

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Simulación de Laminado en Caliente para el Acero SS410**

**Andrés Alejandro Mata Ortiz**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de integración curricular presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 20 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Simulación de Laminado en Caliente para el Acero SS410**

**Andrés Alejandro Mata Ortiz**

**Calificación:**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Edison Bonifaz, PhD.**

**Firma del profesor:**

---

**Nombre del profesor, Título académico**

**Marco León, M.Sc.**

**Firma del profesor:**

---

Quito, 20 de diciembre de 2019

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Andrés Alejandro Mata Ortiz

Código:

00107697

Cédula de identidad:

1714783790

Lugar y fecha:

Quito, 20 de diciembre de 2019

## AGRADECIMIENTOS

Con inmensa gratitud a todos los que inspiraron este trabajo.

A mi abuelo, Víctor Ortiz, de quien herede el arte de tener paciencia y continuar sin importar el camino ni las circunstancias.

A mis padres, Fausto e Ivonne, por todo el cariño y apoyo que me han brindado durante mi vida.

A mis tíos y primos, en especial, Francisco Mata, quien me enseñó a poner en práctica mis conocimientos.

A mis profesores que me enseñaron a querer aún más la carrera, y que lo difícil no es sinónimo de imposible.

## RESUMEN

En el siguiente trabajo se desarrolló un modelo de laminación en caliente del acero SS410, partiendo de las relaciones geométricas que existen entre el coeficiente de fricción y el espesor total reducido por el sistema. Este debe reducir una plancha de 40 mm de espesor a 30mm. Bajo esta condición y las ecuaciones de la literatura se encuentra un coeficiente de fricción de 0.4, el cual establece un tamaño de rodillo de 63 mm y un ángulo de ataque de 28.1 °. Además, se averiguan las propiedades termo-mecánicas y termo-físicas del acero a 1100 °C. A partir de este modelo se hacen dos simulaciones para encontrar esfuerzos y deformaciones localizados, fuerza de laminado y potencia en cada una de las variaciones indicadas a continuación. La primera varía las velocidades de laminación a 1.0, 1.2 y 1.4 m/s y mantiene constante el coeficiente de fricción de 0.4. A partir de esta se determina cual velocidad es crítica, que para el caso es 1.0 m/s ya que presenta adherencia. En una segunda simulación se utiliza esta velocidad como constante y se varían los coeficientes de fricción a 0.2, 0.3 y 0.5. Comparando los resultados, se obtiene que la combinación óptima es la velocidad de laminación de 1.2 m/s con coeficiente de fricción de 0.4 con una potencia de 0.426 MW, ya que para esta combinación se produce un espesor de 31.14 mm y es el más cercano al deseado (30 mm), y además evita la condición de adherencia.

*Palabras clave:* Acero inoxidable SS410, laminación en caliente, elementos finitos, coeficiente de fricción, velocidades de laminación, adherencia, parámetros óptimos.

## ABSTRACT

In the following work a hot rolling model of SS410 steel was developed, based on the geometric relationships that exist between the coefficient of friction and the total thickness reduced by the system. This should reduce a plate from 40mm thick to 30mm. Under this condition and the equations in the literature is a coefficient of friction of 0.4, which establishes a roller size of 63 mm and an angle of attack of 28.1 °. In addition, the thermo-mechanical and thermo-physical properties of steel at 1100 ° C are ascertained. From this model, two simulations are made to find localized forces and deformations, rolling force and power in each of the variations indicated below. The first varies the rolling speeds at 1.0, 1.2 and 1.4 m / s and keeps the friction coefficient of 0.4 constant. From this it is determined which speed is critical, which in the case is 1.0 m / s since it presents sticking friction condition. In a second simulation, this speed is used as a constant and the coefficients of friction are varied to 0.2, 0.3 and 0.5. Comparing the results, it is obtained that the optimal combination is the lamination speed of 1.2 m / s with a friction coefficient of 0.4 with a power of 0.426 MW, since for this combination a thickness of 31.14 mm is produced and is the closest to the desired one (30 mm), and also avoids the sticking condition.

*Key words:* SS410 stainless, hot rolling, finite elements, friction coefficient, rolling speeds, adhesion, optimal parameters.

## TABLA DE CONTENIDOS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2. MÉTODOS .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2.1. Investigaciones Teóricas .....</b>  | <b>14</b> |
| 2.1.1. Relaciones geométricas en el laminado plano.....   | 14        |
| 2.1.2. Coeficientes de fricción y velocidades de laminación. ....                                   | 16        |
| 2.1.3. Adherencia.....  | 17        |
| 2.1.4. Propiedades termo-físicas y termo-mecánicas del acero SS410.....                             | 18        |
| <b>2.2. Modelo de simulación.....</b>   | <b>19</b> |
| 2.2.1. Consideraciones generales. ....  | 19        |
| 2.2.1. Condiciones de borde y condiciones iniciales en Abaqus. ....                                 | 21        |
| <b>2.3. Procedimientos para selección de modelo óptimo. ....</b>                                    | <b>22</b> |
| <b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>3.1. Coeficientes de fricción y parámetros geométricos del modelo. ....</b>                      | <b>24</b> |
| <b>3.2. Simulación 1: Coeficiente de fricción constante y variación de velocidades. ....</b>        | <b>25</b> |
| <b>3.3. Simulación 2: velocidad crítica constante y variación de coeficientes de fricción. ....</b> | <b>31</b> |
| <b>3.4. Discusiones. ....</b>   | <b>36</b> |
| <b>4. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>Anexo A: Esfuerzos y deformaciones a diferentes tasas de deformación<br/>(1100 °C) .....</b>     | <b>46</b> |

**ÍNDICE DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Propiedades termo-físicas y termo-elásticas del acero SS410.....                                  | 18 |
| <b>Tabla 2.</b> Coeficientes de fricción a diferentes velocidades de laminación.....                              | 24 |
| <b>Tabla 3.</b> Resumen de resultados de las variaciones de velocidad para cuando $\mu=0.4$ . ...                 | 30 |
| <b>Tabla 4.</b> Resumen de resultados de las variaciones del coeficiente de fricción para cuando $v=1.0$ m/s..... | 35 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Proceso de laminado para acero SS410.....   | 12 |
| <b>Figura 2.</b> Modelo de proceso de laminación plana.....  | 14 |
| <b>Figura 3.</b> Parámetros de laminación.....   | 15 |
| <b>Figura 4.</b> Curvas esfuerzo-deformación a diferentes tasas de deformación.....                  | 19 |
| <b>Figura 5.</b> Modelo del sistema de laminación implementado en Abaqus.....                        | 21 |
| <b>Figura 6.</b> Diagrama de proceso de simulación. ....   | 23 |
| <b>Figura 7.</b> Esfuerzos totales cuando $\mu=0.4$ es constante (simulación 1).....                 | 25 |
| <b>Figura 8.</b> Deformaciones equivalentes cuando $\mu=0.4$ es constante (simulación 1)... ..       | 26 |
| <b>Figura 9.</b> Piezas deformadas cuando $\mu=0.4$ es constante (simulación 1).....                 | 27 |
| <b>Figura 10.</b> Fuerzas de laminación para simulación 1. ....                                      | 28 |
| <b>Figura 11.</b> Evolución de esfuerzos localizados en la simulación 1. ....                        | 29 |
| <b>Figura 12.</b> Evolución de deformaciones localizadas en la simulación 1. ....                    | 29 |
| <b>Figura 13.</b> Esfuerzos totales cuando $v=1.0$ m/s es constante (simulación 2) .....             | 31 |
| <b>Figura 14.</b> Deformaciones equivalentes cuando $v=1.0$ m/s es constante<br>(simulación 2) ..... | 32 |
| <b>Figura 15.</b> Piezas deformadas cuando $v=1.0$ m/s es constante (simulación 2). ....             | 33 |
| <b>Figura 16.</b> Fuerzas de laminación para simulación 2. ....                                      | 34 |
| <b>Figura 17.</b> Evolución de esfuerzos localizados en la simulación 2.....                         | 34 |
| <b>Figura 18.</b> Evolución de deformaciones localizadas en la simulación 1. ....                    | 35 |
| <b>Figura 19.</b> Convergencia para coeficiente de fricción (ecuaciones 6 y 7). ....                 | 36 |
| <b>Figura 20.</b> Relación entre esfuerzo de fluencia y las constantes C y<br>m.....                 | 38 |
| <b>Figura 21.</b> Esfuerzo de fluencia y velocidades de deformación (simulación 1 y 2) .....         | 38 |

## 1. INTRODUCCIÓN

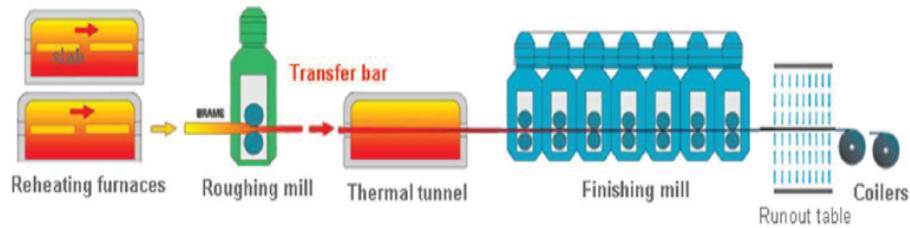
El proceso de deformar plásticamente un material mediante rodillos se conoce como laminado. Los rodillos deforman el material mediante un esfuerzo de compresión debido a la acción de apriete ejercida por los mismos, además de un esfuerzo cortante superficial que proviene de la fricción entre el rodillo y el metal. (Dieter and Bacon, 1988). Esta es una de las tecnologías más importantes para la fabricación de planchas, ya que puede eliminar defectos de contracción e inclusión del proceso de fundición; además sus productos tienen las ventajas de tener una estructura compacta, granos finos y buenas propiedades mecánicas (Hao, Gao, & Wu, 2019). Los equipos de laminación requieren un alto costo de inversión por lo que, en la industria, se utiliza para la producción de grandes cantidades de piezas estándar. Existen dos tipos de laminación de acuerdo con la temperatura de trabajo: laminado en frío y laminado en caliente.

Cuando la deformación de la pieza de trabajo se obtiene a temperaturas mayores a la temperatura de recristalización del material, el proceso se denomina laminado en caliente; caso contrario, se denomina laminado en frío (Callister & Rethwisch, 2013a). La línea divisoria entre ambos tipos de proceso se expresa frecuentemente en términos del punto de fusión del metal, que por lo usual es de  $0.3T_m$ , donde  $T_m$  es el punto de fusión del metal trabajado (temperatura absoluta). En la práctica, la pieza de trabajo usualmente es calentada a temperaturas por encima de  $0.5T_m$  (Groover, 2013a). Esto tiene la ventaja de permitir reducciones significativas de espesor sin dañar la pieza de trabajo y disminuir las fuerzas en los rodillos. (Nioi et al., 2019). El proceso empieza con un lingote de acero fundido recién solidificado. Aún caliente, el lingote se coloca en un horno donde permanece durante muchas horas, hasta alcanzar una temperatura uniforme en toda su extensión, para que pueda fluir

consistentemente durante el laminado. Para el acero, la temperatura de laminación es alrededor de  $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ . (Groover, 2013b).

Los aceros inoxidable también se procesan por laminación. El acero inoxidable martensítico AISI 410 (o SS410) ha surgido como una alternativa de bajo costo para aplicaciones que requieren de buena mecánica resistencia y resistencia a la corrosión. Este acero puede usarse en la industria de extracción de petróleo y gas natural, álabes de turbina, compresores, varillas, válvulas, ejes y rodamientos (Rodríguez, Leal, & Reis, 2017). Su elemento de aleación predominante es el cromo, cuya concentración se requiere que tenga al menos 11% en peso del mismo. En específico, el acero SS410 contiene 0.70 %C, 12.5 % Cr y 1.0 Mn. (Callister & R., 2013b).

Tiras de este acero inoxidable SS410 se obtienen a partir de lingotes que provienen de la colada continua; al inicio, miden de 2 metros de ancho, 0.2 m de espesor y 18 m de largo. Luego, se vuelven a calentar durante 3 horas hasta temperaturas alrededor de  $1250\ ^\circ\text{C}$  y se transforman en subproductos (barras de transferencia) al reducir su espesor de 200 mm a 40 mm en 5 a 7 pasadas sucesivas en un molino de desbaste (roughing mil). Finalmente, las barras se recalientan a través de un túnel térmico (thermal tunnel) y su espesor se reduce a 3 mm en un molino de acabado (finishing mill) de 7 soportes. La temperatura de las barras de transferencia es alrededor de  $1100\ ^\circ\text{C}$  a la entrada del molino de acabado y disminuye a  $950\ ^\circ\text{C}$  a la salida. (Dubar & Dubar, 2014a). Las secciones del proceso de muestran en la figura 1.



**Figura 1. Proceso de laminado para acero SS410.** Se muestran las secciones del proceso completo hasta la transformación de tiras. (Dubar & D., 2014b).

En Ecuador, este tipo de acero inoxidable no se produce ni se importa con frecuencia. Sin embargo, un estudio de los parámetros de laminación para este acero resulta útil para entender cómo se relacionan y cómo afectan al producto de laminado, aprovechando la disponibilidad de información sobre las propiedades termo-físicas y termo-mecánicas publicadas por Mukherjee et al. (2018) y por Rodríguez et al. (20147) del acero ss410 en rangos altos de temperatura. Además, Dar, Meakin y Aspden (2002), señalan que, por lo general, este tipo de análisis raramente se realiza de manera integral o sistemática, y poco se intenta evaluar la sensibilidad del modelo a la variación en los parámetros de entrada o posibles interacciones entre ellos. La obtención de una combinación óptima de estos parámetros mediante un estudio sistemático de sus variaciones en condiciones reales de trabajo resulta útil para el diseño y aplicación del sistema. Una forma eficiente de hacerlo es mediante una simulación de elementos finitos, ya que permite explorar en detalle los efectos de variar los parámetros de laminación sobre los esfuerzos y deformaciones del material.

