

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Estudio comparativo con E.F. de las fórmulas de
fuerza en laminación en frío

Autor: Francisco Javier Foncubierta Boj

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Proyecto Final de Carrera: Estudio comparativo con E.F. de las fórmulas de fuerza en laminación en frío.

Autor: Francisco Javier Foncubierta Boj

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan Otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

Dedicado a

Mis padres, Antonio y María de los Ángeles

Estudio comparativo con E.F. de las fórmulas de fuerza en laminación en frío.

Francisco Javier Foncubierta Boj

Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Aeronáutica

Mayo de 2015

Resumen

Existen múltiples modelos para predecir la fuerza y momento de laminación en frío que son necesarios aplicar en función de la reducción de espesor, relación de tamaño rodillo-lamina y otras variables como por ejemplo el tipo de material. Sin embargo estos modelos difieren mucho entre sí, debido principalmente a las suposiciones y simplificaciones hechas a la hora de modelar el proceso de laminación en frío.

Mediante el uso de elementos finitos se pretende realizar un análisis de las fuerzas y momentos de laminación en frío para diferentes casos de factor de forma (L/h) y diferentes materiales. Este análisis se ha comparado con las predicciones calculadas utilizando los modelos clásicos de Schey, Kalpakjian, Alting y Groover.

Se presenta en este documento también un resumen gráfico de estos resultados, poniendo de manifiesto para cada caso, qué modelo clásico se aproxima mejor al modelo de elementos finitos con el que se compara.

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres y mi familia todos estos años de apoyo tanto fuera como dentro del ámbito académico pues sin ellos no podría estar escribiendo estas líneas finales.

Agradecer a Luis, mi tutor, su siempre pronta y aclaratoria respuesta a todas las dudas que pudieran surgir durante la realización de este proyecto.

A mis amigos y compañeros, por la paciencia mostrada todo este tiempo, que no siempre ha sido el más fácil de todos.

Índice general

Resumen	v
Agradecimientos	vi
Índice de figuras	xi
1. Nomenclatura	1
2. Introducción	3
3. Objetivo	4
4. Estado del Arte	5
4.1. Modelo de Groover	5
4.1.1. Comportamiento del material	5
4.1.2. Modelo matemático	7
4.2. Modelo de Schey	11
4.2.1. Modelo de forja continuo	11
4.2.2. Modelo de laminado	15
4.3. Modelo de Kalpakjian	17
4.3.1. Modelo matemático	17
4.4. Modelo de Alting	20
4.4.1. Modelo matemático	20
5. Modelado con DEFORM3D de un proceso de laminación	23
5.1. Definición de los casos de simulación	23
5.2. Modelado con DEFORM3D	26

5.2.1. Modelado de partes	26
5.2.2. Modelado del movimiento de las partes y relación entre las partes	27
5.2.3. Configuración de los parámetros de simulación	27
6. Comparación de los resultados obtenidos	29
6.1. Comparación de longitudes de contacto	29
6.2. Comparación de fuerzas de laminación	31
6.2.1. Acero AISI1008	32
6.2.2. Aluminio AL5052	32
6.2.3. Latón Cartridge Brass	33
6.3. Comparación de momentos de laminación	33
6.3.1. Acero AISI1008	34
6.3.2. Aluminio AL5052	34
6.3.3. Latón Cartridge Brass	35
7. Conclusiones	36
8. Anexo I: Ejemplos de modelado de procesos de laminación mediante el uso de DEFORM3D	38
8.1. Modelado 2D del problema	38
8.1.1. Comentarios	52
8.2. Simulación del caso	53
8.3. Post procesado y extracción de datos	55
9. Anexo II: Procesado de los archivos de base de datos de DEFORM3D mediante el uso de Matlab	58
9.1. Comparacion_metodos.m	61
9.1.1. Código Matlab	62
9.2. kalpakjian.m	64
9.2.1. Código Matlab	64
9.3. alting.m	64
9.3.1. Código Matlab	65

9.4. groover.m	65
9.4.1. Código Matlab	66
9.5. schey.m	66
9.5.1. Código Matlab	66
9.6. leedatos.m	75
9.6.1. Código Matlab	76
9.7. paso551.m	78
9.7.1. Código Matlab	80
10. Anexo III: Definición de los datos de material	89
10.1. Aluminio AL5052	89
10.2. Acero AISI1008	92
10.3. Latón Cartridge Brass	93
11. Anexo IV: Resultado de las fuerzas y momentos calculados según los modelos simplificados y DEFORM3D	94
11.1. Acero AISI1008	94
11.1.1. $L/h = 10$	94
11.1.2. $L/h = 5$	97
11.1.3. $L/h = 1$	99
11.1.4. $L/h = 0.5$	101
11.2. Aluminio AL5052	103
11.2.1. $L/h = 10$	103
11.2.2. $L/h = 5$	105
11.2.3. $L/h = 1$	107
11.2.4. $L/h = 0.5$	109
11.2.5. $L/h = 0.1$	111
11.3. Latón CARTRIDGE BRASS	113
11.3.1. $L/h = 10$	113
11.3.2. $L/h = 5$	116
11.3.3. $L/h = 1$	118
11.3.4. $L/h = 0.5$	120

11.3.5. $L/h = 0.1$	122
12. Anexo V: Graph2Vector	125
12.1. Descripción del entorno gráfico	125
12.2. Ejemplo de utilización	126
Referencias	129
Bibliografía	129

Índice de figuras

4.1. Curva de esfuerzo-deformación que indica la localización del esfuerzo de fluencia promedio \bar{Y}_f , en relación con la resistencia a la fluencia Y y el esfuerzo de fluencia final Y_f . [1] Página 382	7
4.2. 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. [1] Página 394	9
4.3. Variación típica de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 19.9, es la fuerza de laminación F . [1] Página 395	10
4.4. Al recalcar una pieza rectangular de trabajo, (a) el material fluye en dirección de la menor resistencia, marcada como L ; (b) ahora lo colina de fricción tiene forma de cresta. [2] Página 325	12
4.5. La deformación es (a) altamente no homogénea cuando se indenta un cuerpo semi infinito; (b) para valores h/L altos, la deformación aún es no homogénea; (c) sólo en $h/L = 1$ se aproxima la homogeneidad . [2] Página 297	13
4.6. Los presiones necesarios para indentar una pieza de trabajo se elevan con h/L , pero son independientes de la fricción. [2] Página 329	14
4.7. Las presiones promedio al recalcar una plancha rectangular se incrementan con la fricción y con la razón L/h . [2] Página 326	15

4.8. En la laminación plana (a) el ángulo de aceptación limita la reducción obtenible; y (b) el plano neutro desarrollado en condiciones de estado estable (c) se puede desplazar y las presiones se reducen por la aplicación de tensiones. [2] Página 380	16
4.9. (a) Ilustración esquemática del proceso de laminado plano. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la tira. (c) La fuerza de laminado, F , y el par de torsión que actúa sobre los rodillos. El ancho w de la tira por lo general aumenta durante el laminado. [3] Página 322	18
4.10. Esquema del proceso de laminación. [4] Página 164	20
5.1. Valores tabulados del coeficiente de fricción en procesos de laminación, [2]	25
5.2. Valores de las variables de laminación para todos los casos de simulación	26
5.3. Ventana de Controles de Simulación	28
6.1. Distribución de los nodos afectados por la presión de los rodillos en un paso de laminación	30
6.2. Comparación de las longitudes de contacto teóricas con las longitudes de contacto calculadas por elementos finitos	31
6.3. Tabla comparativa de fuerzas de laminación	32
6.4. Tabla comparativa de momentos de laminación	34
7.1. Elipse de cedencia de Von Mises para algunos estados de esfuerzos bajo condiciones de esfuerzo plano. [2] Página 287	37
8.1. Pantalla inicial del software Deform Integrated 2D3D	39
8.2. Pantalla inicial del preprocesador Deform	39
8.3. Pantalla de selección del tipo de problema plano	40
8.4. Selección del número de partes del problema y tipo de material	41
8.5. Selección del menú geometría	42
8.6. Datos geométricos de la plancha plana	43
8.7. Mallado de la plancha plana	43

8.8. Datos geométricos de los rodillos	44
8.9. Posicionamiento final del montaje	44
8.10. Definición del movimiento del rodillo	46
8.11. Definición de las relaciones entre los objetos del montaje	47
8.12. Definición de las relaciones entre los objetos del montaje (Parte 2) . .	48
8.13. Definición de las relaciones entre los objetos del montaje (Parte 3) . .	49
8.14. Ventana de Controles de Simulación	49
8.15. Ventana de control de Incremento de Pasos de Simulación	50
8.16. Ventana de control de Pasos de Simulación	51
8.17. Creación del archivo de base de datos	52
8.18. Uso de guías en modelo DEFORM3D de laminado plano, AL5052, L/h=0.5	53
8.19. Configuración avanzada de simulación	54
8.20. ProcessMonitor, indicador de estado de las simulaciones	54
8.21. Post-procesador de DEFORM3D	55
8.22. Ventana de extracción de datos del post-processor de DEFORM3D	56
8.23. Ventana de variables de estado del post-processor de DEFORM3D	57
9.1. Diagrama de flujo de los programas realizados en Matlab para rea- lizar la comparación de métodos de cálculo de fuerza y momento de laminación	59
9.2. Gráficas resultantes del programa Matlab Comparacion_metodos.m .	62
9.3. Distribución de los nodos afectados por la presión de los rodillos en un paso de laminación	78
9.4. Distribución de presiones obtenida de la parte de los datos de los archivos de DEFORM3D.	79
9.5. Método de cálculo del brazo de palanca, [6, pág 77]	80
10.1. Menú de material	90
10.2. Gráfica del comportamiento plástico del material	90
10.3. Gráfica logarítmica de los datos de la región plástica	91

10.4. Comparación de la aproximación y la curva real de comportamiento del material	92
11.1. Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=10 . . .	96
11.2. Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=10 . .	97
11.3. Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=5 . . .	98
11.4. Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=5 . .	99
11.5. Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=1 . . .	100
11.6. Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=1 . .	101
11.7. Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=0.5 . .	102
11.8. Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=0.5 .	103
11.9. Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=10 . . .	104
11.10 Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=10 . .	105
11.11 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=5	106
11.12 Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=5 . .	107
11.13 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=1 . . .	108
11.14 Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=1 . . .	109
11.15 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=0.5 . . .	110
11.16 Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=0.5 . .	111
11.17 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=0.1 . . .	112
11.18 Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=0.1 . .	113
11.19 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=10	115
11.20 Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=10	116
11.21 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=5	117
11.22 Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=5	118
11.23 Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=1	119

11.24	Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=1	120
11.25	Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.5	121
11.26	Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.5	122
11.27	Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.1	123
11.28	Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.1	124
12.1.	Graph2Vector GUI	125
12.2.	Graph2Vector GUI, paso 2	127
12.3.	Graph2Vector GUI, paso 3	127
12.4.	Graph2Vector GUI, paso 4	128

1. *Nomenclatura*

- t_0 : espesor inicial de la plancha a laminar [mm].
- t_f : espesor final de la plancha a laminar [mm].
- t : espesor medio de la plancha a laminar [mm].
- R : radio del rodillo usado en la laminación [mm].
- p : presión aplicada por el rodillo a la plancha a laminar, presión unitaria de laminado [MPa].
- v_0 : velocidad de entrada de la plancha en la laminadora [m/s].
- v_f : velocidad de salida de la plancha en la laminadora [m/s].
- v : velocidad de la lámina durante la laminación [m/s].
- L : longitud de contacto del rodillo con la plancha [mm].
- L/h : factor de forma.
- θ : ángulo de contacto del rodillo con la plancha [rad].
- ω : velocidad de giro del rodillo [rad/s].
- v_r : velocidad del rodillo en los puntos de contacto con la plancha [m/s].
- w : anchura de la plancha a laminar
- s : deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo.
- \bar{Y}_f : esfuerzo de fluencia promedio [MPa].

- ϵ : deformación real
- K : coeficiente de resistencia [MPa].
- n : exponente de endurecimiento por deformación
- σ_f : esfuerzo de fluencia uniaxial del material
- μ : coeficiente de rozamiento
- m^* : factor de cortante por fricción

Los subíndices $_0$ y $_f$ significan, respectivamente, antes y después del proceso de laminación. El subíndice $_m$ se refiere al promedio de la variable.

2. *Introducción*

Existen múltiples modelos de laminación en frío simplificados que nos permiten predecir la fuerza de laminación necesaria, momento que hay que aplicar y la potencia necesaria para llevar a cabo dicha laminación. Sin embargo cada uno de los modelos está basado en diferentes simplificaciones y supuestos que hacen que los resultados obtenidos difieran bastante entre ellos.

Para nuestro caso de estudio se analizarán los modelos de laminación en frío definidos por cuatro de los autores más importantes dentro de la bibliografía de procesos de fabricación. Los modelos de los que se partirá para realizar la comparación con el resultado del análisis de elementos finitos son: Schey, Kalpakjian, Alting y Groover.

Estas diferencias radican, entre otros factores, en el modelo de comportamiento elasto-plástico elegido para realizar la simplificación. Dos de los modelos para calcular la tensión a la que está sometida la lámina durante el proceso recurren directamente a la extracción de datos de la gráfica tensión-deformación mientras que los otros dos modelos calculan esta tensión a partir de datos del material.

Además otra gran diferencia entre el modelo de Schey y el resto de modelos son unos ciertos coeficientes de mayorazgo que el autor introduce en el cálculo de la fuerza de laminación y que hace que el resultado pueda llegar a duplicar o incluso triplicar el resultado de los otros métodos.

Esta situación hace que a día de hoy, con los modelos clásicos no haya una manera fiable de obtener la fuerza necesaria para realizar la laminación, recurriéndose en la mayoría de los casos a prueba y error.

3. *Objetivo*

El objetivo de este proyecto Final de Carrera es comparar el resultado obtenido de calcular la fuerza en diferentes casos de laminación en frío usando el método de los elementos finitos con las fórmulas tradicionales que modelan dichos procesos de laminación.

De esta comparación y análisis, se espera poder discernir qué modelo simplificado se aproxima más a la solución de elementos finitos, para cada caso de laminación.

Para la realización de este análisis se hará uso del software de elementos finitos DEFORM3D. Utilizando el software se modelarán los distintos casos de laminación propuestos para el estudio. Una vez se hayan modelado los distintos casos de laminación se analizará con el solver de elementos finitos propio del programa y se procederá a la extracción de resultados.

Una vez se tengan los resultados de fuerza y momento necesario para cada caso de laminación se hará una comparación con las fórmulas clásicas propuestas por los autores Schey, Kalpakjian, Alting y Groover.

Como cálculo adicional se realizará una comprobación del brazo de palanca necesario para llevar a cabo la laminación y la relación de la longitud del brazo de palanca con la longitud de contacto entre rodillo y lámina.

4. *Estado del Arte*

En este capítulo se tratará de explicar el modelado de un proceso de laminación en frío y las diferencias existentes entre los modelos propuestos por Schey, Groover, Alting y Kalpakjian.

Ha de tenerse en cuenta que nuestro objetivo final en el modelado de este proceso es la predicción de la fuerza de laminado a aplicar en los rodillos para obtener la reducción de espesor deseada. También se detallará el cálculo del momento que es necesario aplicar para llevar a cabo dicha laminación.

Para describir el proceso de modelado de laminación en frío se hará una descripción general de cada paso necesario para realizar dicho modelado, exponiendo las hipótesis y simplificaciones hechas por cada uno de los 4 autores que se van a analizar.

4.1. **Modelo de Groover**

Para poder modelar un proceso de laminación hace falta establecer un modelo de comportamiento del material para ser capaces de predecir la entrada en el régimen plástico y el comportamiento en la región elástica del material. Esto se debe a que la laminación es un proceso de formado de metales en el que el metal plastifica de forma permanente.

