa zona resulta ser muy grande por lo que no permite una visualización adecuada. Una situación similar se presenta en Figura 4.5E. Para solucionar este problema bastaría con reducir el tamaño de malla en esa zona, teniendo en cuenta que al hacer eso, el tiempo de cómputo aumentaría considerablemente.

En la Figura 4.5D se muestra como el material al salir del paso de laminación entra en una etapa de relajación de esfuerzos, esto debido a que se presenta una recrystalización dinámica en el material, lo cual se muestra como una transición a colores más claros.

En la segunda imagen se muestra el proceso a 15 [m/s], en ésta se observa un comportamiento similar al de la imagen anterior con la diferencia que el valor máximo de esfuerzos se redujo en 10 KPa, obteniendo un valor máximo de 50 MPa; éste se presenta durante el contacto con los rodillos, tal y como el modelo anterior. La diferencia del valor máximo de esfuerzo entre ambos modelos se establece de aproximadamente 0.0002% lo cual es mínimo.

En la Figura 4.6A y 4.6E se observan otros puntos de baja resolución presentes en el primer y último paso de laminación, lo cual indica la necesidad de reducir el tamaño de malla en material con la finalidad de evitar estas regiones.

Se aprecia que la mayor reducción se presenta entre los pasos tres y cuatro (Figura 4.6B y 4.6C). Entre estos pasos se lleva a cabo una reducción aproximada del 20%.

También se aprecia que en la interior de la viga se presenta un esfuerzo menor que en las caras laterales, esto debido a que en esa zona el rodillo ejerce una menor presión en comparación con la que ejerce en tales caras (Figura 4.6D).

Cabe destacar que en ambos casos de estudio la geometría obtenida es similar y la distribución de esfuerzos presentes en el material es prácticamente la misma, presentando valores máximos tanto en las caras horizontales y verticales de la pieza.

Durante los primeros pasos al ser una menor área de contacto el material se encuentra completamente sometido al esfuerzo provocado por el rodillo, mientras que en pasos posteriores, al aumentar la longitud de la pieza, este suceso se va volviendo más localizado.