En la teoría de laminación, se sabe que existe una relación entre la geometría del rodillo, el coeficiente de fricción y la fuerza de laminación. Como antecedente, un estudio hecho por Dubar & Dubar (2014) investiga la relación de contacto entre la pieza y los rodillos para diferentes temperaturas de laminado en aceros inoxidables. Sin embargo, este estudio se ocupa únicamente de la calidad superficial del producto, pero no sugiere un modelo óptimo de laminación para obtenerla. Además, en estudios hechos por Shahani, et al.

(2009) y Motallebi (2010) para una aleación de aluminio 5083, se encontró que la fuerza de laminación depende de varios parámetros tales como la temperatura, el radio del rodillo y la velocidad de laminación, concluyendo que, a determinada temperatura, la fuerza de laminación aumenta proporcionalmente con el radio del rodillo. La misma relación ocurre con la velocidad. Sin embargo, no queda claro que combinación de parámetros (velocidad de laminado, tamaño de rodillo y coeficiente de fricción) produce un sistema de laminación óptimo.

El objetivo de este estudio consiste en obtener un modelo óptimo de simulación por elementos finitos en Abaqus del molino de acabado (figura 1) mediante la evaluación sistemática de la variación de los parámetros del proceso de laminado en caliente del acero SS 410 y sus efectos sobre los esfuerzos, deformaciones, fuerza y potencia de laminación. El sistema deberá reducir el espesor de una plancha de acero SS410 de 40 mm a 30 mm a 1100 °C . Se obtienen diferentes coeficientes de fricción mediante los modelos investigados en la literatura para el laminado en caliente. Luego, a partir de estas y de su relación con la geometría del rodillo, se encuentra un tamaño para el modelo. Se investigan las propiedades termo-físicas y termo-mecánicas en los rangos elásticos y plásticos del acero SS410 a la temperatura de laminación. Una vez establecido el modelo de simulación, se determinan los esfuerzos y deformaciones localizadas para observar su evolución durante la laminación, así como la fuerza y potencia del sistema, a tres diferentes velocidades de laminación y coeficientes de fricción. Se comparan los resultados y se discute cuál es la combinación óptima de los parámetros de laminación del acero en cuestión.

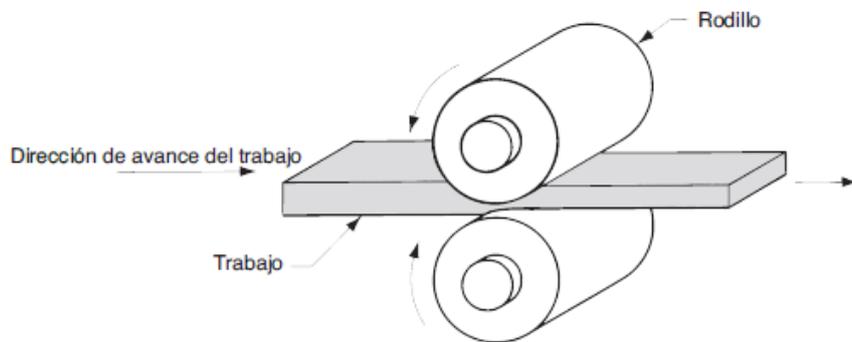
## 2. MÉTODOS

### 2.1. Investigaciones Teóricas

#### 2.1.1. Relaciones geométricas en el laminado plano.

El proceso de laminado que se pretende simular se muestra en la figura 2.

Específicamente, es un modelo de laminado plano. Este tipo de sistema generalmente es utilizado para reducir la sección transversal rectangular.



**Figura 2. Modelo de proceso de laminación plana.** Se muestra la dirección de avance y el sentido de giro de los rodillos. (Groover, 2007a).

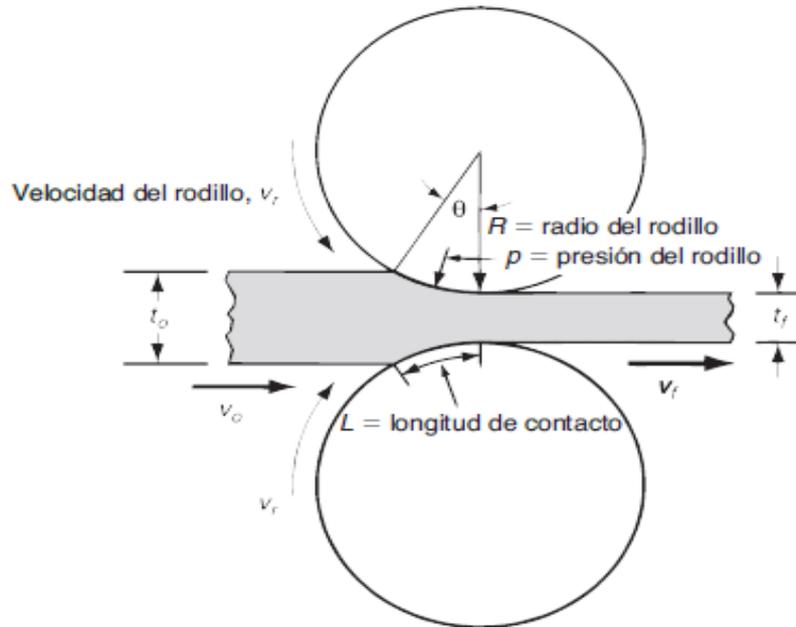
La relación entre el espesor final e inicial de la pieza de trabajo, el radio del rodillo y el coeficiente de fricción se encuentra en la ecuación 1 y se conoce como *draft* máximo ( $d_{max}$ ). Esta cantidad indica el espesor máximo reducido para un coeficiente de fricción y tamaño de rodillo dado (Groover, 2013c). Aquí,  $t_0$  y  $t_f$  son los espesores inicial y final, respectivamente,  $\mu$  es el coeficiente de fricción y R el radio de rodillo.

$$d_{max} = \mu^2 R = t_0 - t_f \quad (1)$$

Los rodillos entran en contacto con la pieza a lo largo de un arco definido por el ángulo  $\theta$ , y se conoce como ángulo de ataque. La condición para que la pieza de trabajo

pueda ser remordida por los rodillos está dada por la ecuación 2. Esta relación permite determinar el ángulo mencionado (figura 3).

$$\mu = \tan \theta \quad (2)$$



**Figura 3. Parámetros de laminación.** Vista lateral del sistema de laminación y sus parámetros (Groover, 2007b).

El arco de contacto  $L$  suele aproximarse mediante la ecuación 3. Sin embargo, en un estudio sobre laminación en caliente (Li, Wang, Liu, Ruan, & Xu, 2017), se muestra una ecuación más precisa (ecuación 4).

$$L \approx \sqrt{R(d_{max})} \quad (3)$$

$$L = \sqrt{\frac{R(d_{max}) - (d_{max})^2}{4}} \quad (4)$$

Finalmente, la potencia  $P$  (J/s) está dada por la ecuación 5, la cual representa la potencia total requerida por ambos rodillos.  $N$  es la velocidad angular de los rodillos (rpm) y  $F$  es la fuerza de laminación (Newton).

$$P = 2\pi NFL \quad (5)$$

### 2.1.2. Coeficientes de fricción y velocidades de laminación.

El modelo depende del coeficiente de fricción. A partir de él se determinará el radio de los rodillos, así como el ángulo de ataque. Según Tolcha, (2018), la magnitud de los coeficientes de fricción se ha caracterizado de tres formas: el coeficiente de fricción utilizada como constante (fricción de Coulomb), el coeficiente de fricción que considera constante la fricción en la brecha rodante (y está en función de la velocidad de rodamiento) (ecuación 6) y la tercera que considera eventos térmicos tales como la transferencia de calor y otros parámetros relacionados (ecuación 7).

Los coeficientes de fricción típicos para procesos de laminación realizados a temperatura superiores a las temperaturas de recristalización del material, según Groover (2013d), son de 0.4 y 0.5. (coeficientes de Coulomb). Los otros tipos de fricción se muestran a continuación:

$$\mu = -0.607 - 0.13V_r + 1.256 \quad (6)$$

$$\mu = 1.05 - 0.0005T - 0.056V_r \quad (7)$$

En las ecuaciones 6 y 7,  $T$  esta en °C y  $V_r$  está en m/s. Por otro lado, se sabe que, para un proceso de colada continua de lingotes de acero, las velocidades de salida de los lingotes

solidificados son de 1.0, 1.2 y 1.4 (m/s). (Maurya & Kumar, 2015). Estas representan las velocidades iniciales del proceso de laminado en caliente. Además, existe un punto en donde la velocidad del trabajo  $V_0$  es igual a la velocidad del rodillo  $V_r$ . Este se conoce como el punto neutro o punto de no deslizamiento. (Véase figura 3).

### 2.1.3. Adherencia.

El laminado en caliente se caracteriza por una condición llamada adherencia, en la cual la superficie del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre a menudo en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de este fenómeno es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo  $V_r$ ; por ende, la deformación de la superficie es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos. (Groover, 2013e). Desde el punto de los esfuerzos, la adherencia ocurre cuando el esfuerzo cortante por fricción  $\tau_{fric}$  supera al esfuerzo de flujo cortante  $\tau_{flow}$  que aparece durante la deformación de la pieza. Widerøe & Welo (2012) señalan la existencia de un modelo que determina el esfuerzo cortante por fricción y relaciona al coeficiente de fricción y la presión normal  $P$  ejercida por la herramienta. Esta se conoce como la relación de Amonton-Coulomb (ecuación 8). Por otro lado, el esfuerzo de flujo cortante se puede estimar con el criterio de Tresca (fricción constante), que relaciona al esfuerzo de fluencia de von Mises  $S_y$  (ecuación 9).

$$\tau_{fric} = \mu P \quad (8)$$

$$\tau_{flow} = \frac{S_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

## 2.1.4. Propiedades termo-físicas y termo-mecánicas del acero SS410.

### 2.1.4.1. Propiedades termo-físicas y termo-elásticas.

Las propiedades físicas y mecánicas del acero SS410 son necesarias para la simulación del laminado. En un estudio reciente sobre manufactura aditiva (Mukherjee et al., 2018), se publican las propiedades termo físicas y termo-elásticas para este acero en particular, a diferentes temperaturas. En la tabla 1, se muestran únicamente las propiedades útiles.

**Tabla 1.** Propiedades termo-físicas y termo-elásticas del acero SS410.

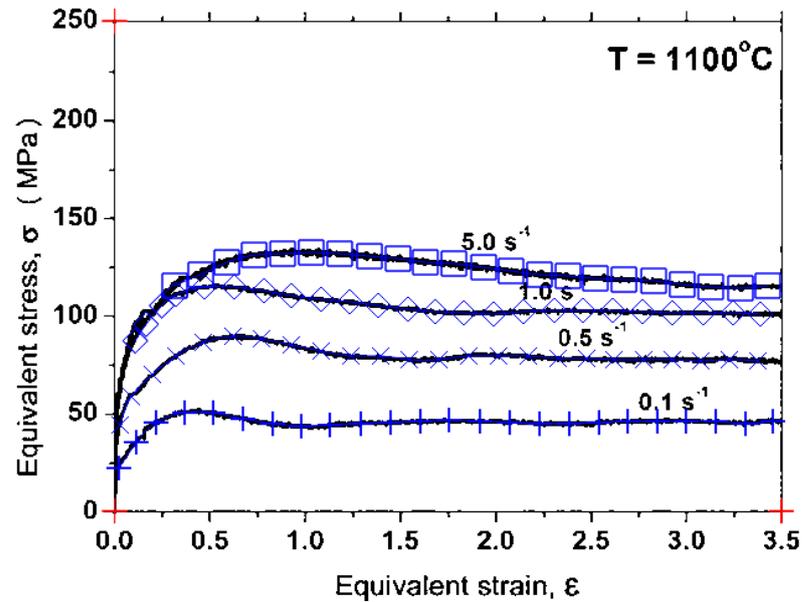
|  |           |
|--|-----------|
| Conductividad térmica (W/m K)              | 31.16     |
| Calor específico (J/kg K)                  | 494.24    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )              | 7160      |
| Coefficiente de expansión volumétrica (/K) | 24.08E-06 |
| Módulo de Young (GPa)                      | 102.03    |
| Coefficiente de Poisson                    | 0.3       |

Las propiedades son válidas para una temperatura de 1100 °C (1373.15K). La conductividad térmica y calor específico, están dadas por  $14.0 + 0.0125T$  y  $447.2 + 0.04T - 4.18 \times 10^{-6}T^2$ , respectivamente. Las demás propiedades se encontraron por interpolación lineal. El coef. de Poisson no varía con la temperatura.

### 2.1.4.2. Propiedades termo-plásticas

Las propiedades termo-plásticas en la temperatura de interés se extraen de las curvas de esfuerzo-deformación presentada por Rodrigues et al. (2017). Hay una curva para cada tasa de deformación (figura 4). La tasa de deformación media  $\dot{\epsilon}_m$  de cada modelo se puede estimar mediante la ecuación 10, desarrollada por Aghasafari et al. (2014). De esta forma se extraen los valores de las curvas mediante el uso del software *Engauge Digitalizer* versión 12.0, que permite extraer datos numéricos a partir de imágenes o gráficos. Luego se extrapolan los valores de las curvas respecto a la tasa de deformación obtenida. Todos los valores obtenidos se muestran en el anexo A.