4.1.1. **Comportamiento del material**

En el formado de metales la región de la curva tensión-deformación que no es de interés para este proyecto es la región plástica. En la región plástica el comporta-

miento del material se puede expresar por medio de la curva de fluencia:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4.1.1)$$

Esta curva de fluencia es generalmente válida como la relación que define el comportamiento plástico del metal en el trabajo en frío.

La mayoría de los metales experimentan un aumento de su resistencia al deformarse a temperatura ambiente, esto se llama endurecimiento por deformación. Esto implica un aumento del esfuerzo aplicado para producir la deformación, superando este incremento de resistencia. El valor instantáneo de este esfuerzo se denomina esfuerzo de fluencia y viene determinado por:

$$Y_f = K\epsilon^n \quad (4.1.2)$$

Para analizar el caso de la laminación en frío se utiliza sin embargo el esfuerzo de fluencia promedio. El esfuerzo de fluencia promedio es el valor promedio de los esfuerzos sobre la curva esfuerzo-deformación verdadera desde el comienzo de la deformación hasta el valor máximo que ocurre durante este proceso. Esta curva se muestra en la figura 4.1. Si se integra la ecuación de la curva se obtiene la expresión para el esfuerzo de fluencia promedio indicado en (4.1.3).

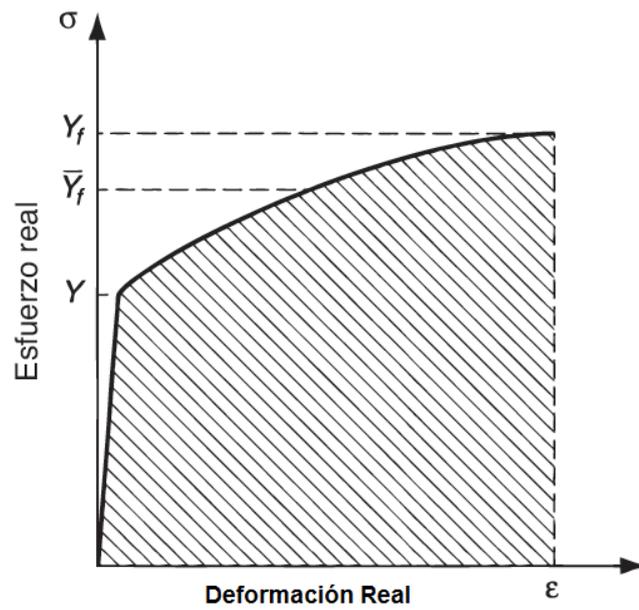


Figura 4.1: Curva de esfuerzo-deformación que indica la localización del esfuerzo de fluencia promedio \bar{Y}_f , en relación con la resistencia a la fluencia Y y el esfuerzo de fluencia final Y_f . [1] Página 382

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \quad (4.1.3)$$

4.1.2. Modelo matemático

El modelo teórico que se desarrolla en esta sección corresponde al elemento [1] de la bibliografía.

El laminado plano a tratar se refleja en la figura 4.2. En el laminado se presiona la plancha a trabajar entre los rodillos de forma tal que el espesor se reduzca de t_0 a t_f . Esta reducción de espesor se denomina draft y se expresa matemáticamente como:

$$d = t_0 - t_f \quad (4.1.4)$$

El draft puede a sus vez expresarse como una fracción del espesor inicial llamado

reducción:

$$r = d/t_0 \quad (4.1.5)$$

Durante el proceso de laminación se produce el fenómeno del esparcido, esto es, el ancho de la plancha a laminar aumenta, de forma que el volumen de la plancha final es igual al de la inicial, tal y como se muestra en la ecuación (4.1.6).

$$t_0 w_0 L_0 = t_f w_f L_f \quad (4.1.6)$$

En el proceso de laminación también se produce la conservación de la velocidad volumétrica del flujo de material, expresado como:

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f \quad (4.1.7)$$

La relación (4.1.7) indica que, puesto que existe una diferencia de espesor a la entrada de la salida, así como una diferencia de anchura de la plancha, debe darse también una variación gradual de la velocidad de la plancha a lo largo de la longitud de contacto L. Esta ley de velocidades viene dada por la ecuación (4.1.8).

$$v_0 < v_r < v_f \quad (4.1.8)$$

De la ecuación se puede deducir que existe un punto en la longitud de contacto L en la que la velocidad de la plancha, v , es igual a la velocidad del rodillo en el punto de contacto, v_r . Este punto se denomina punto neutro o punto de no deslizamiento. A ambos lados de este punto se producen deslizamientos y fricción entre los rodillos y el material de trabajo. De hecho, este deslizamiento se puede expresar en forma matemática como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (4.1.9)$$

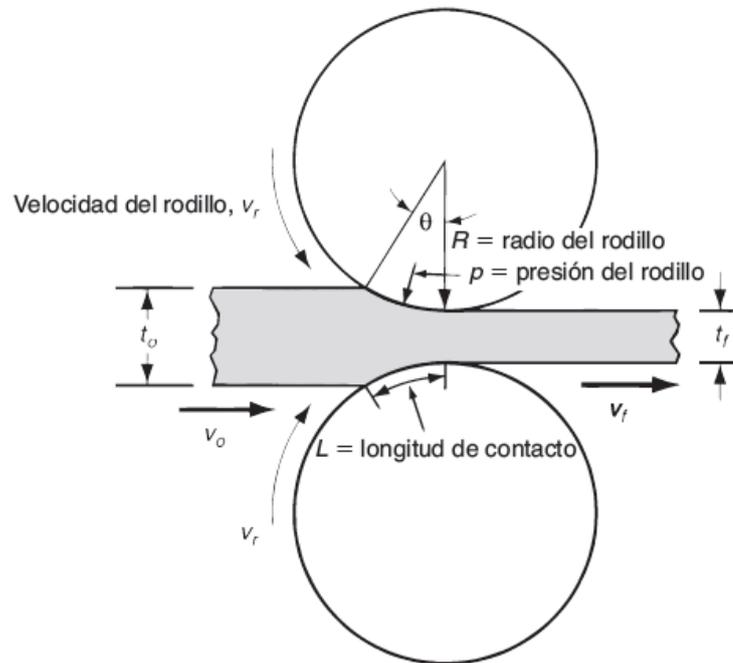


Figura 4.2: Vista lateral del laminado plano en la que se muestra el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características. [1] Página 394

La fricción se incluye en el modelo de laminación a través de un coeficiente de rozamiento, dando como resultado una cierta fuerza de fricción entre los rodillos y el material de trabajo. La fricción existente a lo largo de la longitud de contacto es diferente a un lado y a otro del punto neutro, no sólo en signo sino también en módulo. Esto hace que exista una fuerza neta que jala al material del trabajo a través de los rodillos. Debido a esto, existe un draft máximo teórico que se puede alcanzar según el coeficiente de rozamiento:

$$d_{max} = \mu^2 R \quad (4.1.10)$$

Una vez que se cuenta con la fricción necesaria para el laminado, se puede calcular la fuerza necesaria a aplicar para que los rodillos mantengan su separación. Esta fuerza se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado, p , sobre el área

de contacto, tal y como se muestra en la ecuación (4.1.11).

$$F = w \int_0^L p dL \quad (4.1.11)$$

La variación a lo largo de la longitud de contacto de la presión unitaria tal y como se muestra en la figura 4.3 hace que la fuerza se tenga que integrar en dos tramos, antes y después del punto neutro. La presión alcanza su máximo en el punto neutro y luego se desvanece a ambos lados del mismo. Al aumentar la fricción la presión aumenta al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se desplaza hacia la salida, a fin de mantener una fuerza neta que jale de la pieza de trabajo.

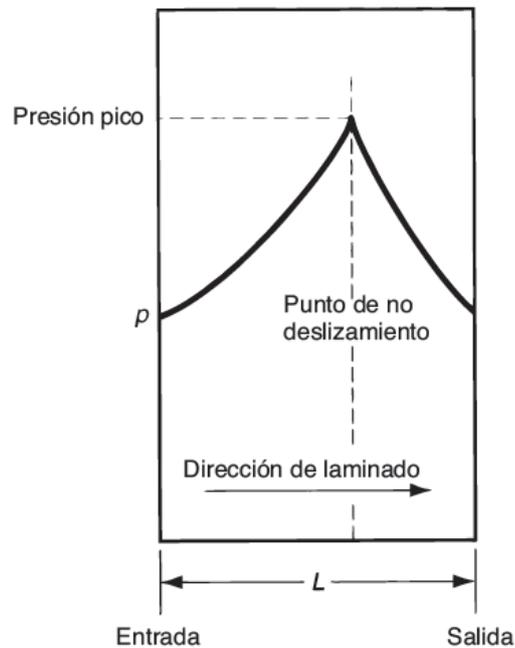


Figura 4.3: Variación típica de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 19.9, es la fuerza de laminación F . [1]

Página 395

La ecuación (4.1.11) puede aproximarse utilizando el esfuerzo de fluencia prome-

dio que experimenta el material al pasar entre los rodillos, visto en (4.1.3).

$$F = \bar{Y}_f w L \quad (4.1.12)$$

Asimismo se puede utilizar una aproximación para calcular el valor de L, longitud de contacto, que viene definida por:

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (4.1.13)$$

Para calcular el momento de torsión en laminado se puede suponer que la fuerza que ejercen los rodillos se centra en el trabajo, conforme pasa entre ellos, con un brazo de palanca igual a la mitad de la longitud de contacto, por lo que el momento de torsión para cada rodillo sería:

$$T = 0.5FL \quad (4.1.14)$$

4.2. Modelo de Schey

4.2.1. Modelo de forja continuo

Se hace necesario establecer una analogía entre el proceso de laminación y el proceso de forja continuo para poder modelar la laminación en frío y realizar el análisis.

Si se compara la figura 4.8(b) con la figura 4.4 se puede comprobar que la longitud proyectada del arco del contacto de la pieza de trabajo con el rodillo se puede tomar como la L de la herramienta de forja, ya que la fluencia del material se produce en la dirección de la mayor longitud de la plancha. Esta longitud L se puede aproximar por:

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (4.2.15)$$

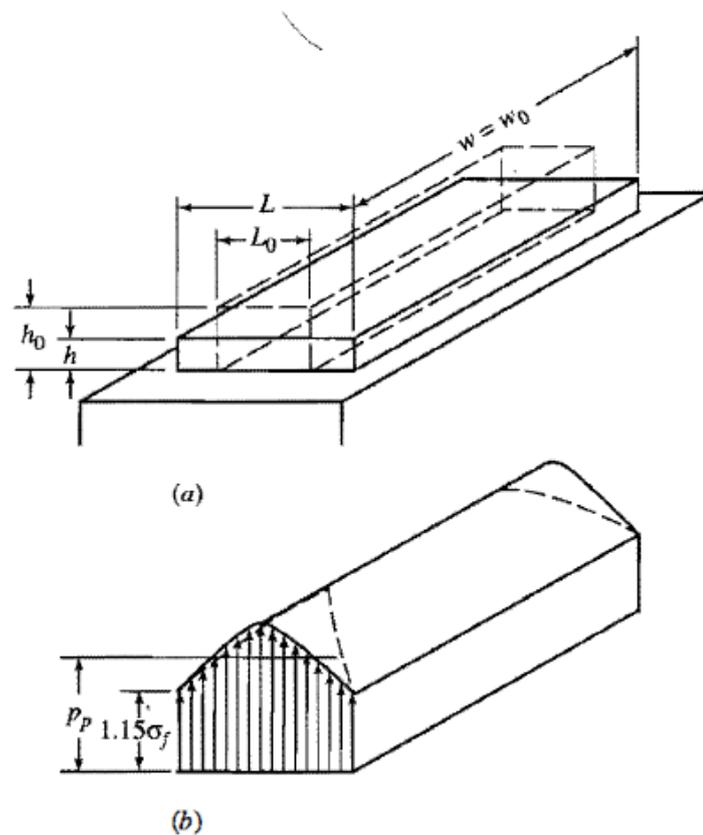


Figura 4.4: Al recalcar una pieza rectangular de trabajo, (a) el material fluye en dirección de la menor resistencia, marcada como L ; (b) ahora lo colina de fricción tiene forma de cresta. [2] Página 325

A continuación se pasará a describir los cuatro primeros pasos del análisis del proceso de forjado de una pieza de trabajo sobresaliente, que conforman la base para el estudio del proceso de laminación y que tienen que ver con la proporción entre t y L , donde t viene dado por:

$$t = \frac{t_0 + t_f}{2} \quad (4.2.16)$$

Esta distinción se realiza porque no se deforma al mismo tiempo toda la masa de la pieza de trabajo, lo que hace que el proceso no sea homogéneo, ni siquiera dentro de la zona de trabajo. Para juzgar el grado de homogeneidad del proceso se hará uso de la figura 4.5. La fluencia del material se produce en la dirección corta del yunque, la dirección L en la figura.

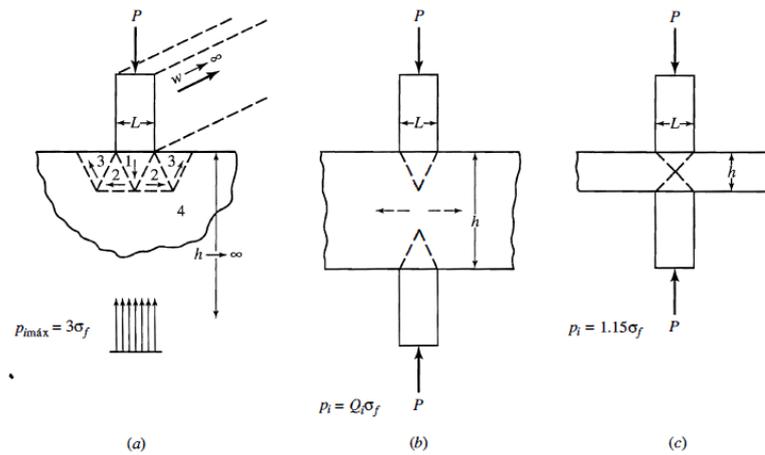


Figura 4.5: La deformación es (a) altamente no homogénea cuando se indenta un cuerpo semi infinito; (b) para valores h/L altos, la deformación aún es no homogénea; (c) sólo en $h/L = 1$ se aproxima la homogeneidad . [2] Página 297

(1) Si $t/L > 8.7$ (figura 4.5(b)) la situación es la misma que en la indentación de un cuerpo semiinfinito (figura 4.5(a)). Se puede demostrar que la presión de indentación necesaria, p_{imax} es aproximadamente 3 veces el esfuerzo de fluencia uniaxial del material σ_f .

$$p_{imax} = \sigma_f Q_{imax} = 3\sigma_f \quad (4.2.17)$$

(2) Si $8.7 > t/L > 1$ ambas zonas interactúan gradualmente y requieren cada vez menos fuerza para mantener la deformación plástica (figura 4.5(b)). Esto hace que el factor de multiplicación de la presión también disminuye, pudiendo obtenerse éste de la figura 4.6. Por tanto la presión de indentación es:

$$p_i = 1.15\sigma_f Q_i \quad (4.2.18)$$

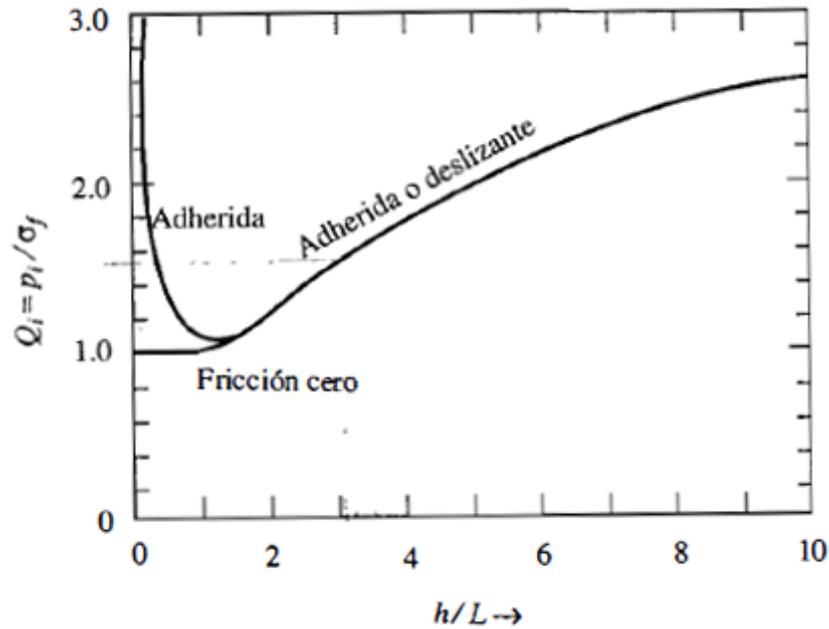


Figura 4.6: Los presiones necesarios para indentar una pieza de trabajo se elevan con h/L , pero son independientes de la fricción. [2] Página 329

(3) En una razón $h/L = 1$ ambas zonas de deformación cooperan por completo (figura 4.5(c)) y el material fluye a una presión mínima ($1.15\sigma_f$).