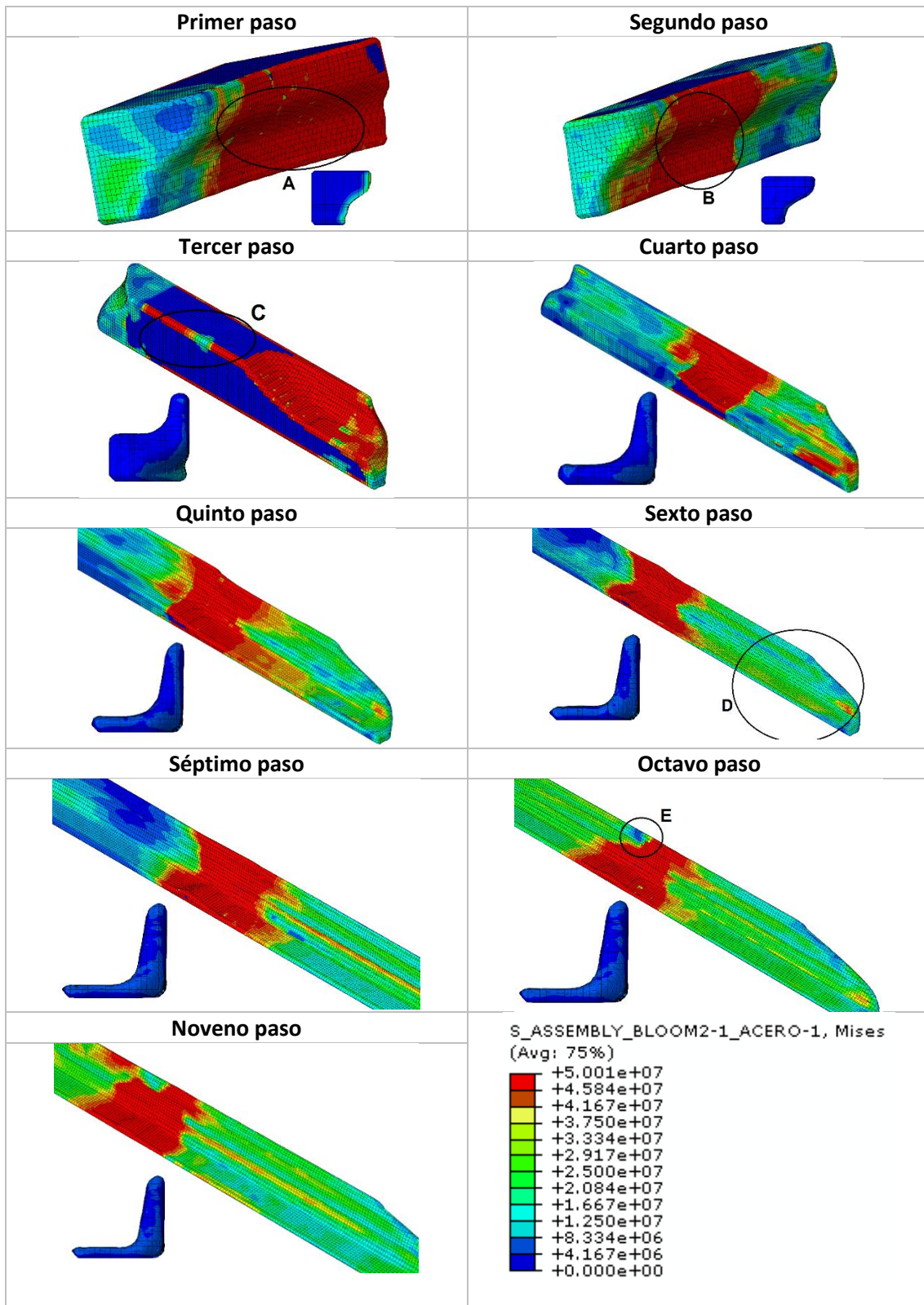


Figura 4.5 Distribución de esfuerzos modelo a 30 [m/s]

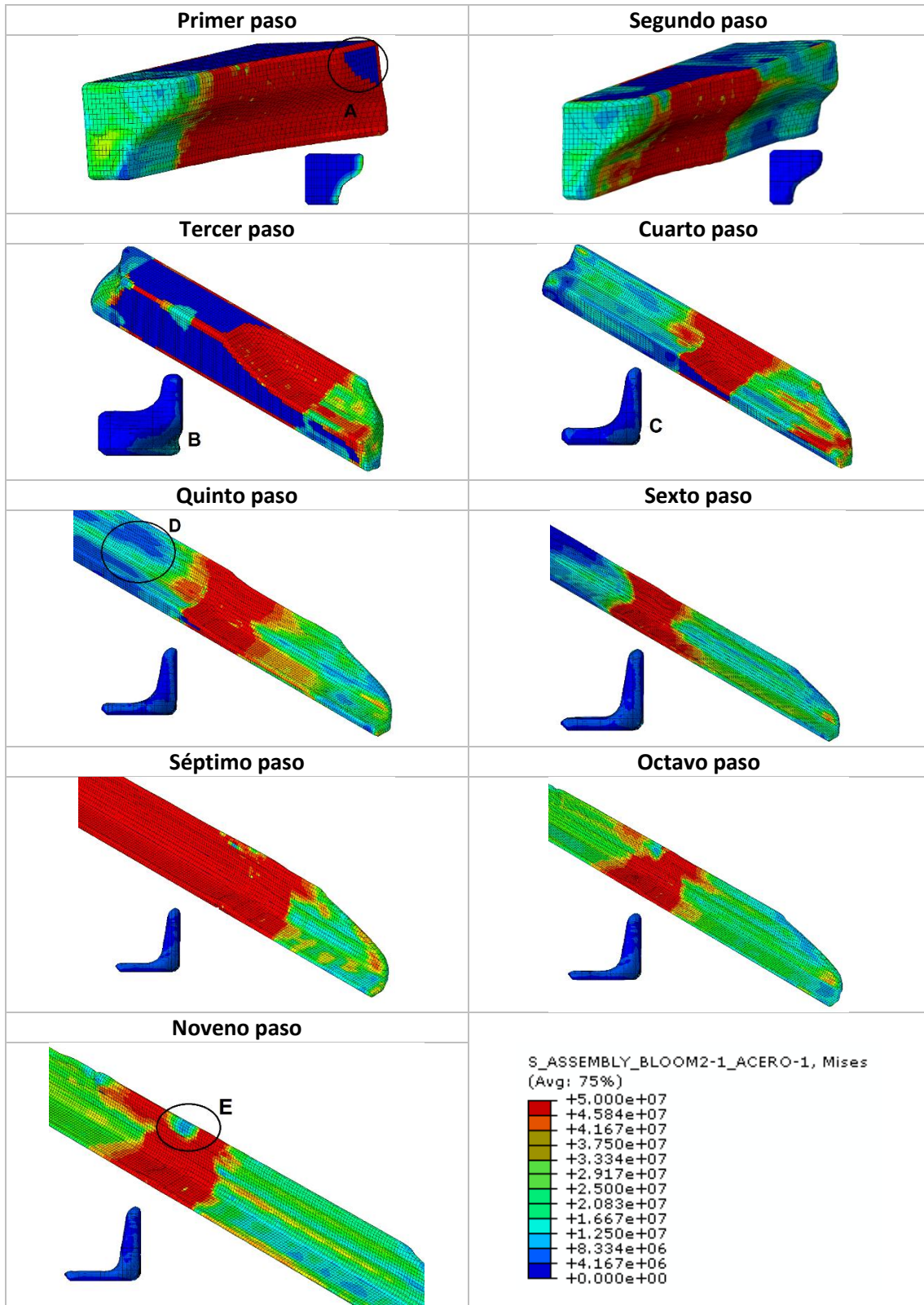
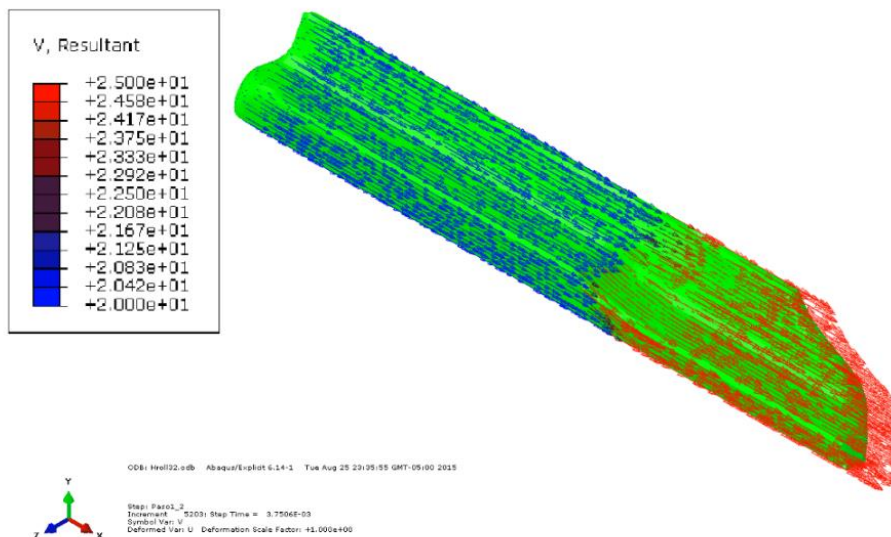