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{\pi V_r}{30R} \frac{\sqrt{Rr}}{t_0} \frac{4-3r}{(2-r)^2} \quad (10)$$



*Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación a diferentes tasas de deformación. Se muestran marcados los puntos considerados para la obtención de valores. (Rodrigues et al., 2017).*

## 2.2. Modelo de simulación

Para realizar la simulación de elementos finitos se utilizará software Abaqus versión 6.14. Las consideraciones tomadas para implementar el modelo en el mismo se detallan en las subsecciones siguientes.

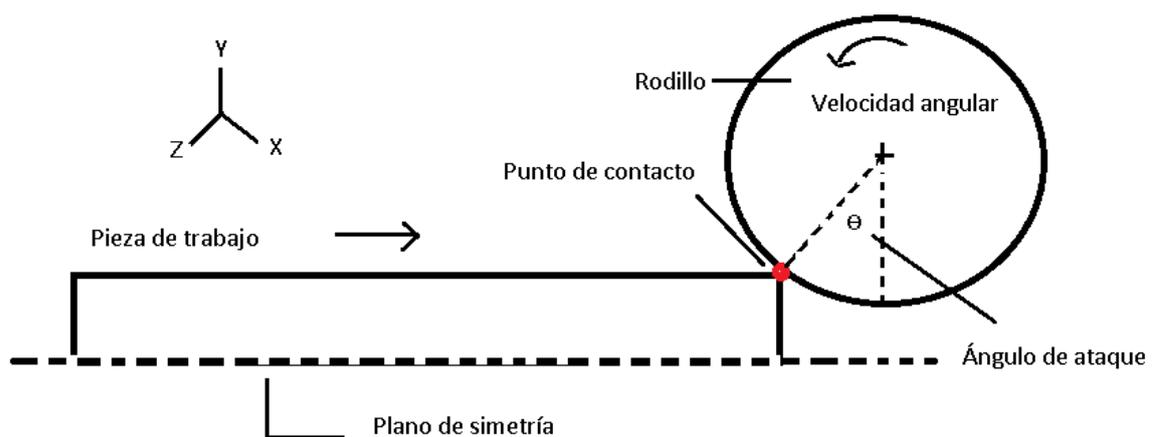
### 2.2.1. Consideraciones generales.

Las consideraciones para implementar el modelo en Abaqus descrito en la sección anterior se resumen a continuación:

- El modelo implementado es *quarter symmetric model* (figura 5). Este tipo de modelo permite al usuario visualizar los resultados aprovechando la simetría del sistema (Abaqus Manual, 2019a).
- La geometría de la pieza de trabajo se selecciona a partir de las dimensiones referenciales de los subproductos utilizados en la industria para los procesos de laminación. Para el modelo, se utilizan las dimensiones típicas de una plancha, cuya sección rectangular es de 250 mm de ancho y 40 mm, con un largo genérico de 300 mm. En el software, se considera como un sólido deformable.
- El sistema de laminación reduce el espesor de la plancha de 40 mm a 30 mm en una sola pasada. En otras palabras, el draft es de 10 mm (ecuación 1).
- El proceso de laminación implementado es cuasi-estático. Esto es válido ya que las velocidades de trabajo son relativamente bajas, alrededor de 1.0 m/s (sección 2.1.2). Por lo tanto, los efectos de la inercia en el sistema son despreciables. (Abaqus, 2019b).
- El radio del rodillo para cada modelo se determina en función de los coeficientes de fricción y del draft mencionado (ecuación 1). Los coeficientes de fricción típicos de Coulomb (sección 2.1.2), así como los que dependen de la temperatura y de la velocidad de trabajo (ecuaciones 6 y 7) son utilizados. Al evaluarlos, se obtienen coeficientes de fricción válidos, que son 0.4 y 0.5. En el software, se determina como un cuerpo rígido analítico (*analytic rigid part*). Este modelo es útil para estudiar el contacto entre el rodillo y la pieza. Además, reduce el tiempo de computo. (Abaqus Manual, 2019c).
- El ángulo de ataque (ecuación 2) se utiliza para determinar la posición del punto de contacto entre la pieza y el rodillo. (Figura 4).

- La velocidad de trabajo es igual a la velocidad del rodillo. No se consideran oscilaciones durante el proceso.
- Para asegurar datos precisos, se utiliza un *mass scaling factor* de 2758.5. Además de un control por *stiffness* por *hourglassing* para el tipo de elementos. Esto permite disminuir los tiempos de computo al mismo tiempo que asegura datos confiables para problemas de contacto para tamaños de elementos pequeños, como el laminado. (Abaqus Manual, 2019b).
- La temperatura de la pieza de trabajo es uniforme y está a 1100 °C, de acuerdo con las propiedades termo-físicas y termo-mecánicas mencionadas en la sección 2.1.3. No se considera la transferencia de calor.
- Se utilizan las unidades del sistema internacional.

### 2.2.1. Condiciones de borde y condiciones iniciales en Abaqus.



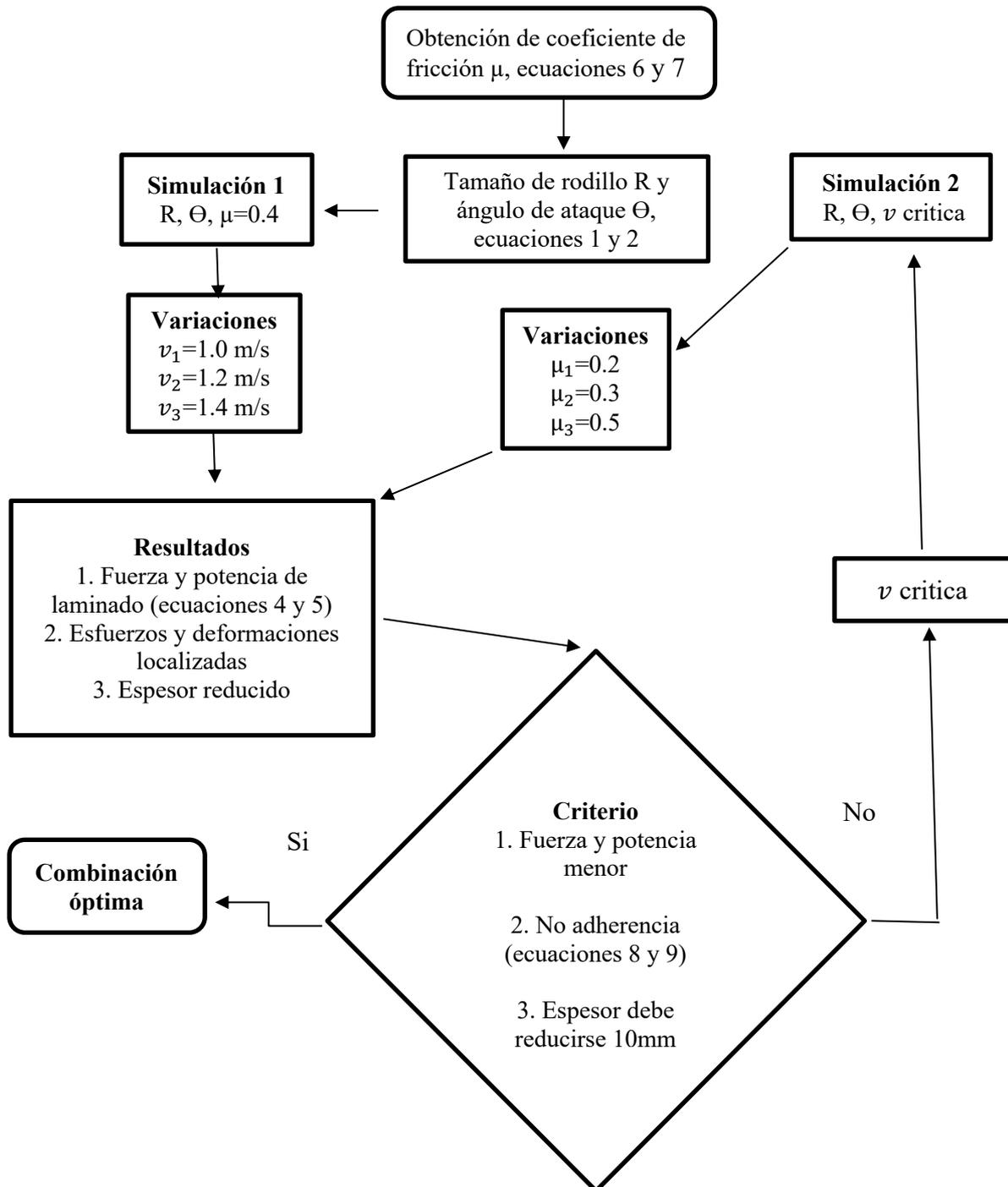
**Figura 5. Modelo del sistema de laminación implementado en Abaqus.** Se muestra la pieza de trabajo y el punto de contacto con el rodillo, así como el ángulo de ataque. El sentido de las velocidades y el marco de referencia también se muestran

- Se establece la simetría del modelo en el plano XY. (Figura 5).
- Se hace un *constrained*  $U_2=0$  en el plano XZ. Esto indica que no hay velocidades en el eje Y (no hay oscilaciones).
- El rodillo solo es capaz de rotar en el eje Z.
- Se aplica una condición inicial a la pieza de trabajo y solo se permite que se desplace en el eje X.
- Implícitamente, se aplica una condición de temperatura inicial a 1100 °C, ya que todas las propiedades termo-mecánicas introducidas pertenecen únicamente a esta temperatura.

### 2.3. Procedimientos para selección de modelo óptimo.

Como se mencionó en la sección anterior, se establecerá el modelo de laminado a partir de las ecuaciones 6 y 7 para coeficientes de fricción. El resultado determinará el tamaño del rodillo y el ángulo de ataque del sistema (ecuaciones 1 y 2, respectivamente). Con este se realizarán un total de 6 simulaciones, una por cada variación, de donde se obtienen las fuerzas y potencias de laminación (ecuaciones 4 y 5), la evolución de los esfuerzos y deformaciones localizadas en el primer nodo de contacto y se comprueba la reducción esperada de la pieza. En el primer conjunto de simulaciones, varía únicamente la velocidad de laminado en los rangos típicos: 1.0, 1.2 y 1.4 m/s. Los demás parámetros permanecen constantes. Se evalúan los resultados de las simulaciones y se determina la velocidad crítica, es decir, la que presente mayores distorsiones o no cumpla con el criterio descrito más adelante. En el segundo set de simulaciones, la velocidad mencionada se mantiene constante al igual que los demás parámetros, excluyendo los coeficientes de fricción, los cuales varían tomándose uno relativamente bajo de 0.2, uno intermedio 0.3 y uno elevado, 0.5, y se vuelven a comparar los resultados. Se considera que la combinación

óptima de parámetros es la que consigue superar el esfuerzo de fluencia del material (55.17 MPa), que evite la adherencia, la que tenga menor fuerza y potencia de laminado y que los espesores de la pieza se reduzcan 5 mm por lado (10 mm en total). En la figura 6 se muestra el diagrama de todo el proceso.



**Figura 6. Diagrama de proceso de simulación.** Se describen los pasos del modelado, variaciones en la simulación y criterio de selección del modelo óptimo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Coeficientes de fricción y parámetros geométricos del modelo.

Para la ecuación 6 de coeficiente de fricción que solo depende de la velocidad de laminación se obtienen diferentes coeficientes de fricción. Lo mismo ocurre cuando se usa la ecuación 7 la cual, además de la velocidad, depende de la temperatura (1100 °C). Esta última ecuación se considera la más exacta, ya que considera la temperatura. Los resultados de la tabla 2 muestran que el coeficiente de fricción está alrededor de 0.4. Por tanto, a partir de este valor se encuentra el radio del rodillo y el ángulo de ataque del sistema, los cuales son 63 mm y 21.80 °. Con esto se puede encontrar las velocidades angulares del rodillo a diferentes velocidades de laminación (mostrados en la tabla 2) y el arco de contacto (ecuación 4), que resulta ser de 11.5 mm.