(4) Cuando $h/L < 1$ la fricción es significativa y el factor de multiplicación de la presión ha de obtenerse de acuerdo a la ecuación (4.2.19) o (4.2.20), según cómo venga dada la fricción.

$$p_p = 1.15\sigma_f \left(1 + \frac{m^* L}{4 h}\right) \quad (4.2.19)$$

$$p_p = 1.15\sigma_f Q_p \quad (4.2.20)$$

El valor de Q_p se puede obtener de la figura 4.7.

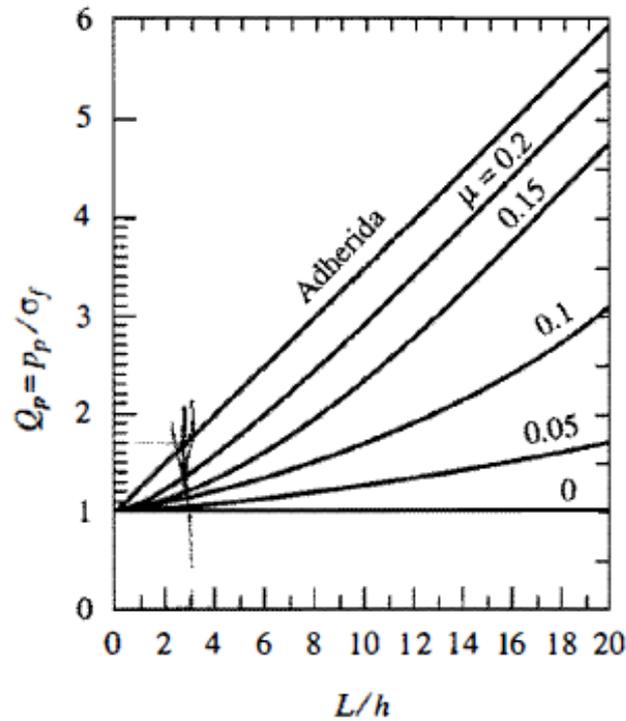


Figura 4.7: Las presiones promedio al recalcar una plancha rectangular se incrementan con la fricción y con la razón L/h . [2] Página 326

4.2.2. Modelo de laminado

Al igual que en el método de Groover [1], el método de Schey [2] impone unas condiciones mínimas de fricción. Estas condiciones vienen determinadas por la ecuación (4.2.21). Ésta implica que la componente horizontal de la fuerza de rozamiento ha de ser mayor que la opuesta de la fuerza de los rodillos en el punto de entrada de la lámina de trabajo.

$$\tan\theta \leq \mu \quad (4.2.21)$$

De igual forma que en el apartado anterior, debido a condiciones de la geometría de paso existe un máximo de reducción de espesor, que viene dado por la ecuación (4.1.10).

$$d_{max} = \mu^2 R \quad (4.1.10)$$

El esquema del modelo de laminación se muestra en la figura 4.8. Una vez la pieza entra en la separación de los rodillos, existe un plano en el que la velocidad de la pieza de trabajo es igual a la velocidad del rodillo en el punto de contacto (ecuación (4.1.8)). Este plano se llama plano neutro, y al disminuir la fricción entre la pieza de trabajo y el rodillo este plano neutro se mueve hacia la salida hasta alcanzar el deslizamiento entre pieza de trabajo y rodillo en casos con una fricción muy baja. Es en este plano en el que se produce el pico de tensión en la compresión que conlleva el laminado, tal y como se puede observar en la figura 4.8(b).

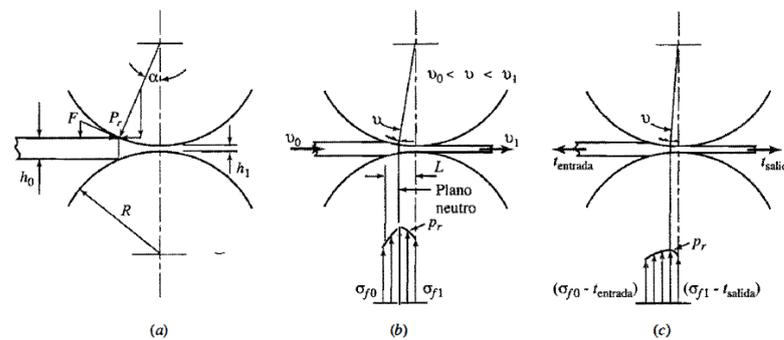


Figura 4.8: En la laminación plana (a) el ángulo de aceptación limita la reducción obtenible; y (b) el plano neutro desarrollado en condiciones de estado estable (c) se puede desplazar y las presiones se reducen por la aplicación de tensiones. [2] Página 380

Para poder estimar las fuerzas necesarias en el proceso de laminado, Schey establece una analogía con el proceso de forja continuo, el cual se se ha analizado en la subsección 4.2.1 hasta el paso 4. Para el proceso de laminado se analizarán de los pasos 5 en adelante:

(5) $\dot{\epsilon}$ se tomará como la tasa promedio de deformación, definida como:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\nu}{L} \ln \frac{t_0}{t_f} \quad (4.2.22)$$

(6) Se empleará el esfuerzo de fluencia promedio σ_{fm} tal y como se muestra en la ecuación (4.1.3), ya que es un proceso de estado estable.

(7) Se verificará la homogeneidad de deformación del proceso según se ha explica-

do en la subsubsección 4.2.1, eligiendo según corresponda el factor de multiplicación Q_i o Q_p .

(8) La fuerza del rodillo se obtiene de una de las ecuaciones siguientes, según sea el grado de homogeneidad de la deformación:

$$P_r = 1.15\sigma_{fm}Q_iLw \quad (4.2.23)$$

$$P_r = 1.15\sigma_{fm}Q_pLw \quad (4.2.24)$$

Para calcular el par de torsión necesario para girar los rodillos se puede obtener suponiendo que la fuerza de éstos actúa en la mitad del arco de contacto, de manera que el brazo de palanca es igual a $L/2$, siendo el momento de torsión para ambos rodillos:

$$M_r = \frac{2P_rL}{2} = P_rL \quad (4.2.25)$$

4.3. Modelo de Kalpakjian

4.3.1. Modelo matemático

El esquema del proceso de laminación en frío según Kalpakjian [3] se muestra en la figura 4.9(a). Se produce una reducción de espesor de la lámina desde un espesor inicial t_0 hasta el final t_f . La velocidad superficial de los rodillos es v_r (definida como $v_r = \omega R$).

La lámina entra con una velocidad inicial v_0 , esta velocidad aumenta hasta la de salida V_f pasando por un valor en el que la velocidad de la lámina es igual a la velocidad superficial del rodillo. El punto donde se produce esta igualdad de velocidad se denomina punto neutro o punto de no deslizamiento. A la izquierda de este punto el rodillo se mueve más rápido que la lámina, a la derecha del punto neutro la lámina se mueve más rápido que el rodillo. Esto hace que las fuerzas de fricción que se oponen al movimiento actúen sobre la lámina tal y como se muestra en la figura 4.9(b).

Dado que la velocidad superficial del rodillo se considera constante, existe un deslizamiento relativo entre la lámina y los rodillos a lo largo del arco de contacto L , que se define como:

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (4.3.26)$$

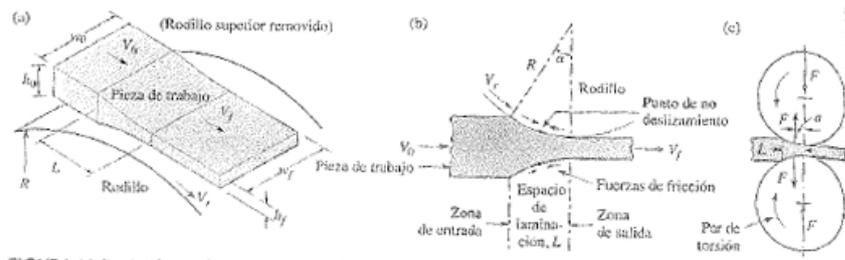


Figura 4.9: (a) Ilustración esquemática del proceso de laminado plano. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la tira. (c) La fuerza de laminado, F , y el par de torsión que actúa sobre los rodillos. El ancho w de la tira por lo general aumenta durante el laminado. [3] Página 322

Tal y como se observa en la figura 4.9(b) existe una fuerza de fricción neta que actúa hacia la derecha y que "tira" del material hacia dentro del espacio de laminación. Por tanto la fuerza de fricción a la izquierda del punto neutro debe ser mas elevada que la fuerza de fricción a la derecha.

A pesar de que la fricción es necesaria en el proceso de laminación, se disipa energía para vencerla, con lo que los requerimientos de fuerza y potencia aumentan. Se intenta llegar siempre a un punto medio. La ecuación que relaciona el draft máximo con el coeficiente de rozamiento, al igual que en los métodos anteriores, se define como:

$$t_0 - t_f = \mu^2 R \quad (4.3.27)$$

Por tanto cuanto mayor sea el radio de los rodillos y el coeficiente de rozamiento mayor será el draft que se puede conseguir con el proceso de laminación. Esto supone un problema con el modelo de Kalpakjian ya que la fórmula que seguidamente se

desarrollará para calcular la fuerza necesaria de laminación está estimada para el caso de fricción nula, lo que hace que los resultados diverjan de la realidad.

Nótese que la fuerza de laminación en el esquema de la figura 4.9(c) está aplicada perpendicularmente a la lámina en lugar de estar en ángulo, en concordancia con el arco de contacto. Se trata de una aproximación ya que a efectos prácticos, el arco es tan pequeño, en comparación con el tamaño de los rodillos, que se puede considerar casi plano.

La fuerza de laminación según el modelo de Kalpakjian viene dada por:

$$F = LwY_{avg} \quad (4.3.28)$$

Y_{avg} es el esfuerzo promedio real de la tira en el espacio de laminación. Este esfuerzo se obtiene de la curva tensión-deformación del material del siguiente modo:

$$Y_{avg} = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (4.3.29)$$

Donde Y_1 corresponde al esfuerzo real del material antes de entrar en la laminación (comúnmente a deformación real nula $\epsilon_1 = 0$, e Y_2 corresponde al esfuerzo real del material después de la deformación causada por la laminación. La deformación real para obtener el valor se calcula como sigue:

$$\epsilon_2 = \ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right) \quad (4.3.30)$$

Para calcular el par de torsión por rodillo se puede suponer que la fuerza de laminación actúa en la mitad del arco de contacto, siendo por tanto el brazo de palanca igual a $L/2$. El par de torsión de laminación queda por tanto para ambos rodillos:

$$M = FL \quad (4.3.31)$$

4.4. Modelo de Alting

4.4.1. Modelo matemático

El modelo de Alting [4] se obtiene de aproximar el proceso de laminación, figura 4.10, al forjado de barras. En la analogía que se establece, la barra (la lámina en el caso de la laminación) se produce por sucesivos procesos de forja a lo largo de la barra (lámina).

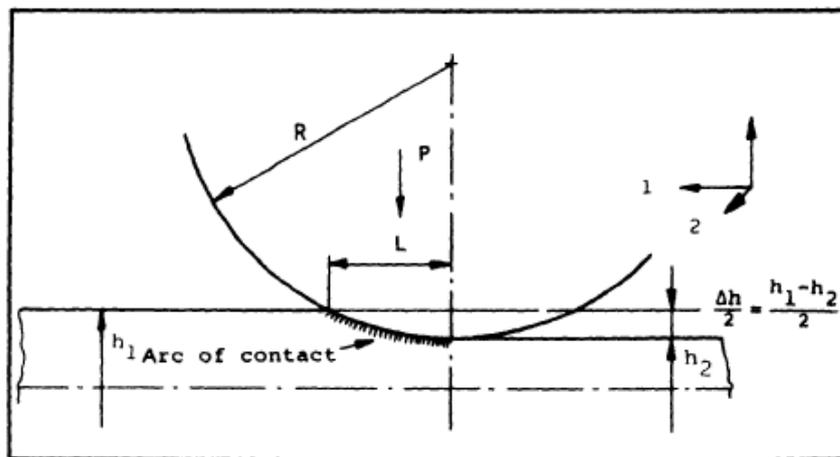


Figura 4.10: Esquema del proceso de laminación. [4] Página 164

El problema está en que la tensión de fluencia del material aumenta desde el valor inicial en la entrada del proceso de laminación, momento en que el espesor es t_0 , hasta el valor de salida, en el que el espesor es t_f . Se hace por tanto necesario definir una tensión de fluencia media del material, definida como $\sigma_{3,m}$. El sufijo 3 indica la dirección de la tensión principal (ver figura 4.10).

Suponiendo que la curvatura de los rodillo se puede despreciar, ya que el tamaño de los rodillos se considera mucho mayor que el tamaño de la pieza de trabajo, la fuerza de laminación se define como:

$$P = -\sigma_{3,m}wL \quad (P \text{ definida positiva}) \quad (4.4.32)$$

Para la aproximación que aquí se lleva a cabo es válido considerar que el incremento de la anchura de la lámina es nulo, $\Delta w = 0$, con lo cual se puede aproximar

a un problema de deformación plana, quedando los estados tensionales y de deformación del siguiente modo:

$$\epsilon_1 = -\epsilon_3; \epsilon_2 = 0 \quad (4.4.33)$$

$$\sigma_1 \simeq 0; \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \sigma_3 \quad (4.4.34)$$

Consecuentemente, aplicando el criterio de Von Mises para deformación plana, y tomando los valores promediados, se obtiene que el valor para $-\sigma_{3,m}$ es el expresado en la ecuación (4.4.35).

$$-\sigma_{3,m} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{0,m} \quad (4.4.35)$$

$\sigma_{0,m}$ se refiere al valor promedio de la tensión de fluencia uniaxial del material. Este valor se puede obtener de la curva tensión-deformación real del material de forma similar a como se hacía en la ecuación (4.3.29).

$$\sigma_{0,m}(\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1) = \int_{\bar{\epsilon}_1}^{\bar{\epsilon}_2} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \simeq 0.5(\sigma_{0,1} + \sigma_{0,2}) \quad (4.4.36)$$

El valor del arco de contacto, al igual que en el resto de autores, se aproxima según:

$$L^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 \simeq R\Delta h \quad (4.4.37)$$

Por tanto sustituyendo las ecuaciones (4.4.37) y 4.4.35 en la ecuación 4.4.32 se obtiene que la fuerza de laminación es:

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{0,m}w(R\Delta h)^{1/2} \quad (4.4.38)$$

El modelo de Alting considera que las fuerzas de rozamiento aumentan en un 20 el requerimiento de fuerza de laminado por tanto, si se tiene en cuenta la fricción:

$$P^* = 1.2\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{0,m}w(R\Delta h)^{1/2} \quad (4.4.39)$$

El momento necesario a aplicar para llevar a cabo la laminación se puede calcular suponiendo que la fuerza de laminación actúa en el mitad de la longitud de contacto L , por lo que el par de laminación para ambos rodillos se calcula según:

$$M = P^*L \quad (4.4.40)$$

5. *Modelado con DEFORM3D de un proceso de laminación*

Hoy en día el método de los elementos finitos se ha convertido en una herramienta muy importante en la simulación de procesos de fabricación. Los programas de elementos finitos permiten ahorrar tiempo y coste en los procesos de fabricación, reduciendo los tiempos necesarios de las pruebas previas al comienzo de la fabricación en serie.