Figura 4.6 Distribución de esfuerzos modelo a 15 [m/s]

### 4.3 Flujo de material

La visualización vectorial del flujo de material permitió observar el comportamiento de éste en los dos casos de estudio. Este comportamiento para ambos casos fue casi el mismo, con excepciones muy particulares, de las cuales se hablará con mayor detenimiento más adelante, por lo que primero se presentará el comportamiento general del material para el proceso.

El flujo de material se muestra en la Figura 4.7. En esta imagen se observa el cambio de velocidades durante el cuarto paso de laminación, las flechas en rojo representan a los vectores de velocidad del material que se encuentra en contacto con el rodillo, los cuales presentan un incremento del 25% de la velocidad inicial. Además, se observa que la dirección de éstos es paralela a la dirección de avance de los rodillos. Éste comportamiento en el material coincide con lo esperado, ya que el material fluye debido al movimiento de los rodillos y sigue la dirección de éstos.



**Figura 4.7 Flujo de material durante el cuarto paso de laminación.**

El comportamiento del flujo del material puede apreciarse mejor en la figura 4.8, en ésta se observa la trayectoria que sigue el material durante el tercer paso de laminación, siguiendo la trayectoria marcada por el rodillo, lo que permite apreciar la compresión del material y la redistribución de éste.

En la figura 4.8A se observa que el material comienza a fluir en diversas direcciones, ya que se presenta una redistribución de éste a causa del giro de los rodillos. Mientras que en la figura 4.8B se observa un cambio de flujo debido a la compresión del material, éste último presenta un cambio de velocidades, el cual se observa como una aglomeración de vectores en esta zona. Por último, se muestra la presencia de un flujo homogéneo a la salida del rodillo (Figura 4.8C), debido a que la velocidad de salida es la misma para todo el material.