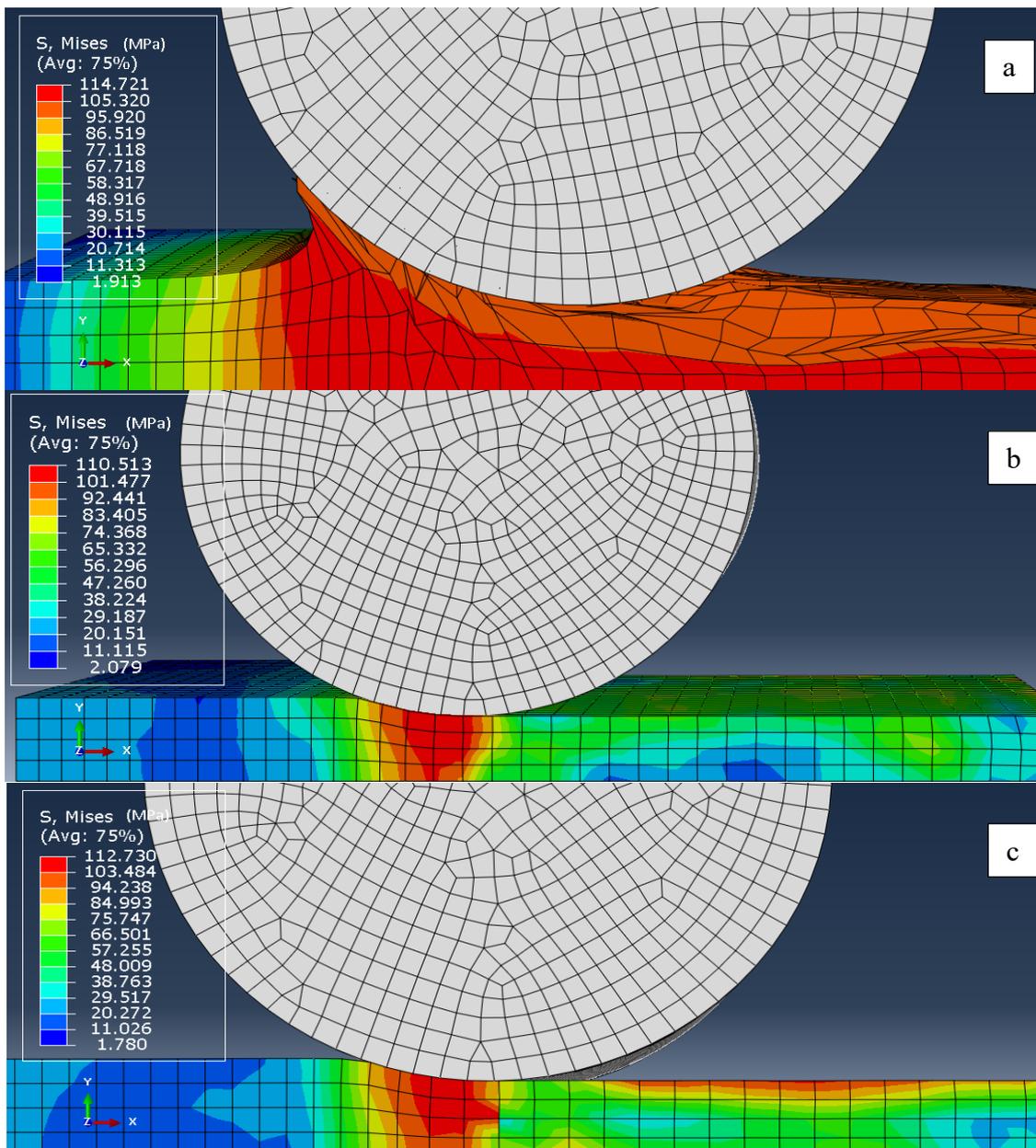
**Tabla 2.** Coeficientes de fricción a diferentes velocidades de laminación.

| <b>V (m/s)</b> | <b>N, (rad/s)</b> | <b>μ (ecuación 6)</b> | <b>μ (ecuación 7)</b> |
|----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.0            | 15.87             | 0.519                 | 0.444                 |
| 1.2            | 19.05             | 0.467                 | 0.432                 |
| 1.4            | 22.22             | 0.430                 | 0.421                 |

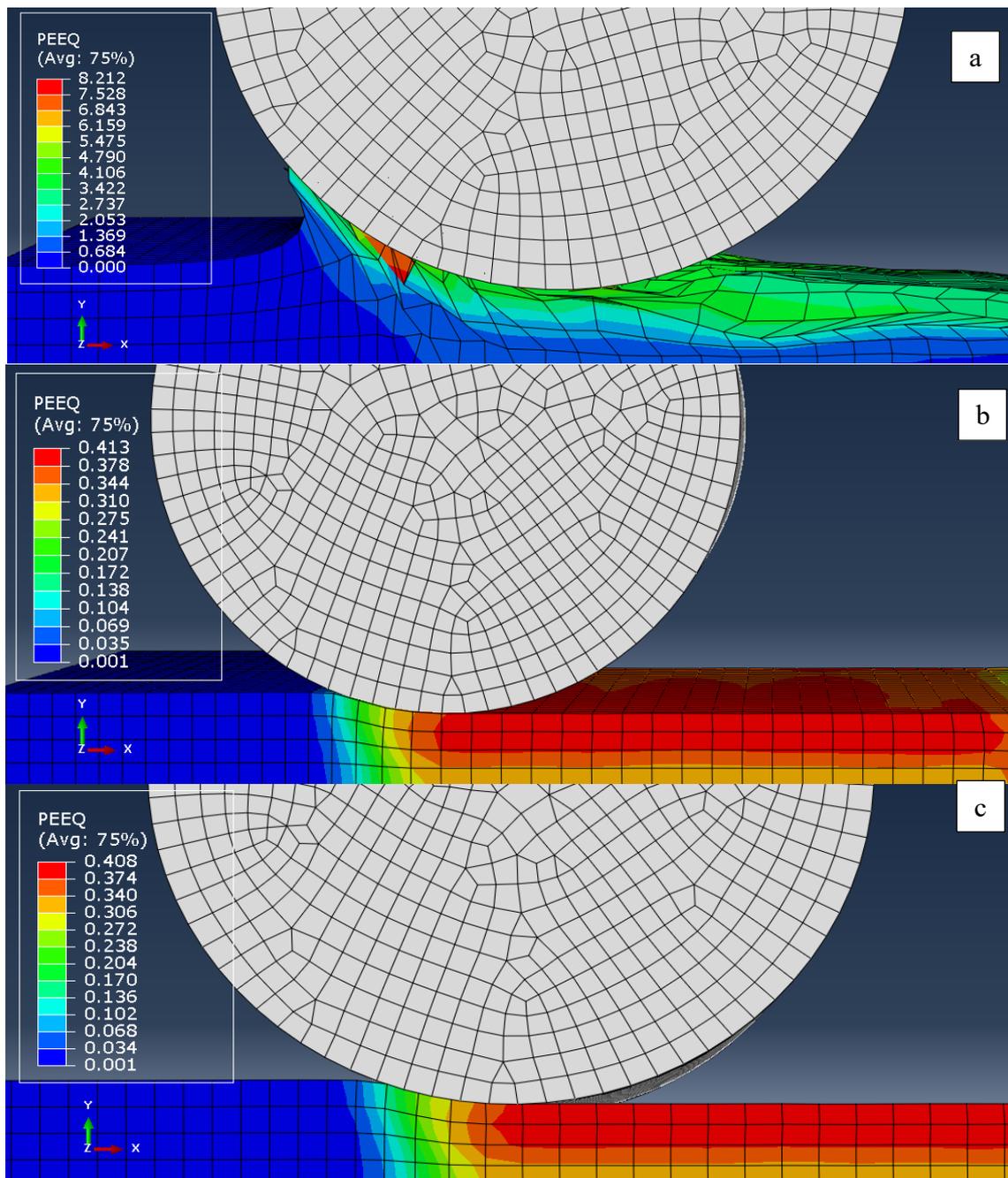
Los coeficientes de fricción de la ecuación 6 solo dependen de la velocidad de laminación, mientras que los de la ecuación 7 dependen de la temperatura, 1100 °C.

### 3.2. Simulación 1: Coeficiente de fricción constante y variación de velocidades.

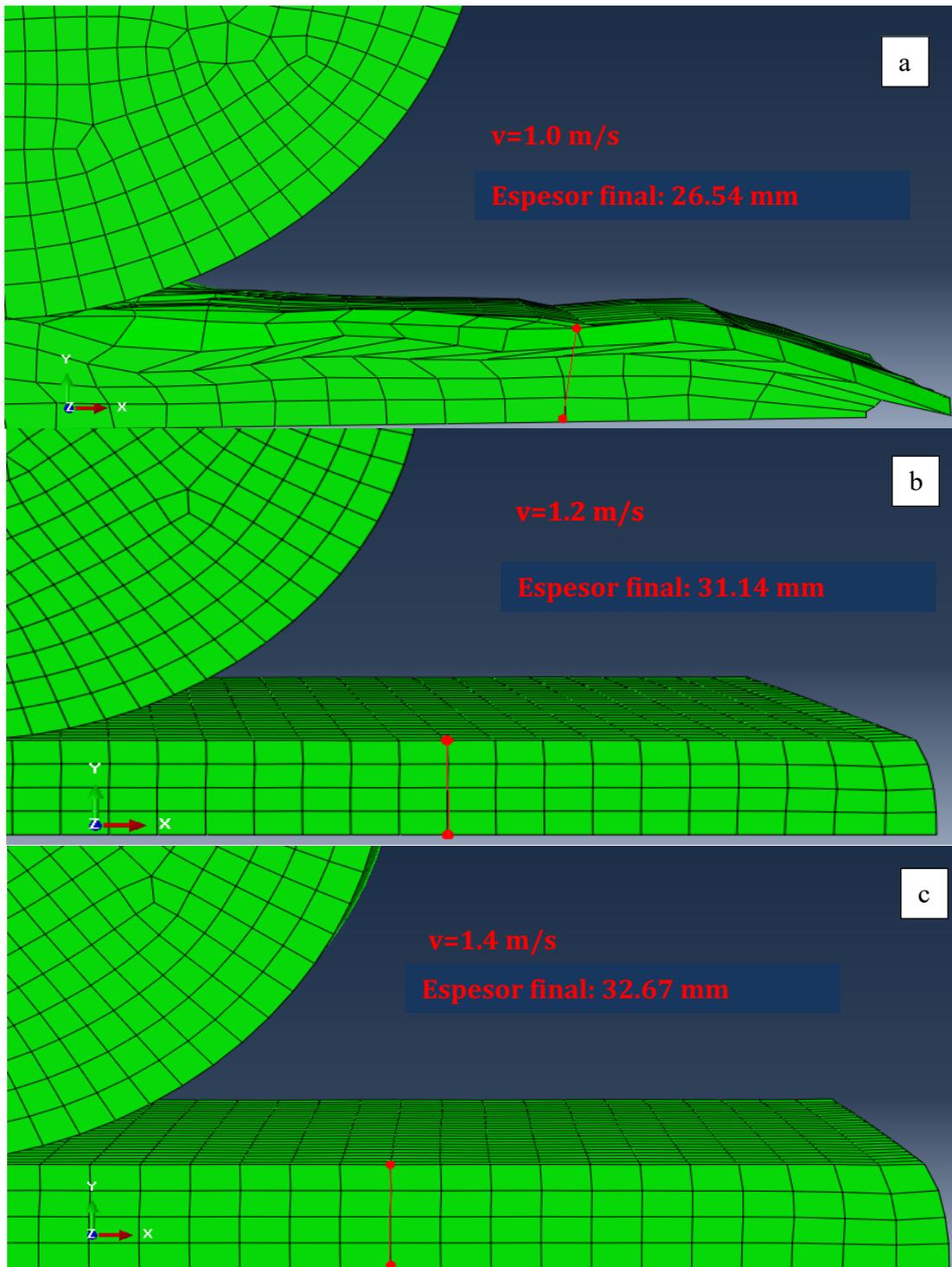
Se muestran los resultados de la simulación para cada una de las variaciones de velocidad. En la figura 7 y 8, se muestran los esfuerzos totales y deformaciones equivalentes a diferentes velocidades en zonas donde estos valores se maximizan. En la figura 9 se muestran las mediciones de la pieza después de laminarse bajo las mismas variaciones.



**Figura 7. Esfuerzos totales cuando  $\mu=0.4$  es constante (simulación 1). a)** Cuando  $v=1.0$  m/s (máx. 114.721 MPa). **b).** Cuando  $v=1.2$  m/s (máx. 110.513 MPa). **c).** Cuando  $v=1.4$  m/s (112.730 MPa).

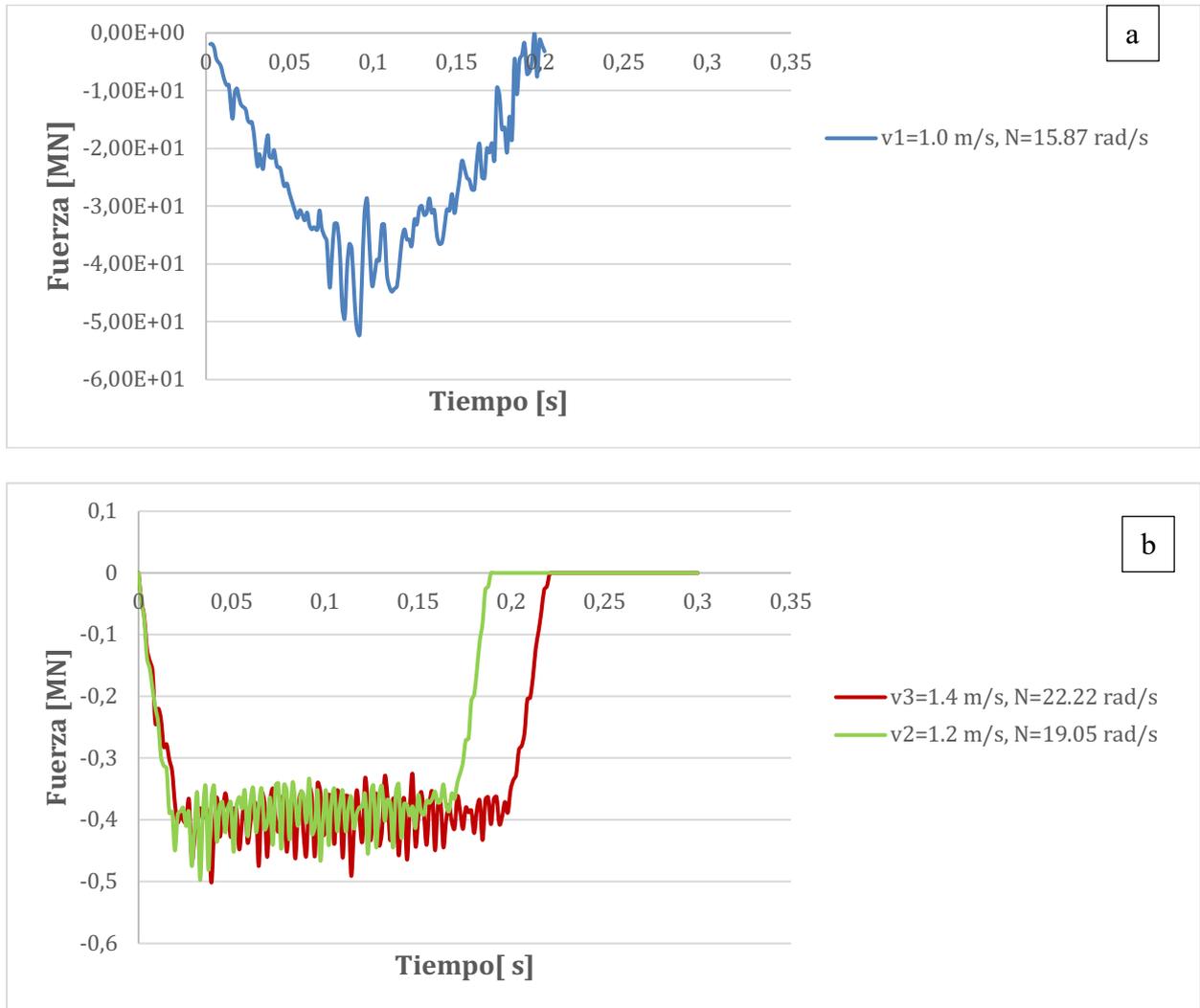


**Figura 8.** Deformaciones equivalentes cuando  $\mu=0.4$  es constante (simulación 1). **a)** Cuando  $v=1.0$  m/s (máx. 8.212). **b)** Cuando  $v=1.2$  m/s (máx. 0.413). **c)** Cuando  $v=1.4$  m/s (máx. 0.408).