Mediante el uso del programa de elementos finitos DEFORM3D se procederá a modelar y simular varios casos de procesos de laminación en frío a fin de posteriormente ser capaces de extraer el valor de la fuerza y momento aplicados durante el proceso de laminación, para finalmente compararlos con los resultados obtenidos de los modelos clásicos.

5.1. **Definición de los casos de simulación**

Con el objetivo de realizar un análisis lo suficientemente amplio de laminación en frío, se propone en este proyecto analizar el proceso para 3 materiales distintos:

- AISI 1008 Carbon Steel (Acero al carbono)
- Aluminium 5052 (Aluminio)
- CARTRIDGE BRASS (Latón)

Asimismo, para cada uno de estos tres materiales, se simularán 5 casos de laminación en frío, variando en cada caso la relación L/h , es decir, la relación entre la

longitud de contacto rodillo-lámina y el espesor medio. Los distintos casos de L/h son los siguientes para los 3 materiales:

- $L/h = 10$
- $L/h = 5$
- $L/h = 1$
- $L/h = 0.5$
- $L/h = 0.1$

Para tener una referencia del coeficiente de rozamiento necesario para llevar a cabo la laminación se ha recurrido a la tabla 8.4 del libro de Schey [2], página 295, que se muestra en la figura 5.1. Durante el proceso de simulación algunos de estos valores han sido cambiados puesto que los rodillos patinaban debido a coeficientes de fricción bajos para esas condiciones de contorno de laminación, como se puede observar en la figura 5.2.

Tabla 8-4

Material de la pieza de trabajo	Trabajo	Laminado	
		Lubricante	μ
Aleaciones de Sn, Pb, Zn	Caliente o tibio	FA-MO o	0.05
		MO-EM	0.1
Aleaciones de Mg	Caliente o tibio	MO-FA-EM	0.2
Aleaciones de Al	Caliente	MO-FA-EM	0.2
	Frío	1-5% FA en MO(1-3)	0.03
Aleaciones de Cu	Caliente	MO-EM	0.2
	Frío	MO-EM	0.1
Aceros	Caliente	Ninguno o GR-EM	ST ‡ 0.2
	Frío	10% FO-EM	0.05
Acero inoxidable, Ni y aleaciones	Caliente	Ninguno	ST ‡
	Frío	FO-CL-EM o CL-MO	0.1 0.05
Aleaciones de Ti	Caliente		
	Frío	MO	0.1

Figura 5.1: Valores tabulados del coeficiente de fricción en procesos de laminación, [2]

Finalmente se muestra en la figura 5.2 la tabla que resume los valores de los parámetros de simulación para todos los casos. Estos valores se refieren a tamaño de rodillo, reducción de espesor, coeficiente de rozamiento aplicado...

Material	μ	R [mm]	h0 [mm]	hf [mm]	Draft [mm]	Vel Giro [rpm]	L/hm	L/hm teo	Draft máximo
AISE-1008	0,05	700	4	2,5	1,5	68,20926132	9,97037031	10	1,75
AISE-1008	0,05	700	6,5	5,25	1,25	68,20926132	5,03496152	5	1,75
AISE-1008	0,05	500	23	22	1	95,49296585	0,99380799	1	1,25
AISE-1008	0,05	400	35	34,25	0,75	119,3662073	0,50023128	0,5	1
AISE-1008	0,05	300	122,75	122,25	0,5	159,1549431	0,09997917	0,1	0,75
AL-5052	0,03	700	2,25	1,7	0,55	68,20926132	9,93489462	10	0,63
AL-5052	0,03	700	4	3,5	0,5	68,20926132	4,98887652	5	0,63
AL-5052	0,12	500	14,3	13,9	0,4	95,49296585	1,00298834	1	7,2
AL-5052	0,12	400	22,1	21,8	0,3	119,3662073	0,49906383	0,5	5,76
AL-5052	0,13	300	77,55	77,35	0,2	159,1549431	0,10001248	0,1	5,07
CARTRIDGE-BRASS	0,1	700	9,5	3,5	6	68,20926132	9,97037031	10	7
CARTRIDGE-BRASS	0,1	700	14,25	9,25	5	68,20926132	5,03496152	5	7
CARTRIDGE-BRASS	0,1	500	46,75	42,75	4	95,49296585	0,99935999	1	5
CARTRIDGE-BRASS	0,11	400	71	68	3	119,3662073	0,49843189	0,5	4,84
CARTRIDGE-BRASS	0,15	300	246	244	2	159,1549431	0,09997917	0,1	6,75

Figura 5.2: Valores de las variables de laminación para todos los casos de simulación

5.2. Modelado con DEFORM3D

5.2.1. Modelado de partes

Aunque el proceso completo de modelado 2D de un problema de laminación se ejemplifica extensamente en el Anexo II con un ejemplo, en esta sección se hará un breve repaso de los pasos básicos para simular nuestro modelo.

En primer lugar, tal y como se explica en la sección 8.1, hay que modelar las partes de que se compone un modelo básico de un proceso de laminación, es decir:

- Lámina (pieza de trabajo)
- Rodillo superior
- Rodillo inferior

Como se puede observar se ha elegido el modelo más simple posible de un proceso de laminación. Esto se debe a que los modelos teóricos con los que se piensa comparar los resultados obtenidos por elementos finitos se corresponden también con esta configuración. Se deja para posibles estudios posteriores el caso de un proceso de laminación con molino de rodillos.

En la elección del tipo de objeto se han definido ambos rodillos como objetos rígidos y la lámina como un objeto plástico. Esta elección se ha hecho de acuerdo a los consejos recogidos en la sección 2.4.1.4 de DEFORM2D V10.2 System Manual [7].

Asimismo la elección del tipo de material variará según los casos especificados en el apartado anterior.

Puesto que se ha realizado una simulación 2D del proceso de laminación se ha supuesto que la deflexión de los rodillos es despreciable. Esto hace que la elección de los rodillos como objetos rígidos nos permita reducir el tiempo que necesita el solver para resolver la ecuaciones, sin tener una pérdida significativa de precisión en el resultado.

La elección de la lámina como un objeto plástico, nos permite obtener buenos resultados al modelar y simular un proceso de laminación. Se ha elegido este tipo de objeto frente al tipo elasto-plástico ya que la "recuperación (springback)" no es un efecto importante en un proceso de laminación.

5.2.2. Modelado del movimiento de las partes y relación entre las partes

Para modelar el movimiento de las partes se parte de la premisa de tener una velocidad aproximada de laminación de 5 m/s. Por tanto se ha particularizado la velocidad de los rodillos en cada caso de laminación según su radio para cumplir esta condición, tal y como puede observarse en la figura 5.2. El proceso de configuración de la velocidad de giro de los rodillo se explica en la sección 8.1.

Para asegurar la laminación se ha partido de una lamina ya "indentada" por los rodillos, y en todos los casos con un valor del coeficiente de rozamiento que cumple la ecuación 5.2.1a. Este coeficiente de rozamiento entre las diferentes partes se define tal y como se explica en la sección 8.1.

$$dr a f_{max} < \mu^2 R \quad (5.2.1a)$$

5.2.3. Configuración de los parámetros de simulación

La configuración en el programa DEFORM3D de los parámetros de simulación se explican en la sección 8.1, sin embargo se tratará de justificar en esta sección la elección de dichos parámetros frente a otros.

En primer lugar, tal y como se muestra en la figura 5.3, se ha elegido una simulación de deformación plana. En este tipo de simulaciones se asume que la deformación en la dirección perpendicular a la cara visible de la lámina es nula y que se comporta de manera idéntica en cualquier sección paralela a esta cara de la lámina. En los modelos teóricos definidos en el capítulo anterior se realiza la misma simplificación, lo cual permite intentar reproducir de manera más fiable dichos modelos.

La elección de "Lagrangian Incremental" como método de resolución del modelo se debe a que explícitamente en la sección 2.1.1. de [7] se aconseja este tipo de solver para problemas de laminación.

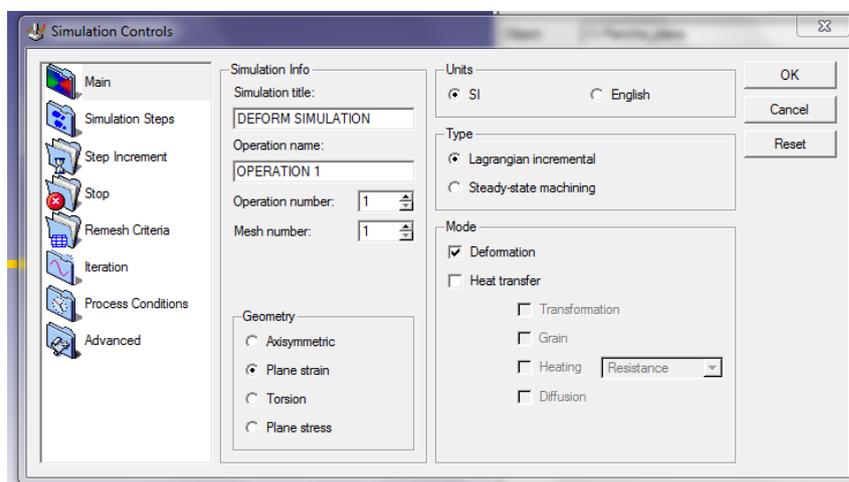


Figura 5.3: Ventana de Controles de Simulación

La elección de pasos de integración ha variado según el caso, pero de manera general se toma como variable con el tiempo, con un incremento de 0.01. Esto hace que poniendo normalmente 170 pasos de integración, la simulación tenga una duración de 1.7 segundos. Teniendo en cuenta que la velocidad de laminación es aproximadamente 5 m/s esto hace que se haya laminado 8.5 metros de placa. Estos parámetros se han considerado válidos y suficientes para los casos de simulación.

6. *Comparación de los resultados obtenidos*

El resultado de cada una de las simulaciones realizadas se encuentra en el Anexo IV, junto con los datos iniciales que permiten configurar el problema.

Lo que se pretende hacer en este capítulo es un breve análisis de los resultados, intentando comparar los resultados teóricos con los resultados obtenidos por medio de elementos finitos, viendo cuál se ajusta mejor según el caso a la solución de DEFORM3D.

Para ello se procederá a hacer un análisis diferenciando material y factor de forma L/h . Además se propone en este capítulo otra comparación, como la longitud de contacto teórica frente a la longitud de contacto calculada.

6.1. **Comparación de longitudes de contacto**

Ha de tenerse en cuenta que la fórmula utilizada para el cálculo de la longitud de contacto para todos los modelos teóricos vistos en este proyecto provienen de la ecuación de Hitchcock [8] :

$$l'_D = \sqrt{\left[\frac{8R(1-\mu^2)K_{wm}}{\pi E}\right]^2 + (h_1 - h_2)R} + \frac{8R(1-\mu^2)K_{wm}}{\pi E} \quad (6.1.1)$$

Suponiendo que el rodillo es infinitamente rígido en comparación con la lámina se llega a la simplificación empleada en los modelos teóricos ($E \rightarrow \infty$):

$$L = \sqrt{R\Delta h} \quad (6.1.2)$$

El método seguido para el cálculo de la longitud de contacto según los resultados obtenidos por elementos finitos es calcular cada longitud de los segmentos conforman los arcos de contacto mostrados en la figura 6.2. Se suman por un lado los segmentos del arco superior y por otro los del arco inferior, realizándose posteriormente una media de ambos resultados. Los puntos que conforman los arcos son los nodos de la malla de la lámina que están afectados por la compresión de los rodillos en cada paso de integración. Para calcular la longitud de contacto final se vuelve a hacer una media de todos los resultados obtenidos en cada paso de simulación.

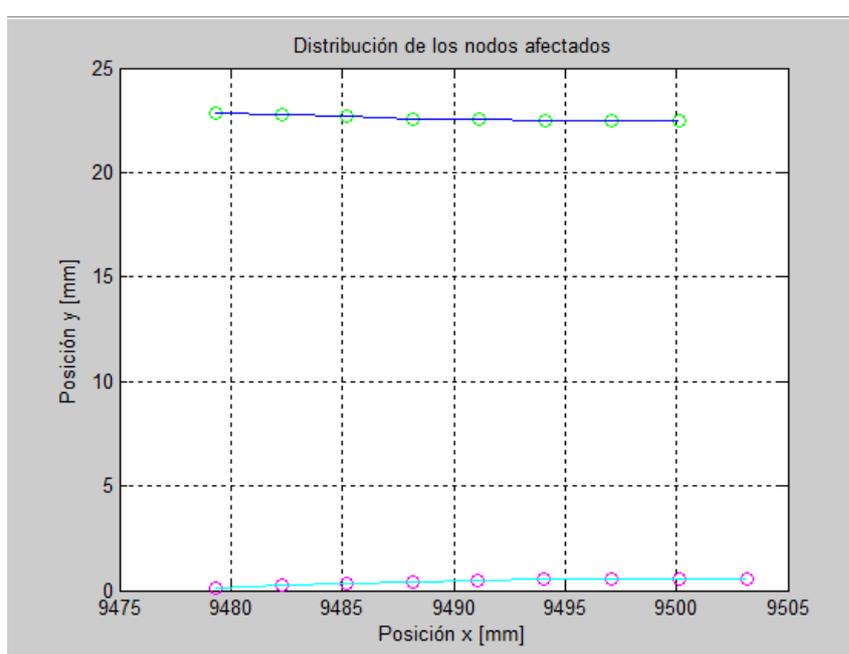


Figura 6.1: Distribución de los nodos afectados por la presión de los rodillos en un paso de laminación

Los resultados obtenidos de comparar las longitudes de contacto teóricas y por elementos finitos se muestran en la figura 6.2.

Material	L/hm teo	Diferencia L
AISE-1008	10	3%
AISE-1008	5	9%
AISE-1008	1	9%
AISE-1008	0,5	5%
AISE-1008	0,1	--
AL-5052	10	33%
AL-5052	5	10%
AL-5052	1	24%
AL-5052	0,5	3%
AL-5052	0,1	33%
CARTRIDGE-BRASS	10	2%
CARTRIDGE-BRASS	5	8%
CARTRIDGE-BRASS	1	8%
CARTRIDGE-BRASS	0,5	10%
CARTRIDGE-BRASS	0,1	4%

Figura 6.2: Comparación de las longitudes de contacto teóricas con las longitudes de contacto calculadas por elementos finitos

Como se puede observar en el caso del acero AISI1008 la diferencia no es demasiado grande, oscilando entre el 3 y el 9%. Esta variabilidad hará que difieran los resultados de cálculo del momento de laminación entre los modelos teóricos y el de elementos finitos aunque no demasiado.

Sin embargo para el caso del aluminio AL5052, a excepción del caso $L/h=0.5$, las diferencias van del 10 al 33%. Estas diferencias harán que posteriormente, al calcular el momento de torsión de laminación, las diferencias entre unos modelos y otros se acentúen.

Para el caso del latón Cartridge Brass, de nuevo, las diferencias entran dentro del rango del acero, colocándose entre el 2 y el 10% dependiendo del caso.