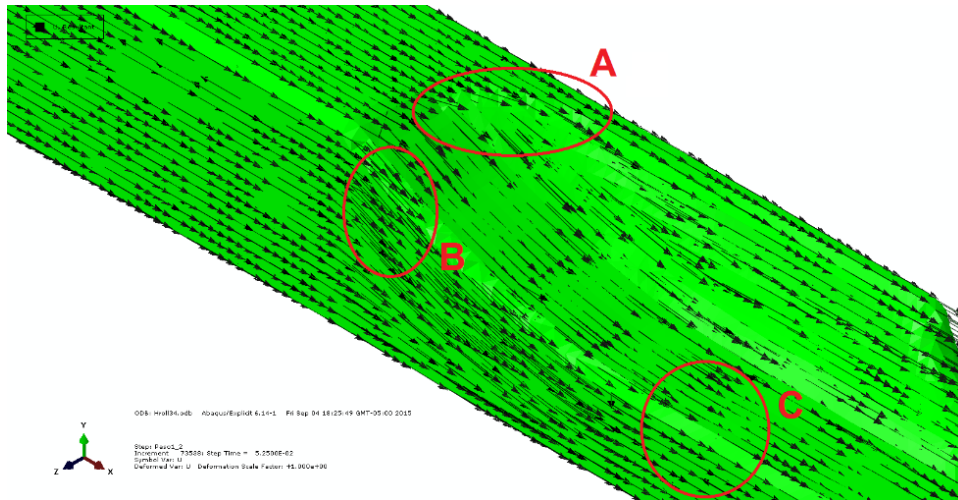


Figura 4.8 Flujo de material en el tercer paso de laminación.

En la siguiente figura se muestra el flujo de material en el séptimo paso de laminación. Se observa que a diferencia de la Figura 4.8, el flujo es más uniforme, esto debido a que durante el séptimo paso la reducción fue menor en comparación al tercero. Puede apreciarse que el material continúa distribuyéndose a lo largo de la trayectoria establecida por el rodillo. En esta imagen también es posible observar la acumulación del material que será posteriormente redistribuida por el paso del rodillo (Figura 4.9).

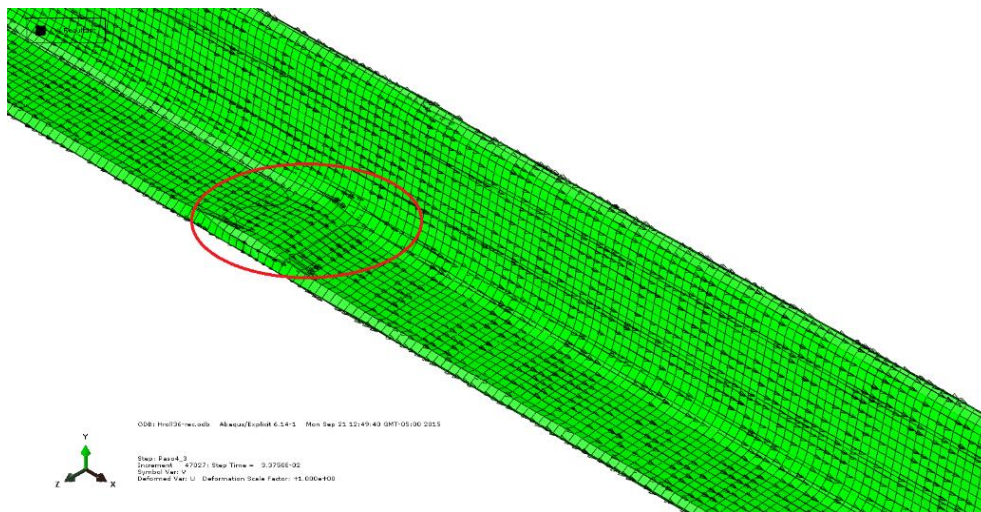


Figura 4.9 Acumulación de material en el séptimo paso de laminación.

Pese a que la distribución de material fue casi la misma en ambos modelos, para el modelo de 30 [m/s] se presentó un defecto en los últimos pasos de laminación, un hueco debido a la velocidad excesiva (Figura 4.10A y 4.10B), tal defecto fue eliminado al reducir la velocidad de laminación a 15 [m/s].

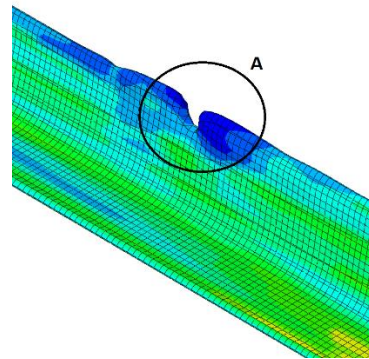


Figura 4.10 Defecto presentado por la velocidad excesiva.

#### 4.4 Fuerza de laminación

En la Figura 4.11 se muestran los resultados obtenidos en los dos casos presentados en este trabajo, recordando que se aplicó un factor de escalamiento para reducir el tiempo de cómputo. Se aprecia en los nueve pasos de laminación que este escalamiento afecta directamente a la fuerza, pues en el modelo a 30 [m/s] se presentan las cargas más altas, llegando en su punto más alto a las 650 toneladas. Posteriormente al reducir la velocidad a 15 [m/s], la fuerza máxima disminuye en casi 200 toneladas, de esta manera presentando una reducción aproximada del 30% del valor máximo presentado en el primer paso.