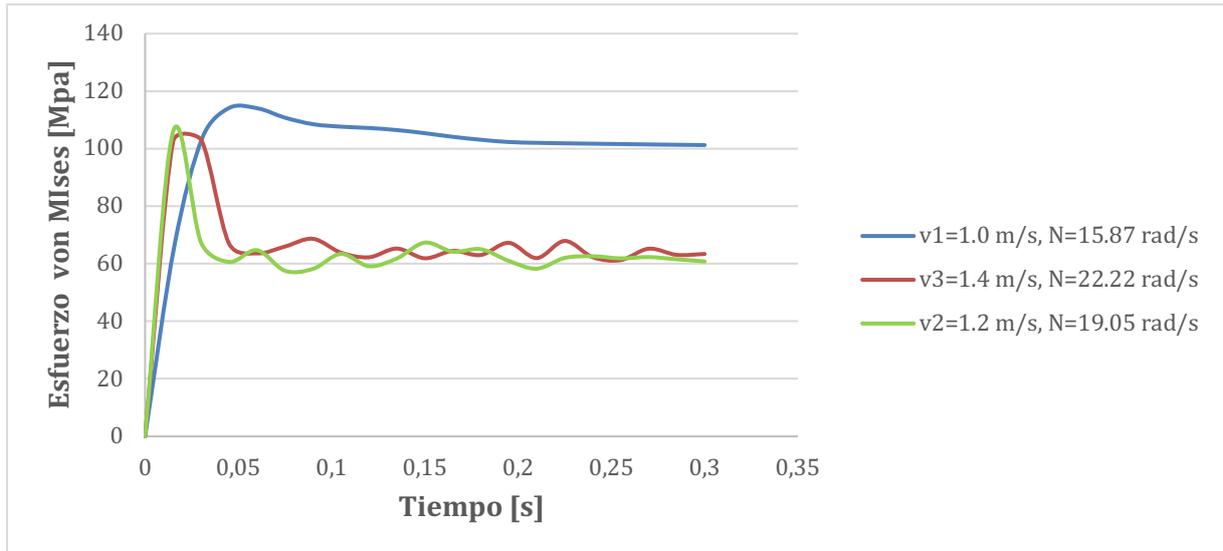
**Figura 9. Piezas deformadas cuando  $\mu=0.4$  es constante (simulación 1).** a)  $v=1.0$  m/s. Representa un exceso de reducción total de 26 mm. No es uniforme. b)  $v=1.2$  m/s. Representa una reducción del espesor total a 32.6 mm. c)  $v=1.4$  m/s. Representa una reducción de espesor total a 31.1 mm.

En la figura 10 se comparan las fuerzas de laminación para las tres velocidades. Utilizando las ecuaciones 4 y 5, se obtiene la potencia del sistema para cada caso y se comparan en la tabla 3.

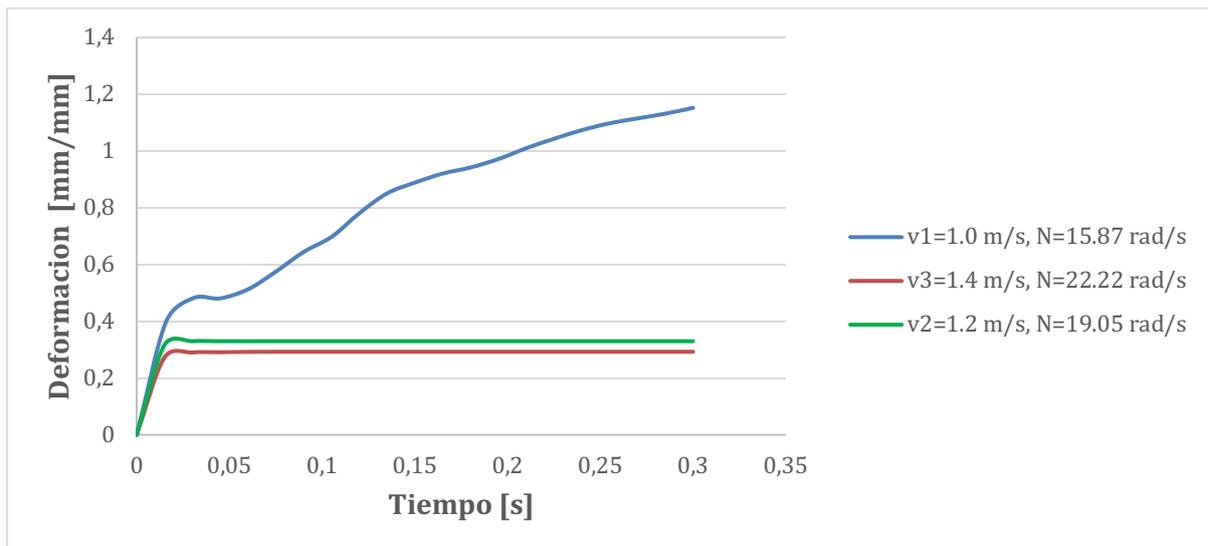


**Figura 10. Fuerzas de laminación para simulación 1. a)** Fuerza de laminado cuando  $v = 1.0 \text{ m/s}$ . Se representa a parte debido a la escala. **b)** Fuerza de laminado para  $v = 1.2$  y  $1.4 \text{ m/s}$ .

Las figuras 11 y 12 muestran las evoluciones de los esfuerzos y las deformaciones localizadas en el primer nodo de contacto. Los valores máximos de estas se comparan en el resumen de resultados de la tabla 3.



**Figura 11. Evolución de esfuerzos localizados en la simulación 1.** Esfuerzos localizados respecto al tiempo de simulación en el primer nodo de contacto. Los máximos para cada velocidad se muestran en la tabla 3.



**Figura 12. Evolución de deformaciones localizadas en la simulación 1.** Deformaciones localizadas respecto al tiempo de simulación en el primer nodo de contacto. Los máximos para cada velocidad se muestran en la tabla 3.

Todos los resultados de la simulación 1 se resumen en la tabla 3. Observándolos y utilizando el criterio descrito en la sección de métodos, se ve que la velocidad crítica es 1.0 m/s, ya que es la menos capacidad de reducción de laminado tiene, además de presentar

deformaciones en la pieza y tener la mayor potencia de laminación. Esta velocidad se utiliza en la simulación 2.

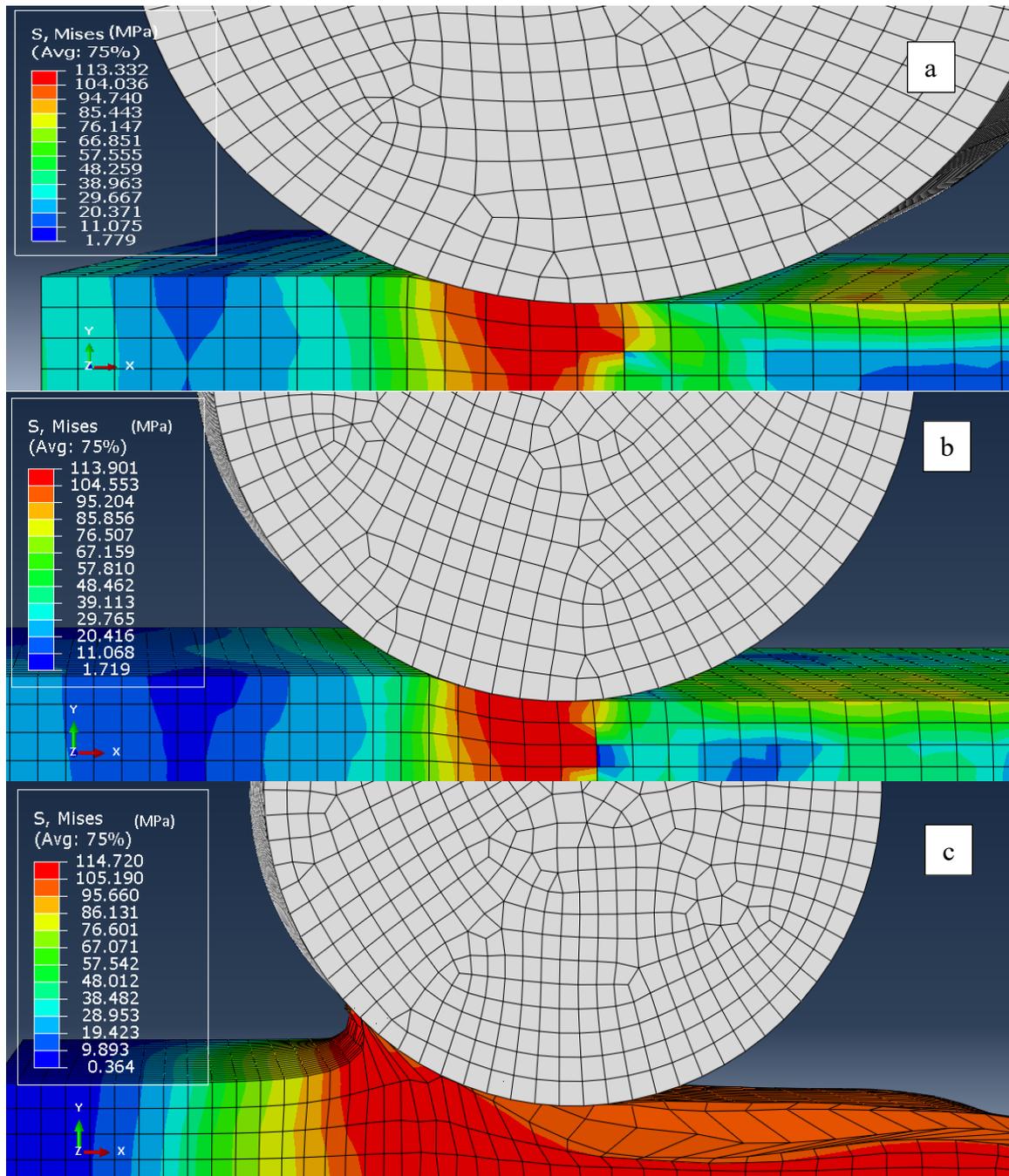
**Tabla 3.** Resumen de resultados de las variaciones de velocidad para cuando  $\mu=0.4$ .

| <b>Velocidad</b><br><b>(m/s)</b> | <b>Fuerza</b><br><b>(MN)</b> | <b>Potencia</b><br><b>(MW)</b> | <b>S<sub>y</sub></b><br><b>(MPa)</b> | <b><math>\tau_{fric}</math></b><br><b>(MPa)</b> | <b><math>\tau_{flow}</math></b><br><b>(MPa)</b> | <b><math>\epsilon</math></b><br><b>(mm/mm)</b> | <b>Espesor</b><br><b>(mm)</b> |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|-------------------------------|
| 1.0                              | 225.4                        | 25.39                          | 114.167                              | 147.79  | 65.91   | 1.151  | 26                            |
| 1.2                              | 0.347                        | 0.426                          | 103.157                              | 18.16   | 61.127  | 0.293  | 31.14                         |
| 1.4                              | 0.355                        | 0.486                          | 105.876                              | 16.843  | 59.568  | 0.330  | 32.67                         |