6.2. Comparación de fuerzas de laminación

Se muestra en la figura 6.3 el resultado de comparar las fuerzas de laminación para cada modelo teórico con la fuerza calculada por el método de elementos finitos según la fórmula mostrada en 6.2.3. Se muestran resaltados los modelos que ofrecen

un mejor ajuste para cada caso a los resultados obtenidos por elementos finitos.

$$\Delta F(\%) = \frac{F_{def} - F_{teo}}{F_{def}} \cdot 100 \quad (6.2.3)$$

	AISI1008				AL5052				BRASS			
	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian
L/h=10	45%	-2%	28%	60%	37%	-19%	9%	55%	49%	4%	50%	63%
L/h=5	47%	3%	23%	62%	46%	1%	19%	61%	37%	-2%	29%	54%
L/h=1	47%	2%	15%	62%	47%	1%	18%	61%	43%	-26%	-10%	59%
L/h=0,5	52%	-7%	24%	65%	60%	16%	40%	71%	52%	-38%	2%	65%
L/h=0,1	--	--	--	--	83%	30%	77%	88%	83%	18%	73%	88%

Figura 6.3: Tabla comparativa de fuerzas de laminación

6.2.1. Acero AISI1008

Como se puede apreciar en la tabla, en el caso del Acero AISI1008 el modelo de Schey para laminación se ajusta de forma casi exacta al resultado obtenido por medio de elementos finitos, con una diferencia máxima de un 7%. El segundo modelo que más se ajusta al resultado obtenido por elementos finitos es el de Groover, con una diferencia de fuerza de laminación que oscila entre el 15 y el 25%. Por último, los modelos de Alting y Kalpakjian difieren bastante del resultado obtenido por elementos finitos, estando la diferencia entre el 50 y 60% aproximadamente para ambos casos.

Se puede concluir por tanto que en el caso del acero, y para todos los casos de factor de forma L/h el modelo de Schey es que mejor se ajusta al resultado obtenido por elementos finitos.

6.2.2. Aluminio AL5052

Para el caso del Aluminio AL5052 la situación cambia ligeramente. El modelo de Alting comienza con una diferencia del 37% con respecto al resultado de elementos finitos en el caso de L/h=10, y esta diferencia va aumentando progresivamente hasta alcanzar un 83%. El modelo de Kalpakjian tiene una casuística similar al de Alting pero con una diferencia mayor respecto al modelo de elementos finitos.

El modelo de Schey en el caso del aluminio se ajusta bastante bien, con diferencias prácticamente despreciables en los casos de simulación en que L/h tiene un valor de entre 5 y 1. En los casos L/h igual a 10 y 0.5 el ajuste no es tan bueno como en los casos anteriores y en el último caso la diferencia alcanza hasta el 30 %.

Para el valor más alto de L/h el modelo de Groover es el que mejor se ajusta como se observa en la tabla. Para el resto de casos de simulación el modelo de Groover no se ajusta tan bien como el de Schey, aunque sí es mejor que los modelos de Alting y Kalpakjian.

En definitiva, de nuevo para la mayoría de casos el modelo de Schey ofrece mejores resultados aunque para el caso particular de $L/h=10$, el modelo de Groover es más conveniente para el AL5052.

6.2.3. Latón Cartridge Brass

En el caso del Cartridge Brass, los modelos de Alting y Kalpakjian dan malos resultados de entrada con diferencias que van desde el 40 hasta casi el 90 %.

Para los casos de L/h igual a 10 y 5 y para el caso de $L/h=0.1$ el modelo que mejor se ajusta sigue siendo el de Schey, sin embargo para relaciones de L/h entre 5 y 1 el modelo de Groover se ajusta mejor al resultado de elementos finitos.

6.3. Comparación de momentos de laminación

Se muestra en la figura 6.4 el resultado de comparar los momentos de laminación para cada modelo teórico con el momento calculado por el método de elementos finitos según la fórmula mostrada en 6.3.4. Ha de tenerse en cuenta que para el cálculo del momento de laminación por elementos finitos se ha hecho uso de la longitud de contacto calculada y del brazo de palanca calculado según se explica en la sección 9.7 del Anexo II. Igual que en el apartado anterior, se resaltan en la tabla los modelos que ofrecen un mejor ajuste al resultado obtenido por elementos finitos para cada caso de factor de forma.

$$\Delta M(\%) = \frac{M_{def} - M_{teo}}{M_{def}} \cdot 100 \quad (6.3.4)$$

	AISI1008				AL5052				BRASS			
	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian	Alting	Schey	Groover	Kalpakjian
L/h=10	43%	-5%	26%	59%	58%	20%	70%	70%	48%	3%	75%	63%
L/h=5	43%	-5%	58%	59%	52%	11%	64%	65%	32%	-9%	62%	51%
L/h=1	42%	-7%	54%	58%	41%	-10%	55%	57%	39%	-36%	41%	56%
L/h=0,5	50%	-12%	60%	64%	61%	18%	71%	72%	47%	-52%	46%	62%
L/h=0,1	--	--	--	--	88%	53%	92%	92%	82%	15%	86%	87%

Figura 6.4: Tabla comparativa de momentos de laminación

6.3.1. Acero AISI1008

Para el acero en todos los casos de L/h el modelo de Schey se ajusta mejor al resultado de elementos finitos que el resto de modelos teóricos aquí presentados para el cálculo de el momento de torsión de laminación.

Para los modelos de Alting y Kalpakjian, las diferencias oscilan en todos los casos entre el 45 y el 65 % de valor obtenido por elementos finitos.

Para el modelo de Groover, el primer caso es el que mejor se ajusta, con una diferencia de un 25 %, pero en el resto de casos se evidencia una diferencia bastante alta, alrededor del 55 %.

6.3.2. Aluminio AL5052

En el cálculo del momento de torsión para el aluminio se obtiene de nuevo que el mejor modelo para todos los casos es el de Schey, aunque el mejor ajuste se produce para los casos L/h igual a 5 y 1. Para el primer y penúltimo caso el resultado tiene una diferencia de alrededor el 20 % y para el caso de L/h más pequeño esta diferencia se duplica.

El resto de modelos simplemente no pueden reproducir el resultado del momento de torsión en laminado calculado por elementos finitos. Los valores calculados con los modelos de Alting, Groover y Kalpakjian tienen una variación bastante alta respecto al resultado de DEFORM3D. En cualquier caso, esta diferencia se reduce en el caso de L/h=1.

Para el caso L/h=0.1 la diferencia es tan alta que ninguno de los resultados obtenidos por los diferentes modelos debería considerarse válidos.

6.3.3. Latón Cartridge Brass

De nuevo para el latón, el modelo que mejor se ajusta para casi todos los casos es el modelo de Schey, salvo para el caso $L/h=0.5$, en el que el modelo de Groover se ajusta mejor. De todas formas la diferencia en este caso entre el resultado de Groover y Schey no es muy alta (en valor absoluto). Ha de tenerse en cuenta también que para el caso $L/h=1$ el modelo de Schey, aunque proporciona la mejor aproximación al resultado de elementos finitos, tiene una diferencia con éste de un 36 %.

Como se puede observar, salvo para el modelo de Schey, en el caso de L/h más pequeño las diferencias son muy grandes, alcanzando hasta el 87 % de diferencia. En el resto de casos, para todos los modelos, salvo el de Schey, las diferencias son sustanciales, rondando entre el 35 y el 65 % de diferencia de media.

7. *Conclusiones*

Como se ha podido comprobar en este proyecto, el modelo de laminación que más se ajusta al resultado obtenido por elementos finitos para la mayor parte de los casos ha sido el modelo de Schey. Para los pocos casos en los que el modelo de Schey no era el más propicio, el modelo de Groover ha obtenido resultados con un margen de error aceptable.

De igual modo ha quedado patente que tanto los modelos de Alting como de Kalpakjian no son capaces de reproducir prácticamente en ningún caso los resultados obtenidos a través del programa DEFORM3D, llegando incluso a diferencias relativas de hasta casi un 90 % en el valor calculado. En general los casos que mejor resultados dan, independientemente del modelo empleado, son aquellos con un factor de forma entre 5 y 0.5. Los casos extremos, $L/h=10$ y $L/h=0.1$ dan en general peores resultados, incluso resultados que no deberían considerarse válidos.

El hecho de que los resultados del modelo de Schey sean más parecidos con los resultados obtenidos por elementos finitos tiene que ver con el factor de multiplicación de la presión Q_i y el factor de intensificación de la presión Q_p respectivamente. Estos factores tienen en cuenta el grado de homogeneidad de la presión, esto es, la razón h/L .

Estos factores provienen de los estudios de los efectos de la fricción en los procesos de forja de matriz abierta de Schey con cilindros [10] combinados con las conclusiones de los estudios de J.F.W. Bishop sobre el efecto de la fricción en procesos de deformación de metales [11].

El único otro modelo que incluye los efectos de la fricción es el modelo de Alting, y sólo con un coeficiente de mayorazgo igual a al 120 % de la fuerza total calculada sin tener en cuenta los efectos de la fricción en la laminación fría.

Además de los factores de homogeneidad de la deformación, los modelos de Schey y Alting tienen en cuenta la corrección al esfuerzo de fluencia σ_f , que va multiplicado por el factor 1.15, corrección que ningún otro modelo aplica. Este factor se debe a que se tiene en cuenta que el modelo desarrollado está simplificado bajo hipótesis de deformación plana. Esta restricción impone un esfuerzo sobre el material en la dirección perpendicular al plano de laminación. Aplicando el criterio de Von Mises, el esfuerzo que se requiere para la deformación es $1.15\sigma_f$, tal y como se muestra en los puntos 4 de la figura 7.1.

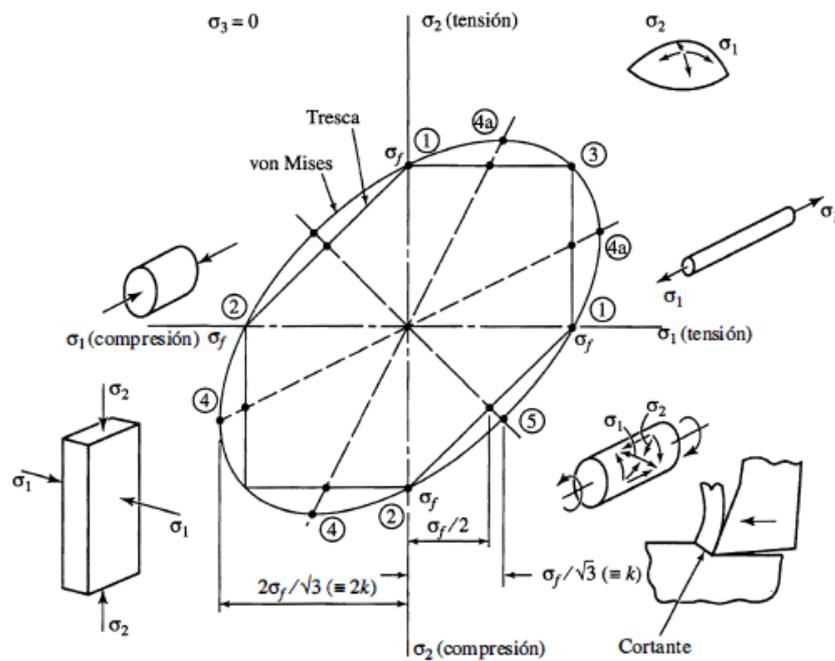


Figura 7.1: Elipse de cedencia de Von Mises para algunos estados de esfuerzos bajo condiciones de esfuerzo plano. [2] Página 287

En definitiva, el resto de métodos al no tener en cuenta los efectos de la fricción durante el proceso de laminación, ni las condiciones de tensión plana que introduce la simplificación de deformación plana (a excepción de leves correcciones en el modelo de Alting), no son capaces de reproducir correctamente los resultados obtenidos por elementos finitos.

8. *Anexo I: Ejemplos de modelado de procesos de laminación mediante el uso de DEFORM3D*

En este anexo se detallará el desarrollo de un modelo de laminación en frío en mediante el uso de la herramienta DEFORM3D. Los datos del modelo se encuentran a continuación

- Material: Aluminio AL5052
- Tamaño de la placa a laminar: 25x2000x300 mm
- Tamño de los rodillos de laminación: 250 mm
- Velocidad de los rodillos: 5,23 rad/s
- Coeficiente de rozamiento placa-rodillo: 0.03

8.1. **Modelado 2D del problema**

En esta sección se procederá a explicar detalladamente cómo se ha llegado a configurar el programa y a definir el problema a través del programa general. Para facilitar la comprensión de todas las operaciones llevadas a cabo se hará uso de capturas de pantalla que facilitarán las distintas explicaciones.

En primer lugar, para el caso 2D hacemos uso del programa Deform Integrated 2D3D, que forma parte de la suite Deform3D. La pantalla inicial del programa se muestra en la figura 8.1.

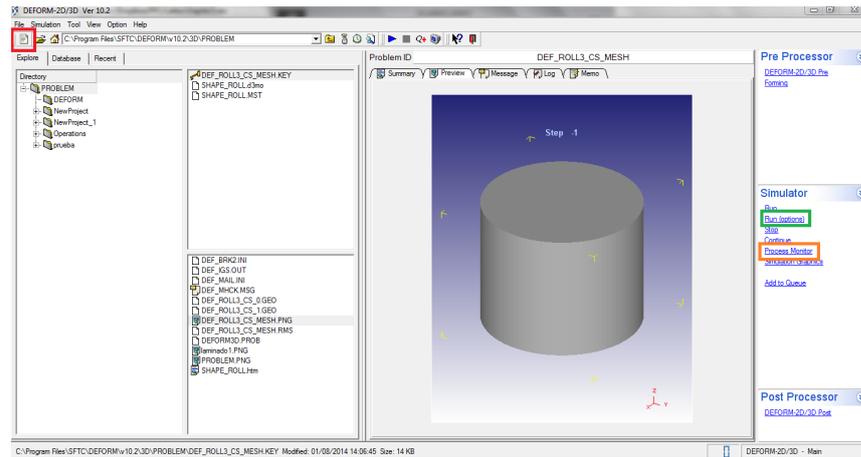


Figura 8.1: Pantalla inicial del software Deform Integrated 2D3D

En este proyecto no se ha hecho uso de ninguna plantilla preconfigurada del programa, por lo que se empezará con la definición general del problema. Para proceder con la definición del problema se usará el pre-procesador incluido en el software, para ello hay pulsar sobre la zona marcada con un recuadro rojo en la figura 8.1.

Las siguientes ventanas permitirán elegir el pre-procesador (se dejará el que viene por defecto), el directorio en el que se guardarán los archivos necesarios, y el nombre del proyecto, que para el ejemplo que se llevará a cabo se llamará *proyecto_laminacion*.

Una vez finalizado esto se abrirá otro programa que corresponde al pre-procesador del software Deform. La ventana que aparece se muestra en la figura 8.2.

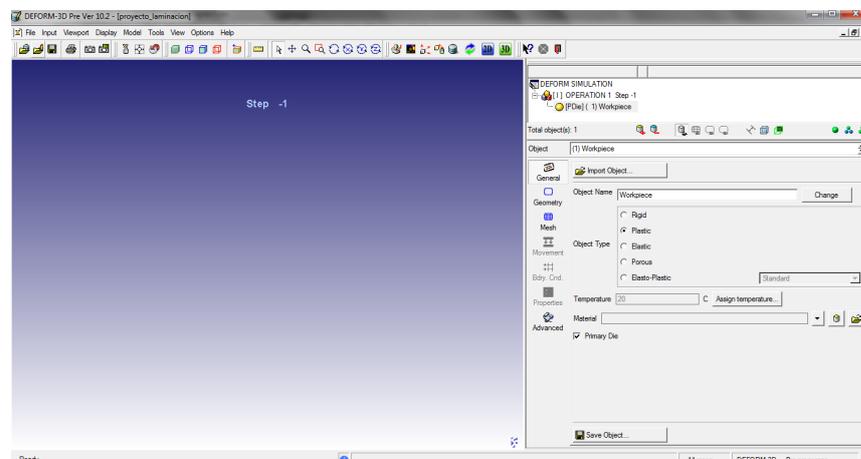


Figura 8.2: Pantalla inicial del preprocesador Deform

Definición de la partes y geometría del problema

En primer lugar se indica que se trata de un problema 2D pulsando en el botón recuadrado en azul en la figura 8.4. Luego, pinchando en el botón recuadrado en verde se accede a una ventana en el que se puede indicar que se trata de un problema de deformación plana, tal y como se muestra en la figura 8.3.