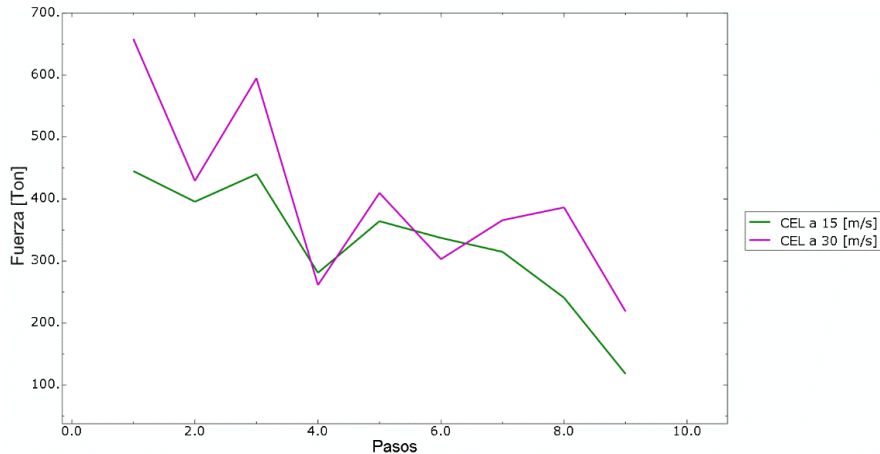


Figura 4.11 Fuerza de laminación CEL a 15 [m/s] - CEL a 30 [m/s].

A continuación se presenta la gráfica del modelo a 30 [m/s] contra los valores medidos por He Qingqiang. Se observa que existe un error promedio del 33% entre ambos datos, lo cual indica que el escalamiento de velocidades tiene repercusiones significativas sobre la fuerza de laminación, presentando diferencias de cientos de toneladas entre ambos modelos. Para este modelo a 30 [m/s] se obtuvo una fuerza máxima de casi 650 toneladas en el primer paso, cuando en los datos medidos el valor máximo se presenta en el último paso y no excede las 600 toneladas. Tanto en el primer y último paso se observan los máximos errores para el valor de la fuerza, teniendo errores del 88% y 64% respectivamente.

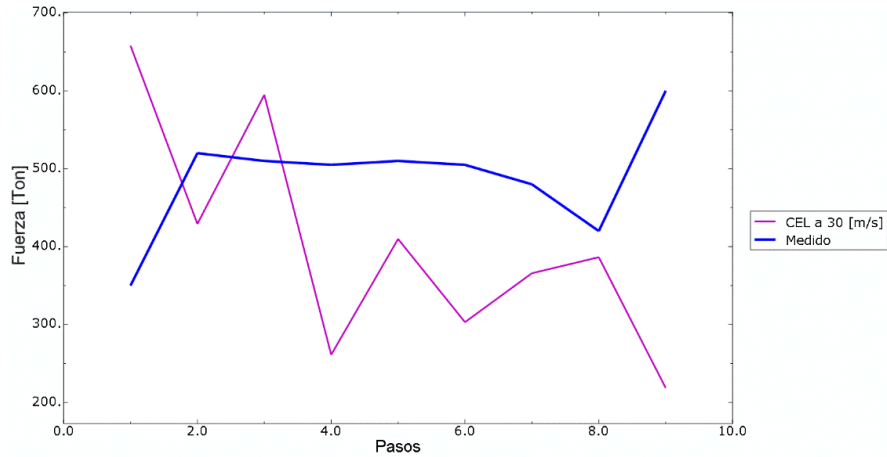


Figura 4.12 Fuerza de laminación CEL a 30 [m/s] – Medido.

El modelo a 15 [m/s] presentó una reducción de casi 200 toneladas en los valores máximos de la fuerza, sin embargo, el comportamiento sigue sin ser el esperado. Se observa que el valor máximo de la fuerza disminuyó hasta las 450 toneladas lo que nos indicaría que a la velocidad real, éste valor sería menor. Se observa que entre los pasos 2 y 8 la gráfica tiende a tener un comportamiento parecido a lo reportado por He Qingqiang, sin embargo los valores de la fuerza presentados en este modelo están por debajo de lo esperado. Durante el último paso se presenta el mayor error en la fuerza de laminación, siendo este del 77%. Para este modelo se tiene un error promedio del 29%.