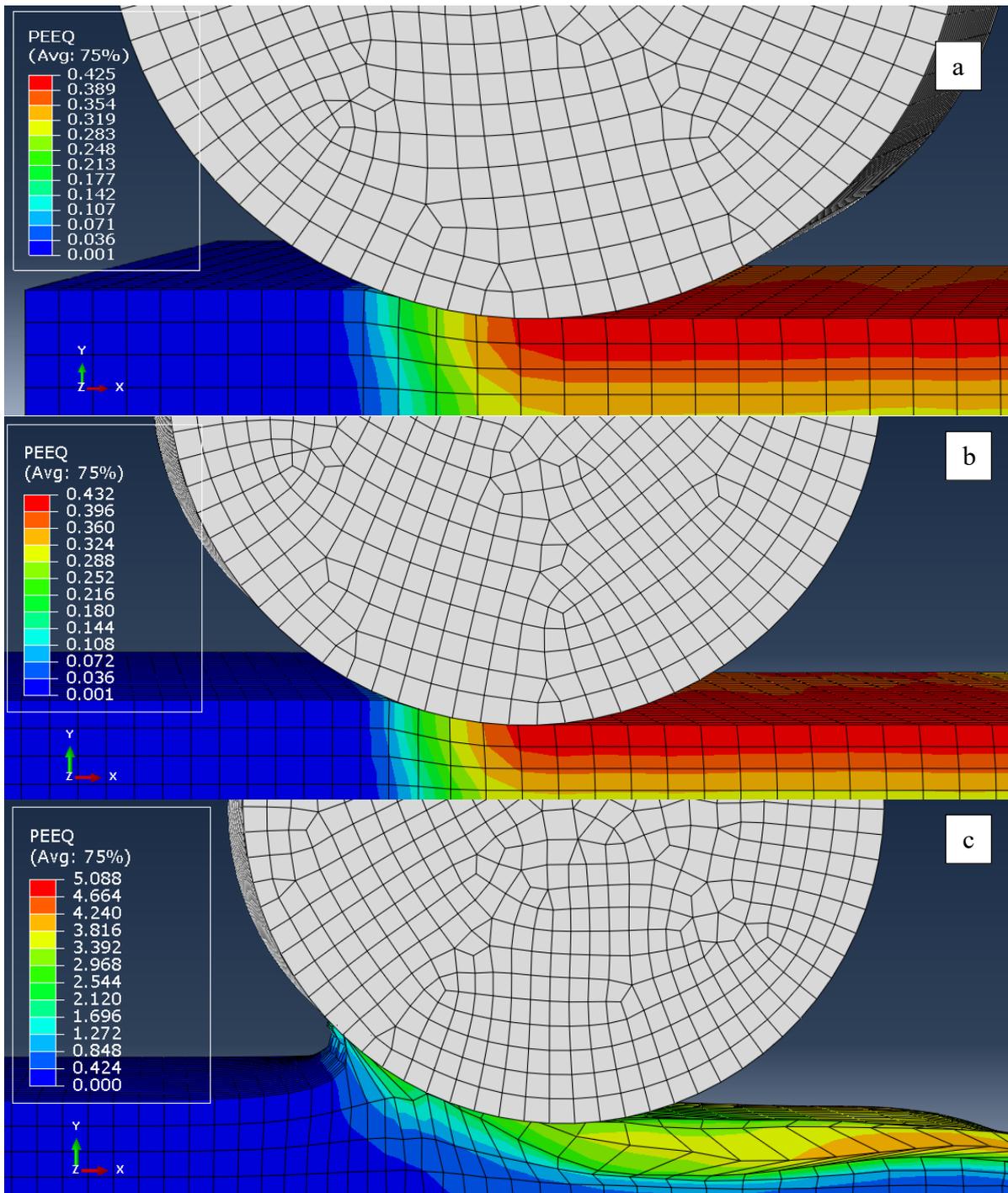
$S_y$ ,  $\tau_{fric}$ ,  $\tau_{flow}$ ,  $\epsilon$  son los esfuerzos de fluencia, esfuerzo cortante por fricción (ecuación 8), esfuerzo cortante de flujo (ecuación 9), y la deformación localizada, respectivamente. El espesor se refiere al total reducido. La fuerza y la potencia son valores medios.

### 3.3. Simulación 2: velocidad crítica constante y variación de coeficientes de fricción.

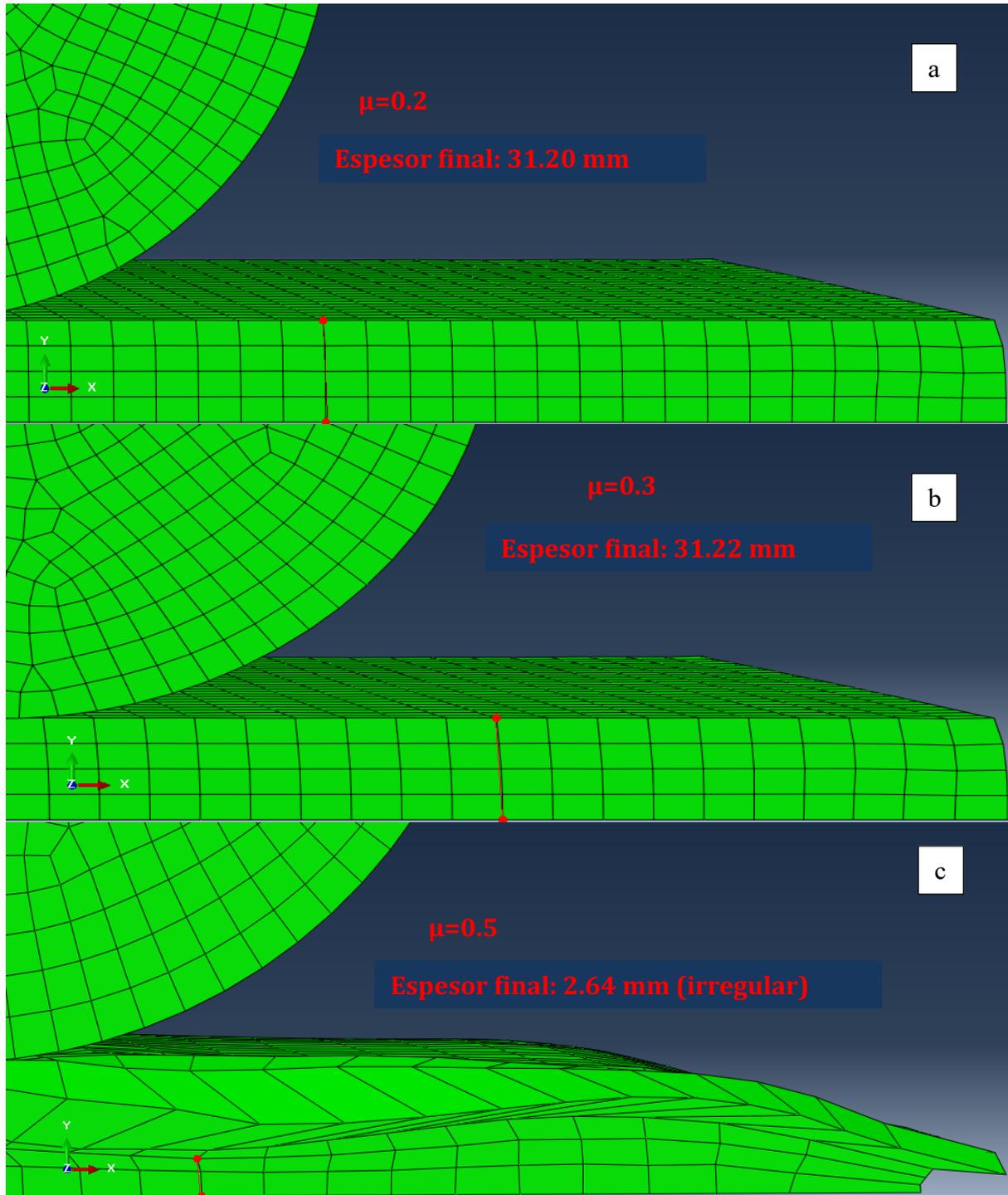
Considerando la velocidad crítica de 1.0 m/s como constante, se realizan las variaciones para cuando los coeficientes de fricción son 0.2, 0.3 y 0.5. Los resultados se muestran en la misma secuencia que la subsección anterior.



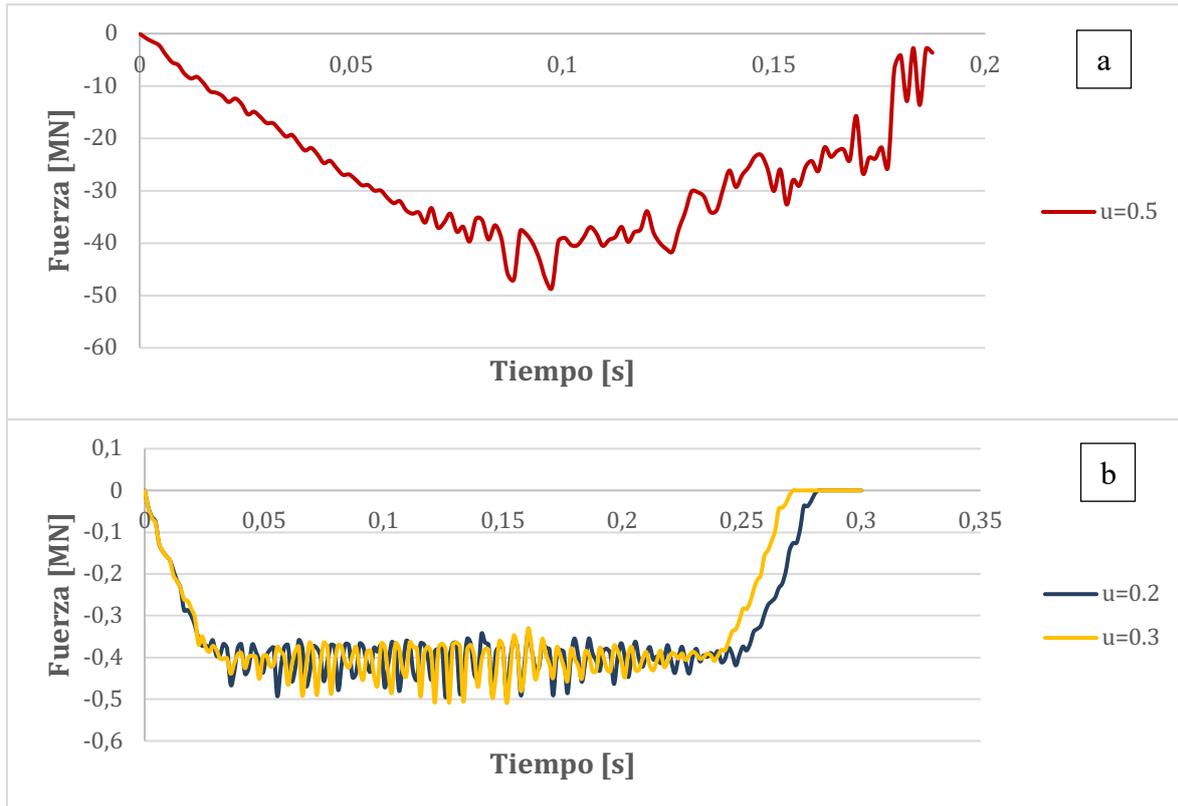
**Figura 13. Esfuerzos totales cuando  $v=1.0$  m/s es constante (simulación 2), a) Cuando  $\mu=0.2$  (máx. 113.332 MPa), b) Cuando  $\mu=0.3$  (máx. 113.901 MPa), c) Cuando  $\mu=0.5$  (máx. 114.720 MPa).**



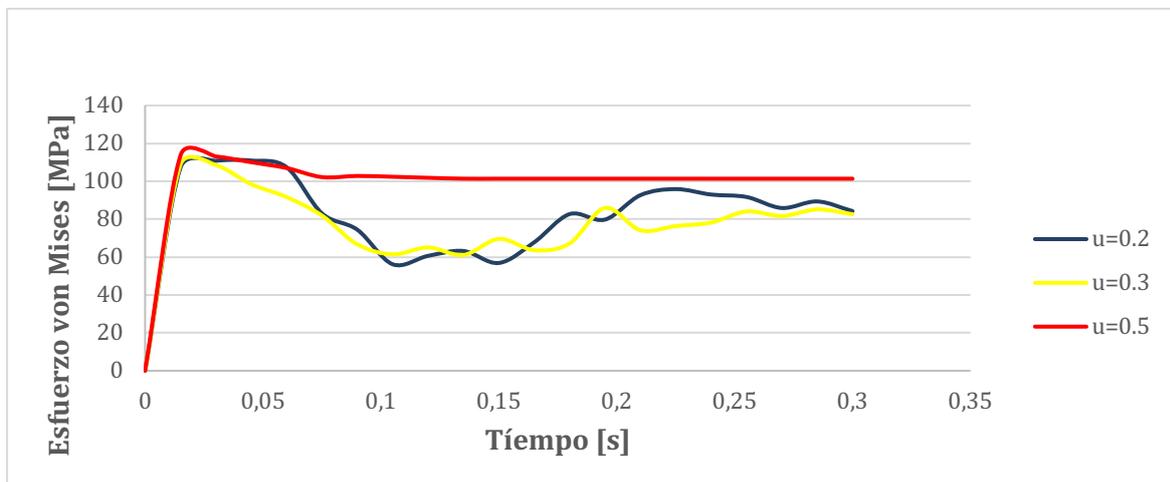
**Figura 14.** Deformaciones equivalentes cuando  $v=1.0$  m/s es constante (simulación 2), a) Cuando  $\mu=0.2$  (máx. 0.425), b) Cuando  $\mu=0.3$  (máx. 0.432), c) Cuando  $\mu=0.5$  (máx. 5.088).