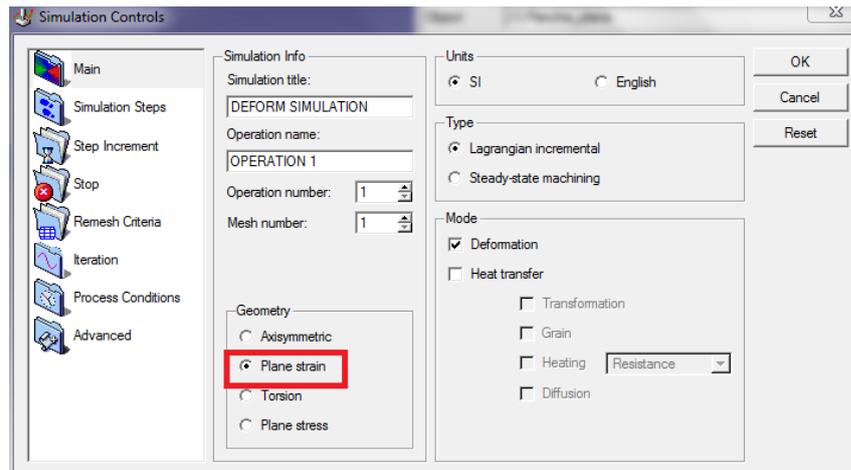


Figura 8.3: Pantalla de selección del tipo de problema plano

A continuación se indica la cantidad de partes que tiene el problema, en este caso 3 partes:

- Plancha plana (pieza de trabajo) 25x2000x300 mm
- Rodillo superior $R=250$ mm
- Rodillo Inferior $R=250$ mm

La definición de las partes se realiza en la ventana derecha del programa tal y como se muestra en la figura 8.4. Basta con pulsar en el botón recuadrado en rojo para añadir un nuevo elemento. Una vez definido el número de elementos, en el mismo menú contextual se elegirá el tipo de material.

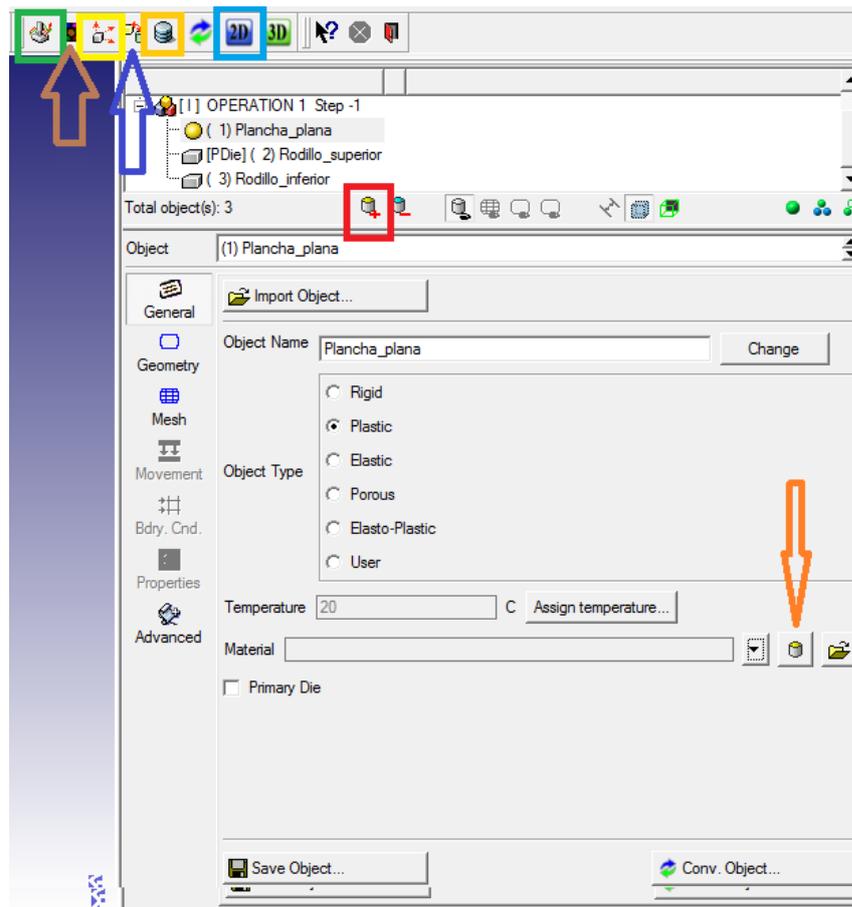


Figura 8.4: Selección del número de partes del problema y tipo de material

En el caso de los dos rodillos se elegirá un el tipo de material "Rigid", esto hace que los dos rodillos no se puedan deformar durante el proceso de laminado. Es la solución que más se aproxima a los modelos teóricos ya que se considera que los rodillos se mantienen aproximadamente inmutables durante este proceso (sin considerar deflexión de rodillos). Al elegir este tipo de material además se aumenta la velocidad de cálculo, ya que no se tiene que simular la acción del proceso sobre los rodillos. Por contra las tensiones que soportan los rodillos no se pueden calcular, pero el efecto de las mismas se podrá tomar sobre la plancha a laminar.

La plancha de trabajo se definirá como un objeto plástico. En realidad el modelo con el que calcula Deform es un modelo rígido-plástico o rígido-viscoplástico. Con este modelo se tiene en cuenta el tramo del material en el que se comporta de manera elástica y una vez llega a la tensión de fluencia se aplica el modelo plástico.

Es el material recomendado en la guía de usuario, por lo que se ha usado en esta simulación. Se podría haber utilizado un modelo elastoplástico pero sólo es necesario en procesos en los que las tensiones residuales sean importantes, o el efecto "springback" por creep, que no es el caso.

A continuación se define la geometría de las distintas piezas, para ello se hace click en el botón "Geometry" y posteriormente en el botón "Primitive", tal y como se muestra en la figura 8.5.

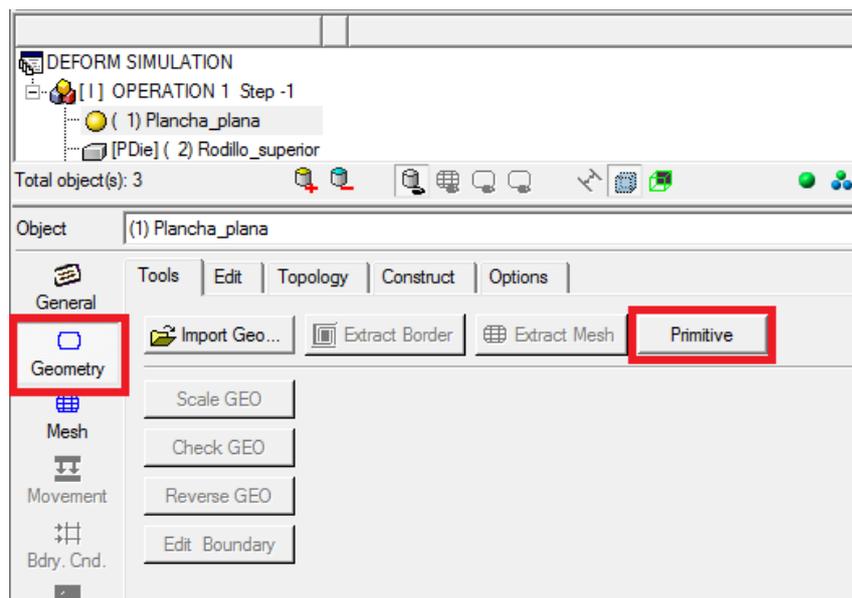


Figura 8.5: Selección del menú geometría

Plancha Plana

En el caso de la plancha plana se definirá un cuadrado de 25 mm de alto y 2000 de largo, la anchura, 300 mm, no será definida por tratarse de un problema de deformación plana. Los datos introducidos se muestran en la figura 8.6. Una vez introducidos basta con pulsar en el botón "Create".

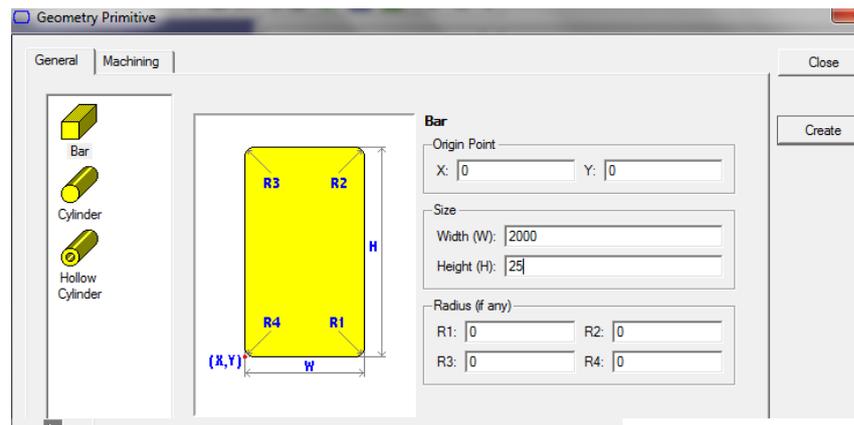


Figura 8.6: Datos geométricos de la plancha plana

Como este problema no es muy complicado a nivel de cálculo se realizará un mallado automático de la pieza, para ello se pulsará sobre el botón "Mesh" y el botón "Generate mesh", ambos mostrados en la figura 8.7. Se ha dejado el número de elementos del mallado por defecto, esto sin embargo se puede modificar en función de la calidad del resultado que se busque. Asimismo se puede definir un mallado personalizado, aunque no se ha considerado necesario en este problema.

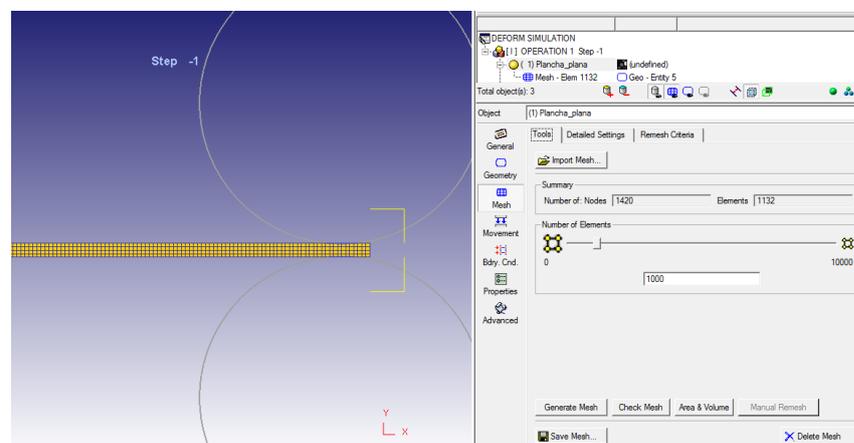


Figura 8.7: Mallado de la plancha plana

Rodillos

La operación de creación de geometría para los rodillos es similar a la anterior. Los rodillos en el ejemplo tendrán un radio de 250 mm. Los datos introducidos se muestran en la figura 8.8. Para evitar el solape visual de los rodillos es conveniente

cambiar el centro de uno de los dos, por ejemplo haciendo que la coordenada y del rodillo inferior sea de -50.

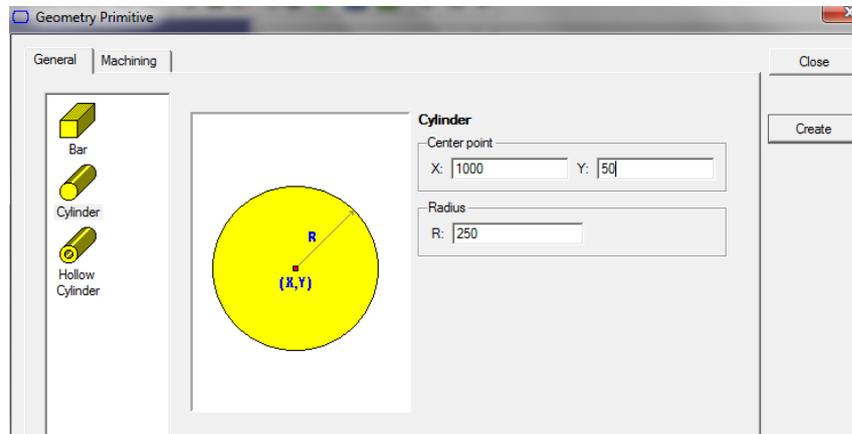


Figura 8.8: Datos geométricos de los rodillos

Una vez hecho esto queda posicionar los objetos creados en la disposición deseada. Para ello se utilizará la herramienta "Object Positioning", marcada con un recuadro amarillo en la figura 8.4. El resultado tras el reposicionamiento de los distintos objetos se muestra en la figura 8.9.

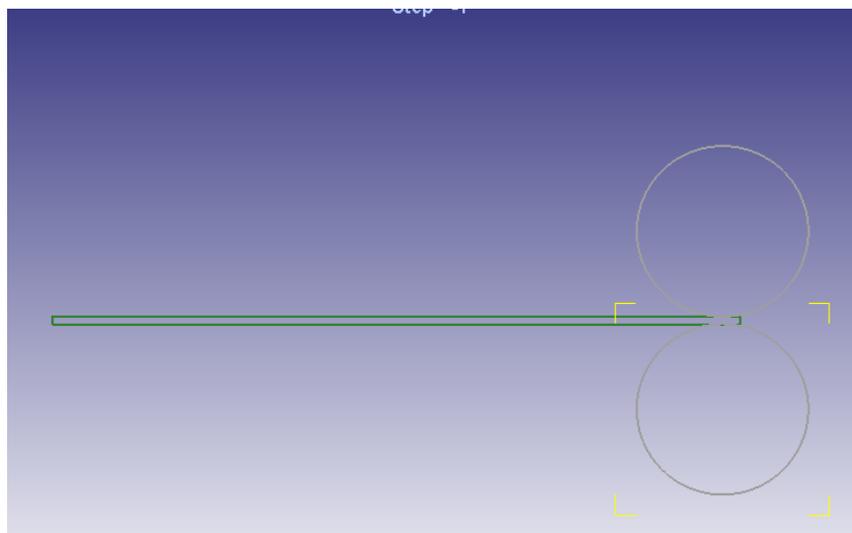


Figura 8.9: Posicionamiento final del montaje

Definición de material

En esta simulación se utilizará la base de datos incluida en el programa Deform, para ello basta pulsar sobre el botón marcado con una flecha naranja en la figura 8.4. A continuación se pasará a seleccionar el material AL5052. Con esto quedará definido el material de la plancha a laminar.

Definición del movimiento de los rodillos

Se detallará el proceso para la definición del movimiento del rodillo de arriba. El proceso para definir el movimiento del rodillo de abajo es análogo, cambiando el signo del valor de la velocidad angular.

Seleccionando el elemento "Rodillo superior" y pulsando sobre el botón "Movement" se accede al menú mostrado en la figura 8.10. Pulsando sobre el botón marcado en rojo se selecciona el centro geométrico del rodillo como centro de rotación. Existen varias formas de determinar el movimiento pero se ha optado por la más sencilla, velocidad angular constante, la cual se especificado como 5.23598 rad/s.