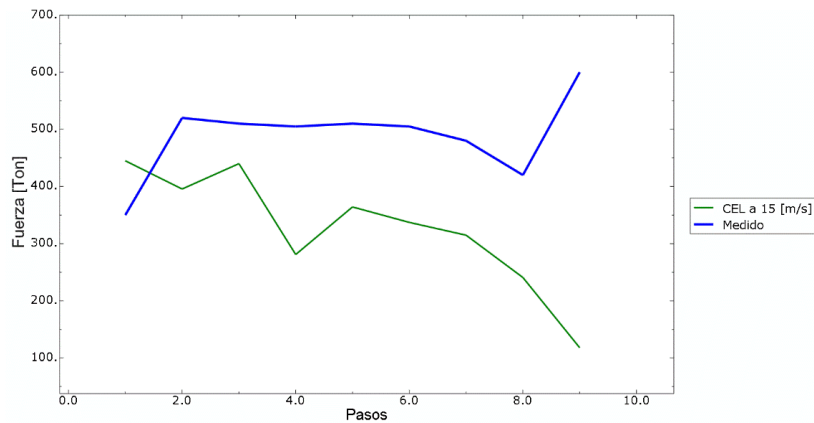


Figura 4.13 Fuerza de laminación CEL a 15 [m/s] – Medido.

La diferencia de los datos presentados estaría asociada al escalamiento que se utilizó en el modelo con el objeto de reducir el tiempo de cómputo.

En el modelo original se tenía un modelo termo-mecánico donde el valor de la fricción en cada paso era dependiente de la temperatura. Y como se observó en el capítulo 2, el valor de la fricción tiene una gran influencia sobre las fuerzas necesarias para llevar a cabo el proceso. Con lo anterior se tiene que los datos obtenidos se encuentran por debajo de lo esperado debido a considerar un valor de fricción fija en cada paso de laminación.



## 4.5 Energía interna y cinética

Generalmente para comprobar la validez de un modelo implementado en Abaqus®, se tiene el criterio de las energías, el cual indica que la energía cinética debe ser menor al 10% de la energía interna total (Cristóbal, 2015); sin embargo para el caso de CEL no se ha establecido la validez a este criterio.

En las Figuras 4.14 y 4.15 se observan las gráficas de la energía cinética y de la energía interna total para los dos casos de estudio. Se observa que en ambos casos la energía cinética está por debajo del 10% de la energía interna total, sin embargo los resultados presentados en el flujo de material mostraron que el modelo a 30 [m/s] presentaba ciertos defectos, los cuales no se presentaron en el modelo a 15 [m/s], esto a causa de la velocidad excesiva del primero, por lo que en este caso el criterio de las energías no resulta suficiente.

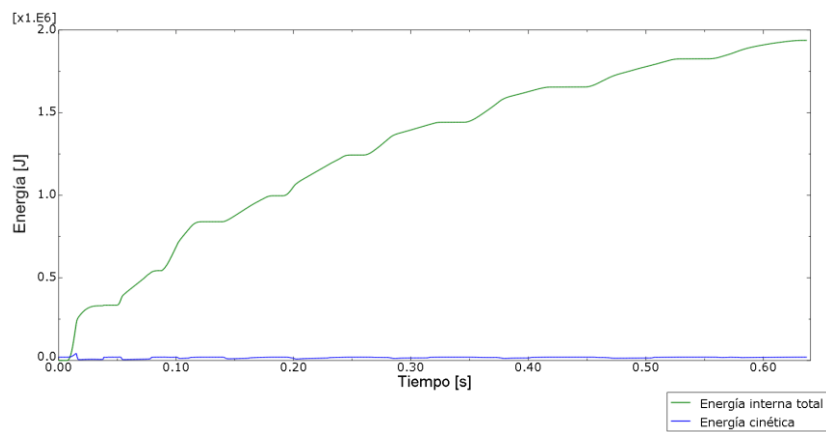


Figura 4.14 Energía cinética y energía interna para el modelo a 30 [m/s].

En Figura 4.15 se observa que la energía cinética no aumenta en ningún instante, a diferencia de la Figura 4.14 donde se presentan ciertos saltos a lo largo del proceso.

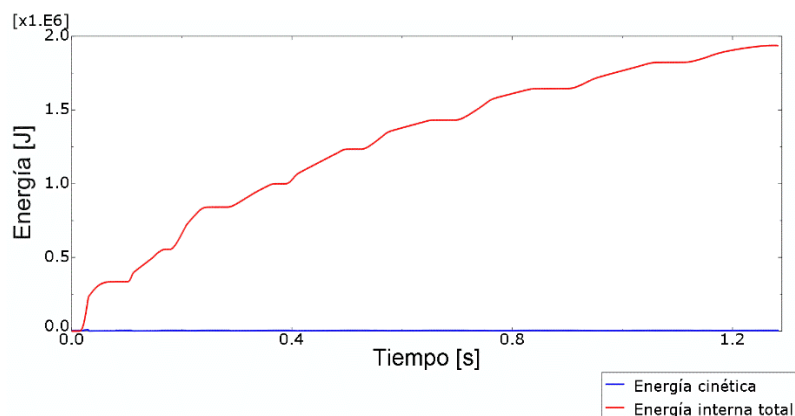


Figura 4.15 Energía cinética y energía interna para el modelo a 15 [m/s].