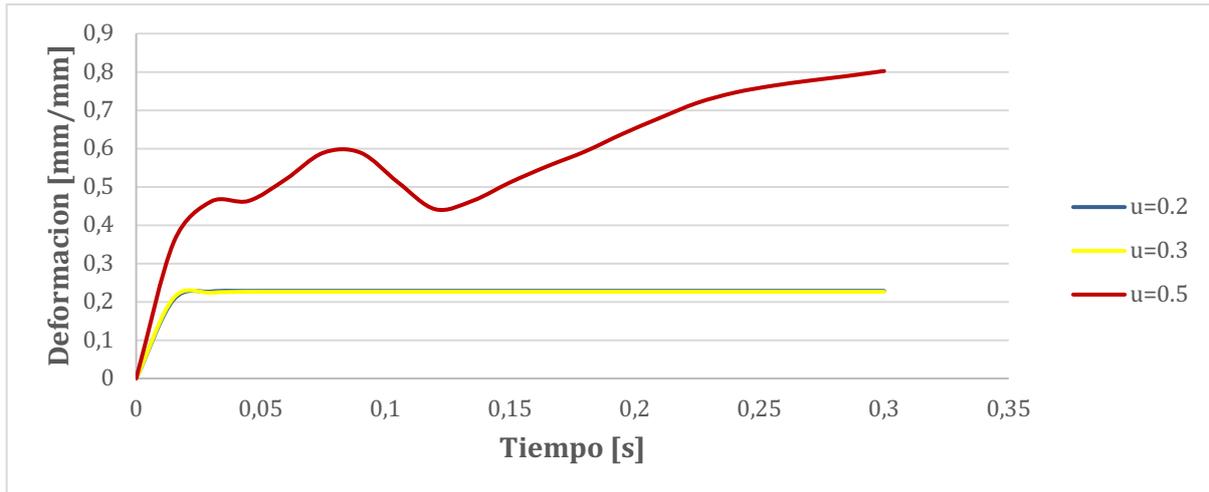
**Figura 15.** Piezas deformadas cuando  $v=1.0$  m/s es constante (simulación 2), **a)**  $\mu=0.2$ . Representa un exceso de reducción total de 31.2 mm. **b)**  $\mu=0.3$  m/s. Representa una reducción del espesor total a 31.22 mm. **c)**  $\mu=0.5$ . Representa una reducción de espesor máxima de 2.64 mm. La reducción no es uniforme.



**Figura 16. Fuerzas de laminación para simulación 2, a)** Fuerza de laminado cuando  $\mu=0.5$ . Se representa a parte debido a la escala. **b)** Fuerza de laminado para  $\mu=0.2$  y  $0.3$ .



**Figura 17. Evolución de esfuerzos localizados en la simulación 2.** Esfuerzos localizados respecto al tiempo de simulación en el primer nodo de contacto. Los máximos para cada velocidad se muestran en la tabla 4.



**Figura 18.** Evolución de deformaciones localizadas en la simulación 1. Deformaciones localizadas respecto al tiempo de simulación en el primer nodo de contacto. Los máximos para cada velocidad se muestran en la tabla 4.

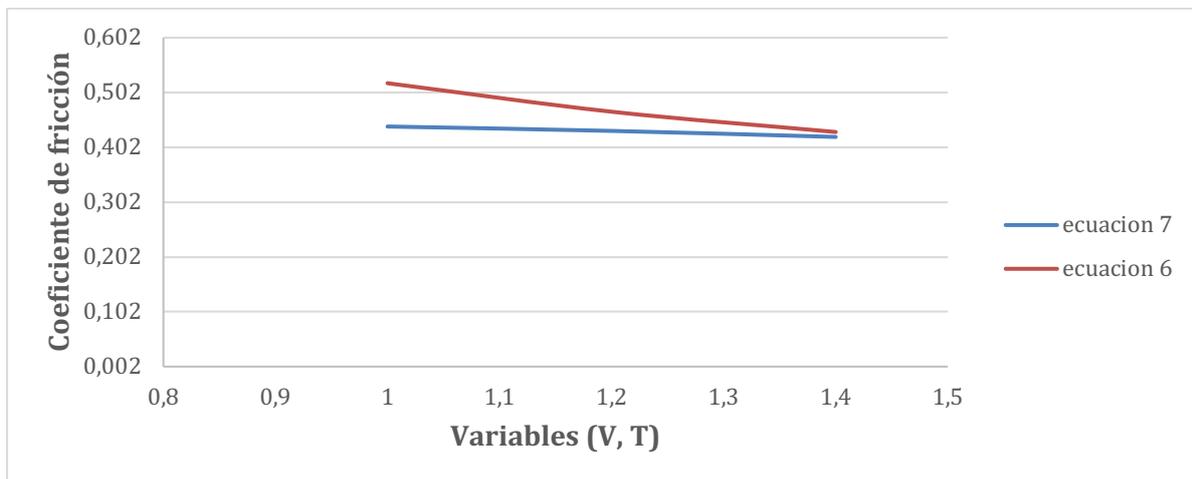
**Tabla 4.** Resumen de resultados de las variaciones del coeficiente de fricción para cuando  $v=1.0$  m/s.

| $\mu$ | Fuerza<br>(MN) | Potencia<br>(MW) | $S_y$<br>(MPa) | $\tau_{fric}$<br>(MPa) | $\tau_{flow}$<br>(MPa) | $\epsilon$<br>(mm/mm) | Espesor<br>(mm) |
|-------|----------------|------------------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 0.2   | 0.363          | 0.364            | 108.868        | 15.76                  | 62.85                  | 0.226                 | 31.20           |
| 0.3   | 0.366          | 0.435            | 110.941        | 14.180                 | 64.052                 | 0.229                 | 31.22           |
| 0.5   | 26.57          | 37.19            | 113.994        | 1045                   | 65.814                 | 0.805                 | 2.64*           |

$S_y$ ,  $\tau_{fric}$ ,  $\tau_{flow}$ ,  $\epsilon$  son los esfuerzos de fluencia, esfuerzo cortante por fricción (ecuación 8), esfuerzo cortante de flujo (ecuación 9), y la deformación localizada en el primer nodo de contacto, respectivamente. \*El espesor se refiere al total reducido y es irregular. La fuerza y la potencia de laminación son valores medios.

### 3.4. Discusiones.

El coeficiente de fricción utilizado para la obtención del sistema de laminación fue de 0.4. Tolcha (2018) señala que el coeficiente de fricción  $\mu$  disminuye a medida que las velocidades de laminación y temperatura aumentan en base a los mismos modelos utilizados para obtener los diferentes coeficientes de fricción mostrados en la tabla 2. Para las velocidades de laminación y temperatura consideradas, ocurre lo mismo. Como se muestra en la figura 19, para las velocidades de 1.0 m/s, 1.2 m/s y 1.4 m/s y una temperatura de 1100 °C, los valores parecen convergir cuando  $\mu=0.4$ .



**Figura 19. Convergencia para coeficiente de fricción (ecuaciones 6 y 7).** El coeficiente de fricción decrece a medida que aumenta la velocidad de laminación y converge en 0.4.

Usando el resultado anterior en la ecuación 1, se determina que el radio de los rodillos fue de 63 mm. Este resultado está dentro de los rangos típicos de tamaño de rodillo utilizados para investigaciones de los parámetros de laminación. Esto lo demuestran Tolcha, (2018) Murthy y Patil (2016) y Shahani et al., (2009) , ya que para sus estudio de la relación entre el tamaño de rodillo, la presión y la velocidad en laminación en caliente se utilizan diámetros entre 100 y 400 mm de diámetro.

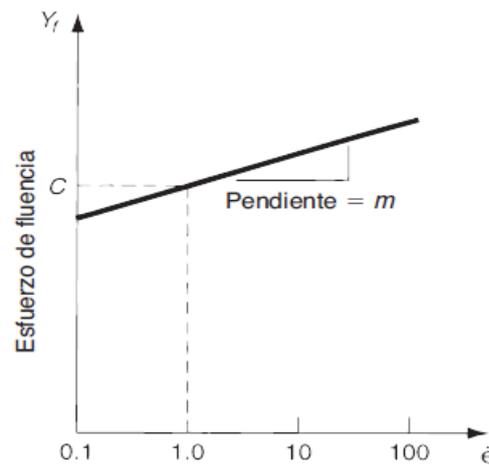
En la simulación 1, para cuando el coeficiente de fricción de 0.4 es constante y se varían las velocidades de laminación en los rangos de 1.0, 1.2 y 1.4 m/s, se obtienen esfuerzos máximos localizados de 114.167, 103.157 y 105.876 MPa, respectivamente. A medida que avanza el proceso de laminación, se ve que los esfuerzos localizados decaen y entran en una etapa de relajación, no así cuando la velocidad es 1.0 m/s, donde el esfuerzo máximo de 114.167 MPa se mantiene (figura 11). Estos comportamientos indican que esos esfuerzos máximos son los esfuerzos de fluencia del material ya que las deformaciones se estabilizan después de llegar a los máximos de 0.230 y 0.290 mm/mm para cuando las velocidades son de 1.2 y 1.4 m/s mientras que, cuando la velocidad es de 1.0 m/s, aparece la condición de adherencia, y la deformación localizada crece hasta 1.151 mm/mm (figura 12). Por ende, la velocidad de 1.0 m/s se considera crítica y se investigó en la siguiente simulación.

En la simulación 2, cuando la velocidad de 1.0 m/s es constante y se varían los coeficientes de fricción para los valores de 0.2, 0.3 y 0.5, se tiene que los esfuerzos son 108.868, 110.941 y 113.994 MPa, respectivamente. La condición de adherencia ocurre cuando se tiene un coeficiente de fricción de 0.5. Cuando los coeficientes de fricción son 0.2 y 0.3, la conducta de relajación es similar a la de las curvas de la primera simulación (figura 17). Por ende, esos son los esfuerzos de fluencia de esas combinaciones. Cuando ocurre la adherencia, el esfuerzo es de 113.994 MPa y las deformaciones crecen hasta 0.805 mm/mm (figura 18).

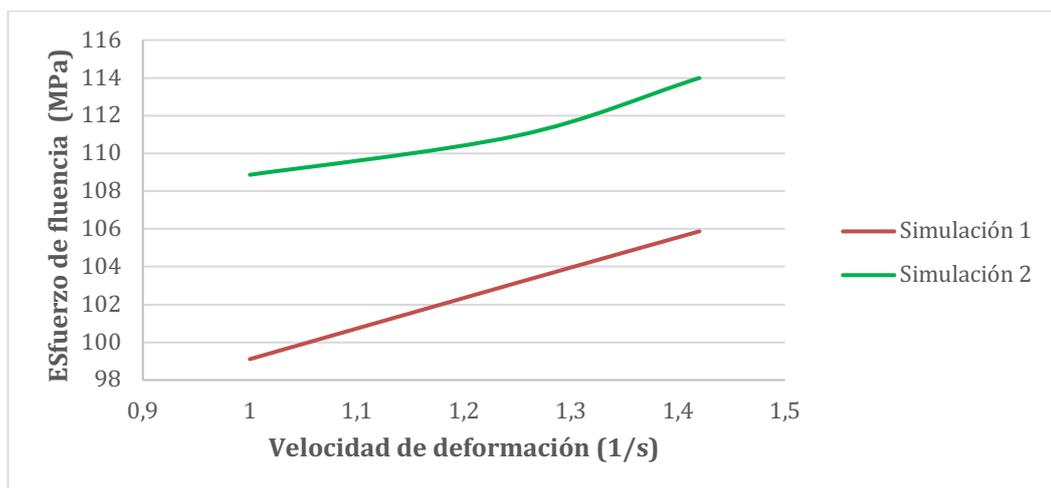
En la teoría, el esfuerzo de fluencia está dado por la ecuación 11, donde  $C$  es la constante de resistencia,  $m$  es el exponente de sensibilidad a la deformación. A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es despreciable. Sin embargo, a medida

que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación se vuelve más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia  $S_y$ . (Groover, 2013e).

$$S_y = C \dot{\epsilon}^m \quad (11)$$



**Figura 20. Relación entre esfuerzo de fluencia y las constantes  $C$  y  $m$ .** La constante  $C$  se determina a una velocidad de deformación  $1.0 \text{ s}^{-1}$ . El exponente de sensibilidad a la deformación  $m$  es la pendiente. (Groover, 2007c).



**Figura 21. Esfuerzo de fluencia y velocidades de deformación (simulación 1 y 2).** Las dos relaciones muestran un comportamiento similar al descrito en la teoría.

Groover (2013e) muestra que el rango del exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación es  $0.05 \leq m \leq 0.4$  para cuando el trabajo en caliente es por encima de la temperatura de recristalización, mientras que el rango para un trabajo en frío suelen ser de  $0 \leq m \leq 0.05$ . De los valores de la figura 20 y usando la ecuación 11 se tiene que los valores de  $m$  están entre 0.16 y 0.17 para los parámetros de la simulación 1, mientras que para la simulación 2, los valores son están entre 0.01y 0.08. Esto indica que el modelo de laminación corresponde a un en caliente, excepto cuando se tiene una velocidad de 1.0 m/s y un coeficiente de fricción de 0.2 (donde  $m = 0.01$ ), que indica que el proceso es más parecido al laminado en frío.

La condición de adherencia aparece cuando la velocidad de laminación es 1.0 m/s y el coeficiente de fricción es 0.4 ó 0.5. Revisando los resultados en las tablas 3 y 4, se ve que los esfuerzos cortantes por fricción en estas dos combinaciones son 147.79 MPa y 1045 MPa, mientras que los esfuerzos cortantes de flujo son de 65.91 y 65.81 MPa, respectivamente. Shahani, A. R., et al. (2009) y la teoría de los conceptos básicos del modelo de fricción de Coulomb utilizados para los análisis de elementos finitos en problemas de contacto (Abaqus, 2019d), indican que el fenomeno ocurre cuando el esfuerzo cortante por fricción supera al esfuerzo cortante por flujo. Comparando los valores obtenidos para estos esfuerzos cortantes (tablas 3 y 4) se ve que esto es cierto y coincide con la aparición del fenómeno en las figuras 8(a), 9(a), 13(c) y 14(c). Cabe señalar que Murthy y Patil (2016) demostraron que aumentando el tamaño de diametro de los rodillos a bajos regímenes de velocidad, se puede disminuir los esfuerzos cortante de flujo (y evitar la adherencia). Esta relación particular su puede investigar en un trabajo futuro.