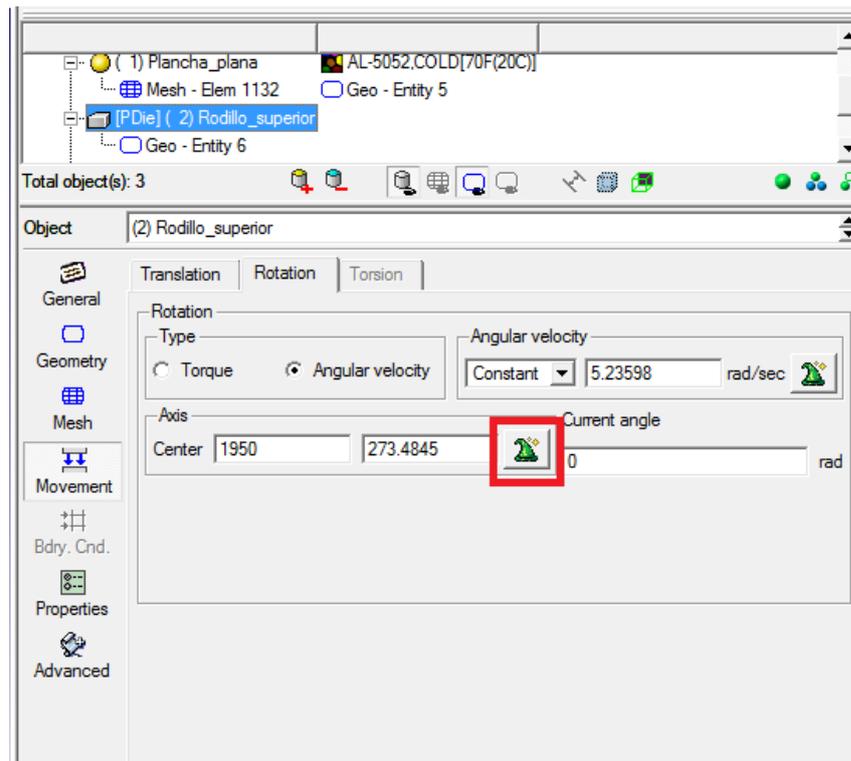


Figura 8.10: Definición del movimiento del rodillo

Definición de las relaciones entre objetos

Para acceder al menú que permite definir las relaciones entre los distintos objetos hay que pulsar sobre el botón señalado con una flecha azul en la figura 8.4. Al ser la primera vez que se accede a este menú el propio programa pregunta si se quiere que genere automáticamente las relaciones entre los objetos, haciendo click en Sí se muestra la pantalla de la figura 8.11.

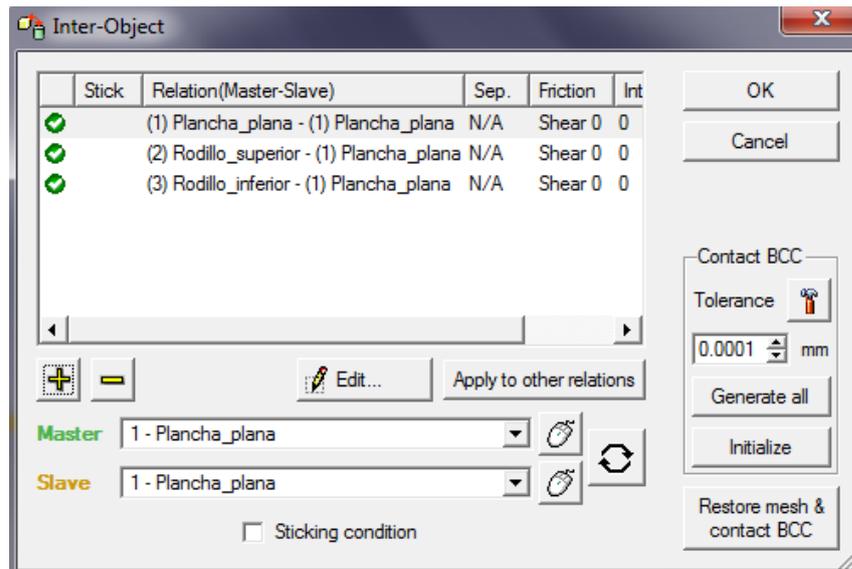


Figura 8.11: Definición de las relaciones entre los objetos del montaje

La primera relación (Lámina-Lámina) es innecesaria por lo que se procede a eliminarla, pulsando sobre ella y posteriormente sobre el botón "-".

A continuación se pulsa sobre la condición Rodillo Superior - Lámina y se pulsa el botón "Edit" tras lo cual aparece el diálogo mostrado en la figura 8.12. En el caso de este problema se seleccionará el tipo de rozamiento como "Seco de Coulomb" con un valor del coeficiente de rozamiento de 0.12. El criterio de separación se dejará como viene por defecto.

Una vez se vuelve al diálogo de la figura 8.11 se pulsa sobre el botón "Apply to other relations" para copiar la configuración de un rodillo a otro.

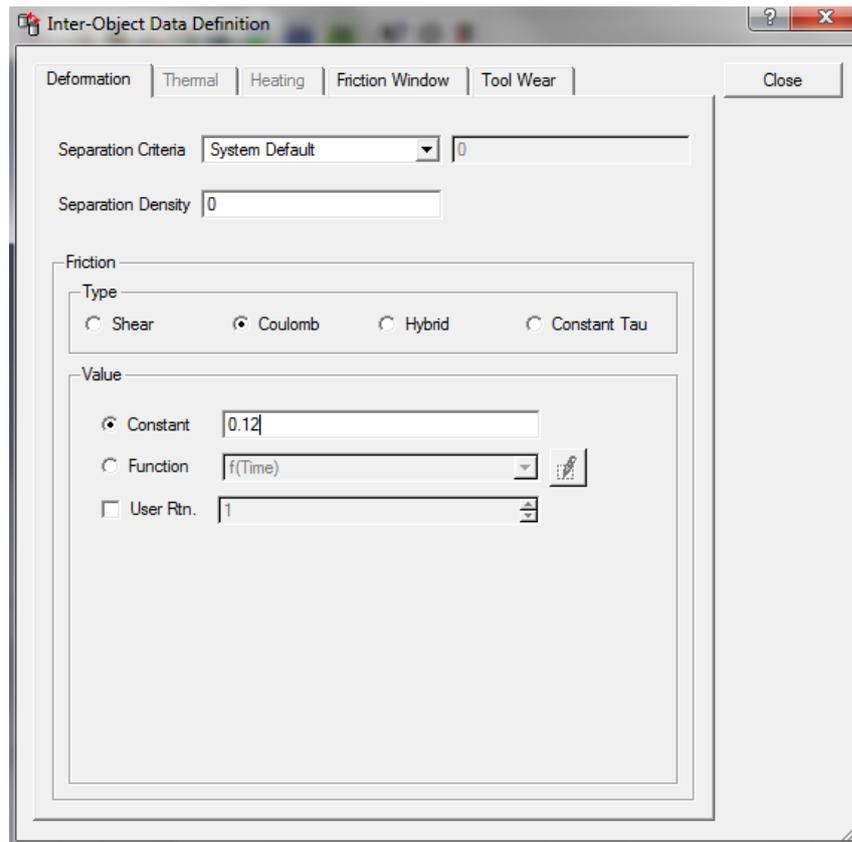


Figura 8.12: Definición de las relaciones entre los objetos del montaje (Parte 2)

Seguidamente se pulsa sobre el botón marcado en verde en la figura 8.13 de manera que el programa automáticamente determina la tolerancia mínima ente objetos para poder establecer los puntos de contacto entre objetos. Una vez hecho esto, pulsando sobre el botón marcado en rojo, se generan los puntos de contacto entre la lámina y los rodillos, tal y como se muestran en la parte izquierda de la figura 8.13.

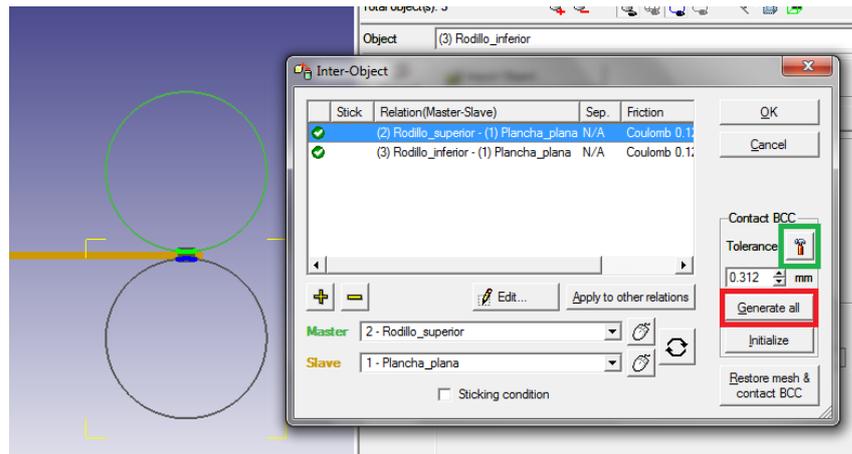


Figura 8.13: Definición de las relaciones entre los objetos del montaje (Parte 3)

Configuración de los parámetros de simulación

Para configurar los parámetros de simulación se pulsará sobre el botón marcado en verde en la figura 8.4, tras lo cual aparecerá la ventana mostrada en la figura 8.14. En esta primera ventana se dejarán los valores que ya se tienen al tratarse de un problema de deformación plana. Se elige como tipo de control "Lagrangian Incremental" ya que es el recomendado por el manual del programa para este tipo de problemas. Asimismo se utilizará el sistema internacional de unidades (SI) y el modo se dejará en "Deformation" ya que al ser un proceso de laminación en frío el intercambio de calor no es de interés.

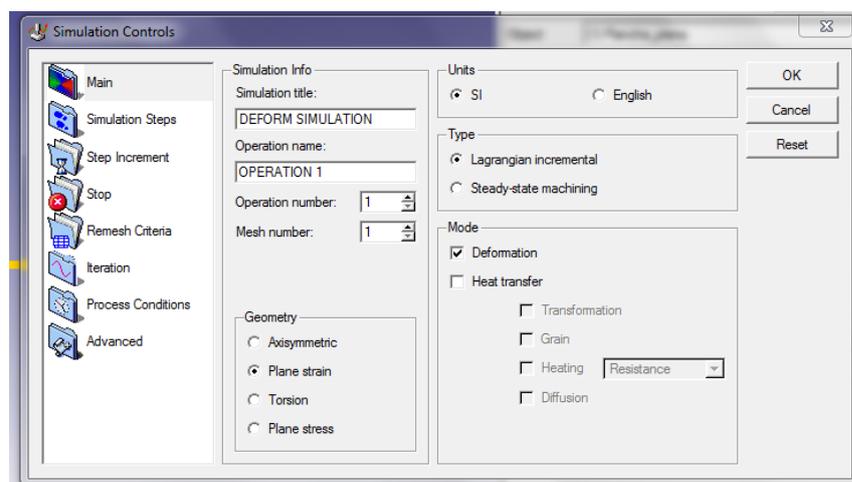


Figura 8.14: Ventana de Controles de Simulación

Se pasará ahora a definir el incremento de paso para la simulación. Al pulsar sobre "Simulation Increment", ventana mostrada en la figura 8.15, se podrá definir todos los parámetros. Ha de tenerse en cuenta que estos parámetros variarán de una simulación a otra debido principalmente a la velocidad de la pieza de trabajo. Grosso modo puede decirse que para obtener una solución más o menos certera a mayor radio de los rodillos, menor ha de ser el incremento de paso de integración (supuesto una velocidad de giro constante e igual a 50 rpm). Para el caso de la simulación, velocidad perimetral del rodillo de unos 1300 mm/s, se ha considerado adecuado establecer el incremento del paso de integración dependiente del tiempo e igual a 0.001 segundos por paso. El resto de valores se dejarán por defecto.

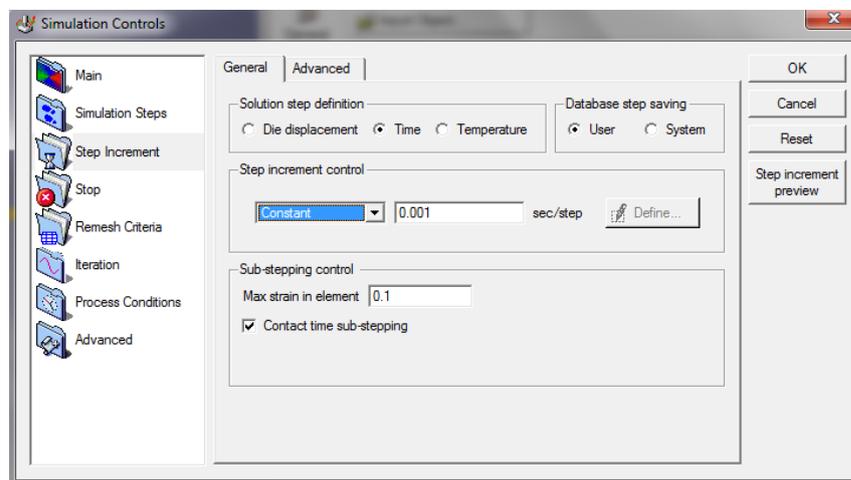


Figura 8.15: Ventana de control de Incremento de Pasos de Simulación

Pasando ahora a la pestaña "Simulation Steps", mostrado en la figura 8.16, se configurarán los pasos de integración de la simulación. Teniendo en cuenta que el incremento de paso de integración es de 0.001 segundos por paso, y que la longitud de la placa es de 2000 mm, se ha considerado adecuado aumentar el número de pasos de integración hasta 1700. Asimismo en el apartado "Step Increment to Save" se ha indicado que se quiere guardar los datos de simulación cada 10 pasos de integración.

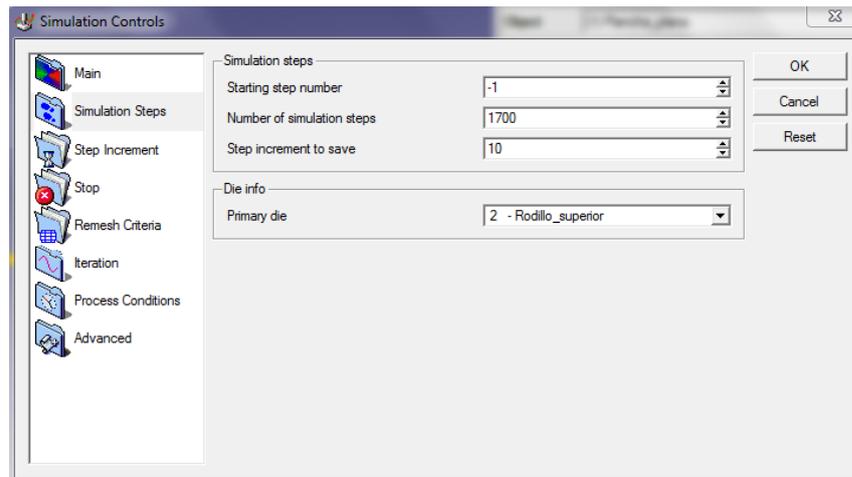


Figura 8.16: Ventana de control de Pasos de Simulación

Para esta simulación el resto de parámetros de los controles de simulación se dejarán por defecto.

Creación del archivo para la simulación

A continuación se creará el archivo de base de datos para que el programa matriz sea capaz de procesarlo y posteriormente poder sacar resultados. En primer lugar se pulsará sobre el botón recuadrado en naranja en la figura 8.4, tras lo cual aparecerá la ventana mostrada en la figura 8.17. Pulsando sobre el botón recuadrado en rojo se comprobará que los parámetros de la simulación son factibles. Por último se pulsa sobre el botón marcado en rojo para crear el archivo.