## 4.6 Tiempo de cómputo

En la tabla 4.1 se muestran los tiempos de cómputo de cada caso de análisis, ambos cuentan con las mismas características incluyendo el número de elementos presentes en la malla. Lo único que varía entre cada caso es el escalamiento de velocidad aplicado a cada uno. Se tiene que el tiempo de cómputo en el modelo 2 aumento considerablemente, casi el doble del tiempo empleado para el modelo 1.

| <b>Modelo</b> | <b>Velocidad [m/s]</b> | <b>Tiempo [horas]</b> |
|---------------|------------------------|-----------------------|
| 1             | 30                     | 129                   |
| 2             | 15                     | 249                   |

Los modelos fueron simulados en un equipo con ocho procesadores lógicos a 3.4 GHz y 16 Gb de memoria RAM. De acuerdo a los datos obtenidos, si se quisiera implementar el modelo a la velocidad real de aplicación, con las mismas condiciones tardaría aproximadamente 1245 horas lo que equivaldría a 51 días de cómputo.



## Capítulo 5 Conclusiones

Se demostró que el valor máximo de la deformación presentada en el material es dependiente de la velocidad de proceso, ya que al aplicar un escalamiento de velocidad generó resultados con valores superiores a lo esperado. Debido a lo anterior se determinó que la mejor manera de obtener los valores reales de deformación es simular el proceso a la velocidad real. En los casos de estudio presentados se observó una reducción del 48% en la deformación máxima en el material.

Se comprobó que el proceso de análisis fue correcto debido a que se presentó en los extremos de la viga un retraso de material tal y como ocurriría en un proceso real. Tales extremos son cortados en un proceso real.

Se obtuvo que durante el contacto con el rodillo se presentó el mayor esfuerzo y a la salida de éste se presentó una relajación de esfuerzos en el material. La diferencia del valor máximo de esfuerzo entre ambos modelos fue de 0.0002%. Además, se presentaron zonas con baja resolución debido al tamaño de la malla, con lo cual se determinó necesaria la reducción del tamaño de la malla para estas zonas.

Las altas velocidades aplicadas al proceso provocaron la presencia de defectos durante los últimos pasos de laminación. También, se presentó un flujo de material paralelo a la dirección del avance de los rodillos y se apreció un incremento de la velocidad en el material de un 25% cuando éste tenía contacto con los rodillos, obteniendo de esta manera otro comportamiento semejante al de un proceso real.

El escalamiento de velocidad y las numerosas simplificaciones aplicadas al modelo afectaron directamente a la fuerza de laminación, teniendo un error del 30% con respecto a los valores medidos. Considerar la temperatura resultaría un factor importante en este caso, debido a la dependencia que presenta la fricción y el esfuerzo de cedencia.

Se demostró que el criterio de la energía resulta ser insuficiente en este caso, ya que, aunque se cumplía con éste, la geometría presentó imperfecciones. Sería prudente en trabajos posteriores de análisis CEL encontrar las condiciones necesarias para la validez de este criterio. A pesar de lo anterior se observó que la energía cinética presentaba dependencia del escalamiento de velocidad.

La metodología CEL ha presentado una solución parcialmente eficaz para modelar procesos de manufactura, teniendo en cuenta las simplificaciones necesarias para la reducción del tiempo de cómputo. Para modelar completamente un proceso de conformado mecánico mediante esta metodología y que éste sea lo más apegado a la realidad, se necesita un equipo de cómputo más potente para realizar los cálculos en el menor tiempo posible.

Para modelar de manera completa el proceso de laminación de un perfil S, sin simplificaciones y con transferencia de calor, el tiempo de cómputo sería mayor a dos meses. Este trabajo mostró algunas ventajas del método CEL como la visualización del flujo de material, un nivel de esfuerzos adecuados, así como una similitud en la geometría después de cada paso de laminación.



## Simulación del proceso de laminación de un perfil estructural en forma de H mediante FEM



También muestra las desventajas de éste, como el excesivo tiempo de cómputo que esta metodología requiere, además de presentar que el escalamiento de velocidad no resulta práctico para modelos dinámicos y que tal vez resulte conveniente para aplicarse a modelos cuasiestáticos.