En cuanto a las fuerzas y potencia de laminación se ve que, en la primera simulación, estas aumentan con la velocidad. Esta relación también es confirmada por Li et al., (2017) Motabelli (2010), Shahani, A. R., et al., (2009) para rangos de fuerza y velocidades mayores. Cuando la velocidad es de 1.0, 1.2 y 1.4 m/s, se obtienen fuerzas medias de 25.4 MN, 0.347 MN y 0.355 MN, y potencias de laminación de 25.4 MW, 0.426 MW y 0.486 MW, respectivamente. En la simulación 2, cuando se mantiene la velocidad de 1.0 m/s constante y se varían los coeficientes de fricción para 0.2, 0.3 y 0.5, se observa que las fuerzas son de 0.363 MN, 0.366 MN y 26.57 MN, mientras que las potencias son de 0.364 MW, 0.435 MW y 37.19 MW, respectivamente. Se ve que la fuerza (y potencia) de laminación aumentan junto con el aumento del coeficiente de fricción. Fan et al. (2017) y Motabelli (2010) muestran que esta relación también se cumplen para otras aleaciones usadas en laminado en caliente.

Finalmente, comparando las dos posibles combinaciones óptimas bajo el criterio descrito en la sección de 2.3, se observa que velocidad de laminación a 1.2 m/s con un coeficiente de fricción de 0.4 y potencia de 0.426 MW es la combinación que produce un espesor de 31.14 mm y es el más cercano al deseado (30 mm). Por tanto, es la combinación elegida. Sin embargo, cuando la velocidad es de 1.0 m/s, coeficiente de fricción es de 0.2 y la potencia de laminado es de 0.364 MW también produce un espesor final aceptable de 31.20 mm. A pesar de que la potencia es menor en esta combinación, se considera mejor tener velocidades de laminación superiores en particular cuando es laminado en caliente. Además, se sabe que para los procesos de este tipo es posible controlar los coeficientes de fricción mediante aceites minerales y aditivos tales como éster de ácido bórico soluble en aceite, los cuales pueden disminuir los coeficientes de fricción hasta 0.314 y 0.252 (Fan et al., 2017). Estos métodos de control se pueden aplicar a la primera combinación para disminuir las probabilidades de adherencia.

#### 4. CONCLUSIONES

En el siguiente trabajo se ha desarrollado un modelo de simulación a partir de la relación que existe entre el coeficiente de fricción y la geometría de los rodillos. Se han considerado las propiedades termo-mecánicas a 1100 °C y se han establecido las variaciones de la velocidad y de los coeficientes de fricción en un total de 2 simulaciones. Las conclusiones de este trabajo son:

- Para los modelos de coeficiente de fricción para el laminado en caliente se ve que a las velocidades de 1.0, 1.2 y 1.4 m/s y a una temperatura de 1100 °C los valores convergen en 0.4. De las relaciones geométricas se establece que el tamaño del rodillo es de 63 mm y el ángulo de ataque es de 28.1 °. Esta configuración considera que se conseguirá reducir la plancha de 40 mm de espesor a 30 mm.
- Se determinaron los esfuerzos de fluencia durante el proceso de laminación y las deformaciones localizadas en el nodo de contacto de la pieza, así como los esfuerzos cortantes de fricción y de flujo (tablas 3 y 4). Los valores demuestran que el modelo de laminación genera deformaciones permanentes en la pieza de trabajo y que los máximos (figuras 8 y 13) son los esfuerzos de fluencia mencionados, debido a la conducta de las curvas esfuerzo vs tiempo.
- La condición de adherencia aparece cuando la velocidad es 1.0 m/s y el coeficiente de fricción es de 0.4 y 0.5 ya que, en esas combinaciones, los esfuerzos cortantes de fricción superan a los esfuerzos cortantes de flujo del material (tablas 3 y 4).
- Los exponentes de sensibilidad a la velocidad de deformación  $m$  están entre 0.16 y 0.17 cuando se mantiene el coeficiente de fricción de 0.4 constante y se varían las velocidades de 1.0, 1.2 y 1.4 m/s (simulación 1), mientras que, para la simulación 2,

cuando se mantiene la velocidad de 1.0 m/s constante y se varían los coeficiente de fricción para 0.2, 0.3 y 0.5 (simulación 2), los valores de  $m$  están entre 0.01 y 0.08.

Estos rangos de valores son típicos de la laminación en caliente.

- Las fuerzas y potencias de laminación aumentan junto con la velocidad de laminado y coeficientes de fricción. Este hecho se aparece en varios estudios de laminación.
- Comparando las dos posibles combinaciones óptimas bajo el criterio descrito en la sección de 2.3, se observa que velocidad de laminación a 1.2 m/s con un coeficiente de fricción de 0.4 y potencia de 0.426 MW es la combinación que produce un espesor de 31.14 mm y es el más cercano al deseado (30 mm).
- Como trabajo futuro se podría analizar el sistema bajo un análisis de transferencia de calor que incluya la transferencia por conducción entre la pieza y el rodillo, así como la transferencia por convección natural entra la pieza y el ambiente. Además, se podrían probar otras configuraciones a partir de tamaño del rodillo. También se podría averiguar si la combinación de los parámetros óptimos obtenida funciona para otros tipos aceros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus/CAE User's Manual 6.10 (2019a). *Using patterns and Mirrors to Display results*. Recuperado 29 octubre, 2019, de <http://130.149.89.49:2080/v6.10/books/usi/default.htm?startat=pt05ch53s11h1b02.html>
- Abaqus/CAE User's Manual 6.10. (2019b). *Rolling of thick plates*. Recuperado el 18 octubre, 2019, de <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/books/exa/default.htm?startat=ch01s03aex36.html>
- Abaqus/CAE User's Manual 6.10. (2019c). *Rigid Parts*. Recuperado el 29 octubre, 2019, de <http://130.149.89.49:2080/v6.9/books/usi/default.htm?startat=pt03ch11s07s01.html>
- Abaqus/CAE User's Manual 6.13. (2019d). *Frictional Behavior*. Recuperado el 29 octubre, 2019, de <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/books/usb/default.htm?startat=pt09ch37s01aus169.html>
- Aghasafari, P., Salimi, M., & Daraei, A. (2014). Flow stress evaluation in hot rolling of steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(8), 2819–2828. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1049-x>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013a). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9ª Ed.). NJ, U.S.: Wiley. p. 434.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013b). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9ª Ed.). NJ, U.S.: Wiley. pp. 414-415.
- Dar, F. H., Meakin, J. R., & Aspden, R. M. (2002). Statistical methods in finite element analysis, 35, 1155–1161.
- Dubar, M., & Dubar, L. (2014a). Initiation of Sticking during Hot Rolling of Stainless Steel Plate. (December). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.264>
- Dubar, M., & Dubar, L. (2014b). Transformation of a slab into a black coil [Figura 1]. *Initiation of Sticking during Hot Rolling of Stainless Steel Plate*. (December). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.264>
- Dieter, G. and Bacon, D. (1988). *Mechanical metallurgy*. (SI Metric Ed.). London: McGraw-Hill, pp.586-587.
- Fan, X., Zang, Y., Jin, K., & Wang, P. (2017). Rolling interface friction dynamics of hot strip continuous rolling and its effect on mill chatter. *Journal of Vibroengineering*, 19(1), 61–74. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17228>

- Groover, M. (2013a). *Fundamentals of modern manufacturing*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., p.422.
- Groover, M. (2013b). *Fundamentals of modern manufacturing*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., p.430.
- Groover, M. (2013c). *Fundamentals of modern manufacturing*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., p.432.
- Groover, M. (2013d). *Fundamentals of modern manufacturing*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., p.425.
- Groover, M. (2013e). *Fundamentals of modern manufacturing*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., pp.385-399.
- Groover, M. (2007a). Proceso de laminación, específicamente laminado plano [Figura 19.1]. *Fundamentos de la manufactura moderna*. 3ra ed., México: John Wiley & Sons, Inc., p.391.
- Groover, M. (2007b). Vista lateral del laminado plano en la que se muestra el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características. [Figura 19.3]. *Fundamentos de la manufactura moderna*. 3ra ed., México: John Wiley & Sons, Inc., p.394.
- Groover, M. (2007c). Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, [Figura 18.5]. *Fundamentos de la manufactura moderna*. 3ra ed., México: John Wiley & Sons, Inc., p.385.
- Hao, K., Gao, M., & Wu, R. (2019). Cold rolling performance for austenitic stainless steel with equilibrium and non-equilibrium microstructures. *Integrative Medicine Research*, (x x), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.037>
- Li, S., Wang, Z., Liu, C., Ruan, J., & Xu, Z. (2017). A simplified method to calculate the rolling force in hot rolling, 2053–2059. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8890-z>
- Maurya, A. (2015). Effect of casting speed on continuous casting of steel slab, (January 2014). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/261216791>
- Motallebi, S. R. (2010). Investigation of Influence Parameters on the Hot Rolling Process Using Finite Element Method.
- Mukherjee, T., Zuback, J. S., Zhang, W., & Debroy, T. (2018). Residual stresses and distortion in additively manufactured compositionally graded and dissimilar joints. *Computational Materials Science*, 143, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.11.026>
- Rodrigues, S. F., Leal, V., & Reis, G. S. (2017). Softening Mechanisms of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Under Hot Torsion Simulation Softening Mechanisms of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Under Hot Torsion, (February).

- <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0795>
- Shahani, A. R., Nodamaie, S. A., & Salehinia, I. (2009). Parametric Study of Hot Rolling Process by the Finite Element Method, *16*(2), 130–139.
- Srinivasa Murthy, Hemant Patil, B. N. S. (2016). Studies on Influence of Roller Diameter and Roller Speed on Process Parameters in Hot, (5), 2–6.
- Tolcha, M. A. (2018). Numerical Modelling Rolling Contact Problem Model and Elasticity Deformation of Rolling Die under Hot Milling, (April 2019).  
<https://doi.org/10.3390/met9020226>
- Widerøe, F., & Welo, T. (2012). Conditions for sticking friction between aluminium alloy AA6060 and tool steel in hot forming. *Key Engineering Materials*, *491*(September 2011), 121–128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.491.121>

**ANEXO A: ESFUERZOS Y DEFORMACIONES A DIFERENTES TASAS DE DEFORMACIÓN (1100 °C)**

| Tasas de deformación |             |                |             |                |             |
|----------------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| 1.0 s-1              |             | 1.25 s-1       |             | 1.42 s-1       |             |
| Esfuerzo (Mpa)       | Deformación | Esfuerzo (Mpa) | Deformación | Esfuerzo (Mpa) | Deformación |
| 0.35                 | 0.000       | 0.44           | 0.000       | 0.52           | 0.000       |
| 14.85                | 0.001       | 15.64          | 0.002       | 16.34          | 0.002       |
| 36.59                | 0.01        | 38.33          | 0.01        | 39.86          | 0.01        |
| 50.84                | 0.02        | 53.15          | 0.02        | 55.19          | 0.03        |
| 60.46                | 0.02        | 62.69          | 0.03        | 64.66          | 0.04        |
| 76.21                | 0.05        | 77.85          | 0.06        | 79.30          | 0.08        |
| 86.59                | 0.11        | 88.08          | 0.13        | 89.40          | 0.15        |
| 93.35                | 0.16        | 94.68          | 0.19        | 95.85          | 0.22        |
| 100.35               | 0.21        | 101.60         | 0.25        | 102.69         | 0.28        |
| 105.61               | 0.24        | 106.92         | 0.29        | 108.07         | 0.34        |
| 110.89               | 0.32        | 112.10         | 0.38        | 113.18         | 0.44        |
| 114.69               | 0.47        | 115.71         | 0.55        | 116.61         | 0.63        |
| 114.72               | 0.62        | 115.78         | 0.73        | 116.71         | 0.82        |
| 112.86               | 0.78        | 113.99         | 0.90        | 114.99         | 1.01        |
| 110.37               | 0.93        | 111.58         | 1.07        | 112.64         | 1.19        |
| 108.51               | 1.08        | 109.75         | 1.24        | 110.85         | 1.38        |
| 107.28               | 1.23        | 108.48         | 1.41        | 109.54         | 1.57        |
| 105.41               | 1.38        | 106.70         | 1.58        | 107.83         | 1.75        |
| 103.55               | 1.54        | 104.83         | 1.76        | 105.96         | 1.95        |
| 102.32               | 1.68        | 103.56         | 1.92        | 104.65         | 2.13        |
| 101.72               | 1.83        | 102.88         | 2.09        | 103.90         | 2.31        |
| 101.11               | 1.99        | 102.27         | 2.26        | 103.29         | 2.50        |
| 102.40               | 2.15        | 103.40         | 2.44        | 104.28         | 2.70        |
| 103.06               | 2.31        | 103.98         | 2.62        | 104.79         | 2.90        |
| 103.09               | 2.46        | 103.97         | 2.79        | 104.74         | 3.08        |
| 103.12               | 2.62        | 103.87         | 2.97        | 104.54         | 3.28        |
| 102.52               | 2.78        | 103.23         | 3.15        | 103.86         | 3.47        |
| 101.91               | 2.93        | 102.63         | 3.32        | 103.26         | 3.66        |
| 101.94               | 3.10        | 102.73         | 3.50        | 103.43         | 3.86        |