Este trabajo deja abierta la posibilidad de modelar el proceso con transferencia de calor y observar la variación de los resultados presentados en éste. Quedando como trabajo a futuro la corroboración de la influencia que presentaría la dependencia de la temperatura y la comprobación experimental de éste.

Se recomienda para trabajos posteriores el uso del factor del escalamiento de velocidad si lo que se desea es observar el flujo de material. Para la obtención de valores de esfuerzos y deformaciones se recomienda modelar el proceso completo, con simplificaciones mínimas para una mejor precisión en los resultados.



## Referencias

1. Abaqus/CAE User's Guide v6.14 (2014), Chapter 28.5 The volume fraction tool
2. Abaqus Example Problems Guide v6.14 (2014), Chapter 2.3.1 Rivet forming
3. Abrinia, K., & Fazlirad, A. (2009). *Three-dimensional analysis of shape rolling using a generalized upper bound approach*. Journal of materials processing technology, 209(7), 3264-3277. Islamic Republic of Iran.
4. AHMSA Altos Hornos de México (2014). *Perfiles estructurales*. Recuperado el 15 de julio de 2014, de <http://www.ahmsa.com/productos/perfiles-estructurales>
5. Black, T.J., DeGarmo, E.P. & Kohser, A.R. (1988). *Materiales y procesos de fabricación*. Reverte, Barcelona.
6. Cristóbal, M. (2015). *Modelado del proceso de extrusión directa utilizando un sistema de doble dado*. Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería UNAM, México.
7. Del Rio, J. (1980). *Deformación plástica de los materiales: La forja y la laminación en caliente*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
8. Ekelund, S. (1933). *Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling of Steel*. Steel. 93(1). 27-29. E.U.
9. Enríquez, B.J.L., De Elío, S., Fernández, S.D. & Tremps G.E. (2010). *Laminación. Monografía (manual)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
10. Espinosa Brenes, L.J. (2005). *Guía de diseño para estructura de acero laminados en caliente: Método de factores de carga y resistencia*. (Informe de trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.
11. Groover, M.P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*. Pearson Education, México.
12. Kalpakjian, S. & Schmid, S.R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Education, México.
13. Kim, S. Y., & Im, Y. T. (2002). *Three-dimensional finite element analysis of non-isothermal shape rolling*. Journal of Materials Processing Technology, 127(1), 57-63. South Korea.
14. Komori, K., & Koumura, K. (2000). *Simulation of deformation and temperature in multi-pass H-shape rolling*. Journal of materials processing technology, 105(1), 24-31. Japan.





15. Ortiz, P.A., Ruiz C.O. & Ortiz V.J. A. (2013). *Modelado de procesos de manufactura*. UNAM, México.
16. Qingqiang, H., Jia, S., Chengxin, Y., Junyou, Z., & Zongbo, Z. (2013). *Thermo-mechanical modeling and simulation of microstructure evolution in multi-pass H-shape rolling*. Finite Elements in Analysis and Design, 76, 13-20. China.
17. Saucedo, A. (2013). *Simulación de la colada gravitacional mediante paquetería de elemento finito*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería UNAM, México.
18. Schey, J.A. (2002). *Procesos de manufactura*. McGraw Hill, México.
19. Shida, S. (1969). *Empirical formula of flow-stress of carbon steels (resistance to deformation of carbon steels at elevated temperature, 2nd Report)*, J. Japan. Soc. Technol. Plastic, 10, 610–617.
20. Shinokura, T. & Takai, K. (1982). *A new method for calculating spread in rod rolling*, J. Appl. Metalwork, 2, 147–160. China.
21. Simulia Dassault Systemes, Coupled Eulerian Lagrangian Modelling Techniques, Lecture 4, 2010.
22. Simulia Dassault Systemes, Abaqus/Explicit: Advanced Topics; Managing large models, Lecture 10, 2005.
23. World Steel Association & MATTER, The University of Liverpool © 2002-2012 World Steel Association. (2012). *Procesos de laminación en caliente*. Recuperado el 2 de julio de 2014, de <http://www.steeluniversity.org>
24. Xu, X. D., Bai, J. L., Wang, B. X., Liu, X. H., & Wu, D. (2006). *Research on flange spread of H-beam on universal mill*. Journal of Iron and Steel Research, International, 13(1), 27-39. China.
25. Yu, H. L., Liu, X. H., Li, C. S., Lan, H. F., & Wang, G. D. (2009). *Research on the behavior of transversal crack in slab V–H rolling process by FEM*. Journal of Materials Processing Technology, 209(6), 2876-2886. China.