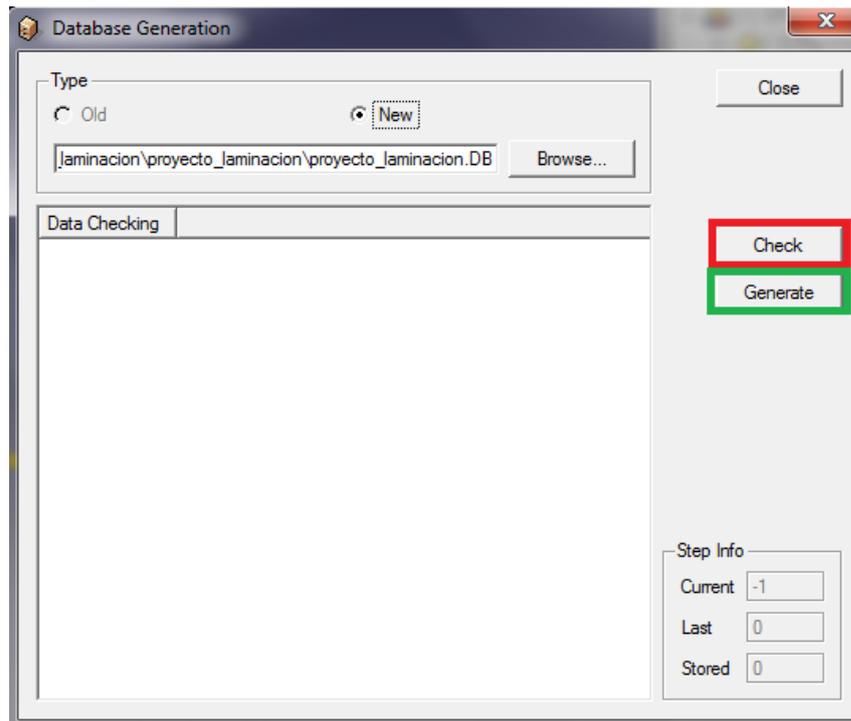


Figura 8.17: Creación del archivo de base de datos

8.1.1. Comentarios

Durante la realización de los casos de simulación nos hemos encontrado en ocasiones con deformaciones demasiado grandes en la placa a laminar. Esto inducía movimientos exagerados que llevaban a soluciones erróneas o inexactas debido a que este software de elementos finitos no tiene un solver preparado para este tipo de eventualidades.

Para solucionar dicho problema se recurrió a la inclusión de unas "guías" que encargaban de que la lámina no se deformara en las direcciones que no nos interesaban. Estas "guías" se modelaron en el pre-procesador como objetos adicionales, sin movimiento y con un coeficiente de rozamiento nulo con la placa. Un ejemplo de dichas guías se puede apreciar en la figura 8.18, correspondiente al caso: AL5052, $L/h=0.5$.

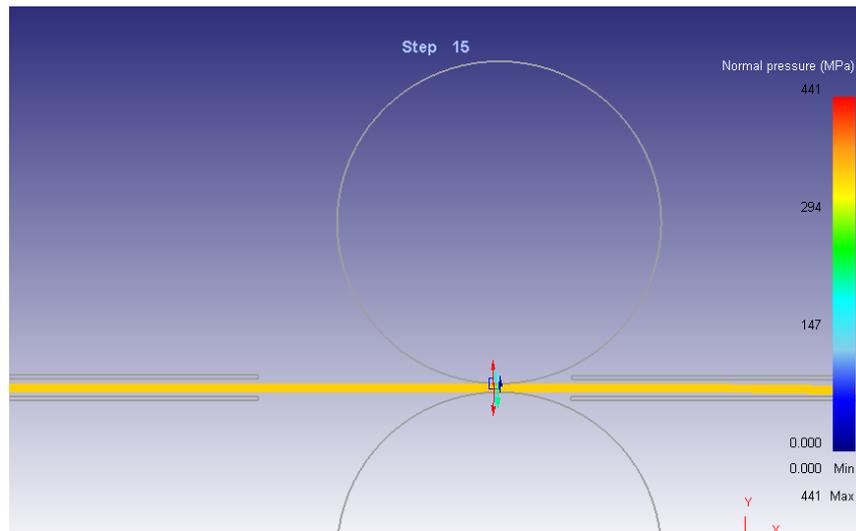


Figura 8.18: Uso de guías en modelo DEFORM3D de laminado plano, AL5052, $L/h=0.5$

8.2. Simulación del caso

Una vez que se tiene el archivo de base de datos del modelo creado, realizar la simulación es realmente sencillo.

Basta con seleccionar la base de datos en el menú de la izquierda de la pantalla principal mostrado en la figura 8.1. Una vez seleccionado, pulsando sobre el botón resaltado en verde se podrá acceder a la configuración avanzada de simulación, mostrada en la figura 8.19. En el caso de que se quiera utilizar varios ordenadores en red, servidores remotos, etc ha de configurarse en esta pantalla. En nuestro caso, y debido a la limitación impuesta por el ordenador de cálculo, la configuración utilizada ha sido la configuración por defecto. Para comenzar la simulación pulsaremos sobre el botón resaltado en rojo en la figura 8.19.

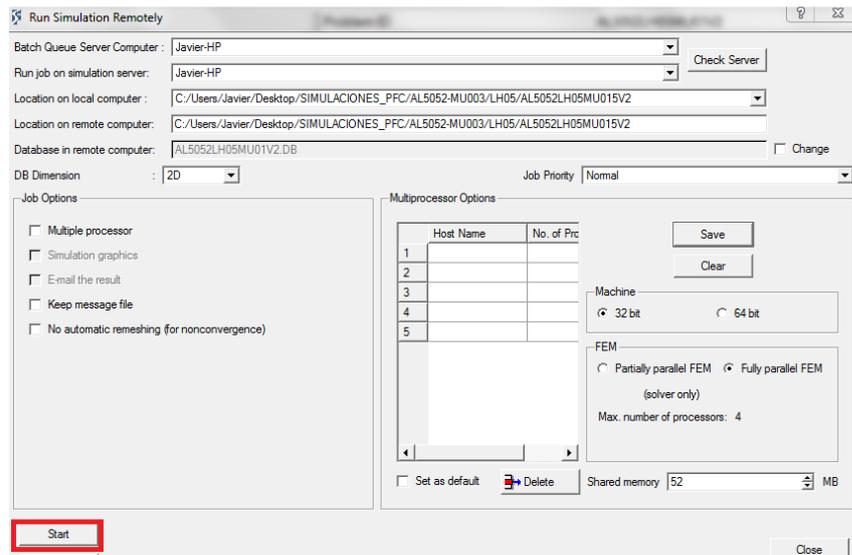


Figura 8.19: Configuración avanzada de simulación

En la pantalla principal del programa DEFORM3D podemos seguir de forma detallada el progreso de la simulación. Para poder seguir el estado de la simulación de manera sucinta, pulsaremos sobre el botón recuadrado en naranja en la figura 8.1. Donde se nos mostrará el progreso de las diferentes simulaciones que puedan estar corriendo simultáneamente, tal y como se muestra en la figura 8.20. .

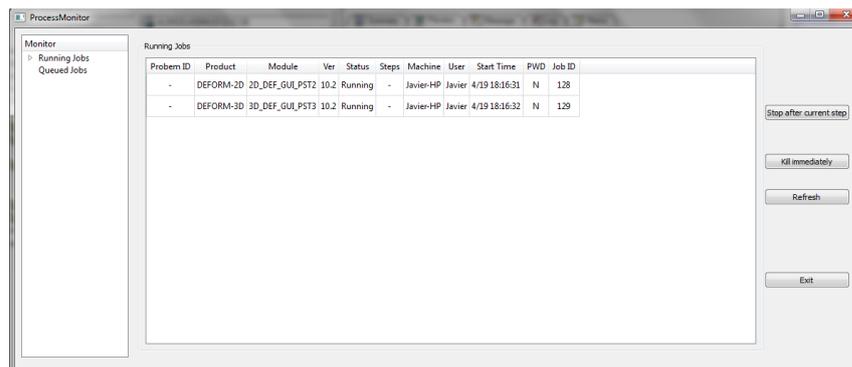


Figura 8.20: ProcessMonitor, indicador de estado de las simulaciones

8.3. Post procesado y extracción de datos

Una vez la simulación ha finalizado es el momento de comprobar los resultados utilizando el post-procesador incluido en la suite DEFORM3D. Para ello basta con seleccionar la base de datos que ya ha pasado por el proceso de simulación y pulsar sobre el botón situado abajo a la derecha de la figura 8.1.

Una vez en el post-procesador nos encontraremos una pantalla similar a la figura 8.21. En esta sección sólo se utilizarán algunas de las muchas funciones que tiene este post-procesador, y que se explican brevemente a continuación.

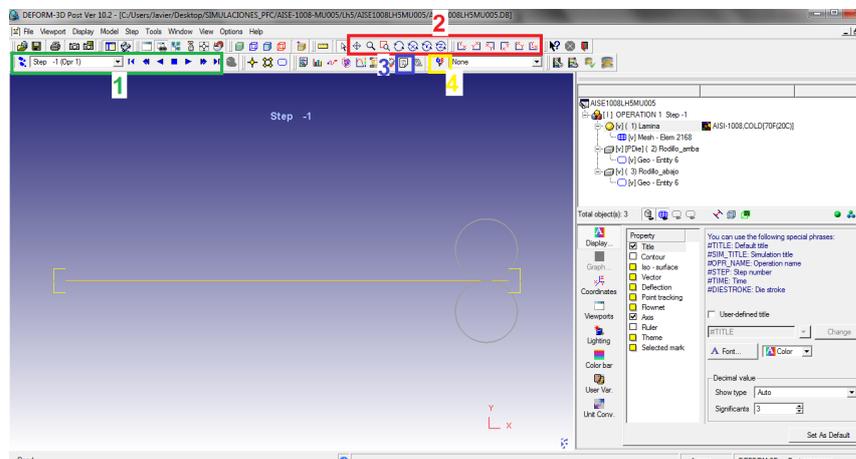


Figura 8.21: Post-procesador de DEFORM3D

La zona 1, resaltada en verde, sirve para seleccionar algún paso de simulación en concreto o para ver una animación que concatena los distintos pasos de simulación, pudiéndose observar en la ventana la evolución que sufre la pieza de trabajo.

La zona 2, recuadrada en rojo, nos permite posicionar el conjunto, de manera que nos sea más fácil poder observar aquello que deseamos. En esta zona se encuentra el zoom, el botón para rotar vista, etc...

El botón 3, recuadrado en azul, es clave para nuestro proyecto. Pulsando este botón se accede a la ventana auxiliar mostrada en la figura 8.22.

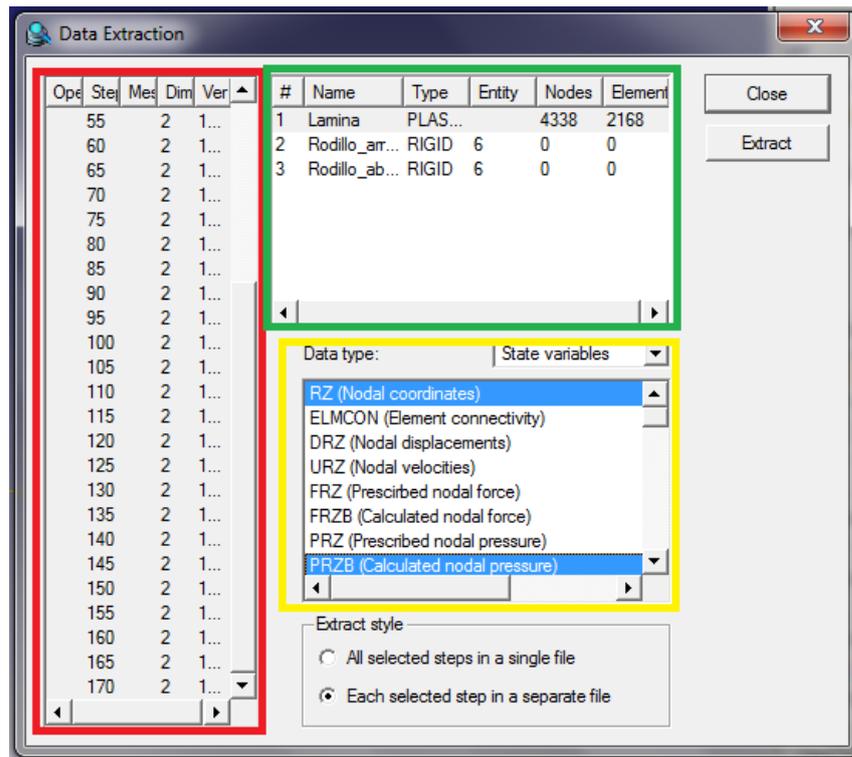


Figura 8.22: Ventana de extracción de datos del post-processor de DEFORM3D

En la ventana en rojo se seleccionan los pasos de simulación de los que se quiere sacar la extracción. En el caso de la ventana verde, se seleccionan las piezas de las que se quiere extraer la información, en nuestro caso la única pieza "calculada" es la lámina. Por último en la ventana recuadrada en amarillo se seleccionan aquellas variables que se quieren extraer. En nuestro caso lo que nos interesa es la posición de los nodos de la malla de la lámina en cada paso de simulación (RZ) y la presión nodal calculada en los puntos afectados por la compresión de los rodillos (PRZB). Nuestro posterior código Matlab está preparado para leer cada paso de simulación en un archivo distinto, por lo que se selecciona la opción: "Each selected step in a different file". Por último pulsamos sobre el botón "Extract".

Para ver los resultados de simulación de una manera rápida y visual, utilizaremos el botón 4, recuadrado en amarillo en la figura 8.21. Al pulsar sobre él, se nos abre una ventana en la que podemos elegir qué variable queremos representar sobre la pieza de trabajo. En nuestro caso seleccionaremos presión normal, pintándola a través de un diagrama de vectores en escala local, tal y como se muestra en la figura

8.23.

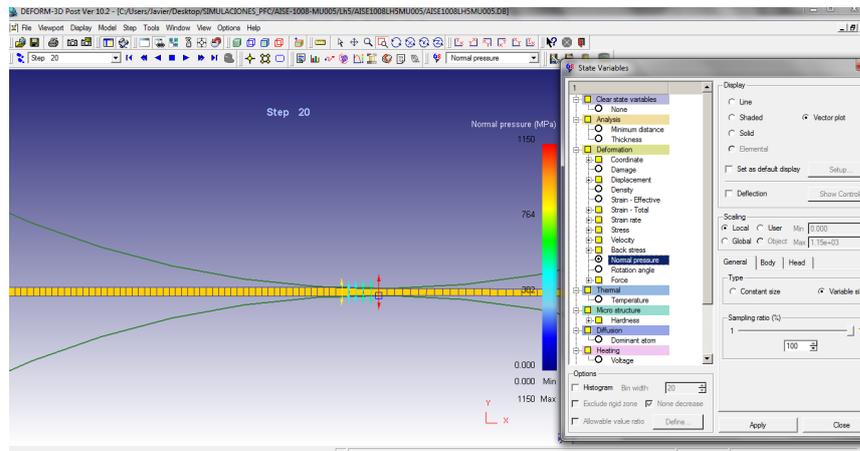


Figura 8.23: Ventana de variables de estado del post-processor de DEFORM3D

Puede pintarse cualquier otra variable que se considere útil para el estudio del proceso en concreto. De igual manera, si se ha calculado, esos datos se pueden extraer a ficheros que después pueden procesarse a través de programas externos, como por ejemplo Matlab.

9. *Anexo II:Procesado de los archivos de base de datos de DEFORM3D mediante el uso de Matlab*

Una parte importante de este proyecto se refiere al procesado de datos provenientes de las simulaciones de DEFORM3D. Tal y como se especifica en la sección 8.3 del Anexo 1, han de crearse los archivos de texto que guardan los resultados de la simulación. Estos archivos contienen la posición de todos los nodos de la lámina en cada paso de simulación, así como la presión a la que están sometidos los nodos de la malla correspondientes a los puntos de la lámina bajo el rodillo.

Para poder procesar esta información, se han desarrollado en el entorno de programación Matlab diversos programas y funciones que permiten obtener un resultado de la fuerza y momento de laminación, extraído de los datos que se encuentran en los archivos generados por DEFORM3D.

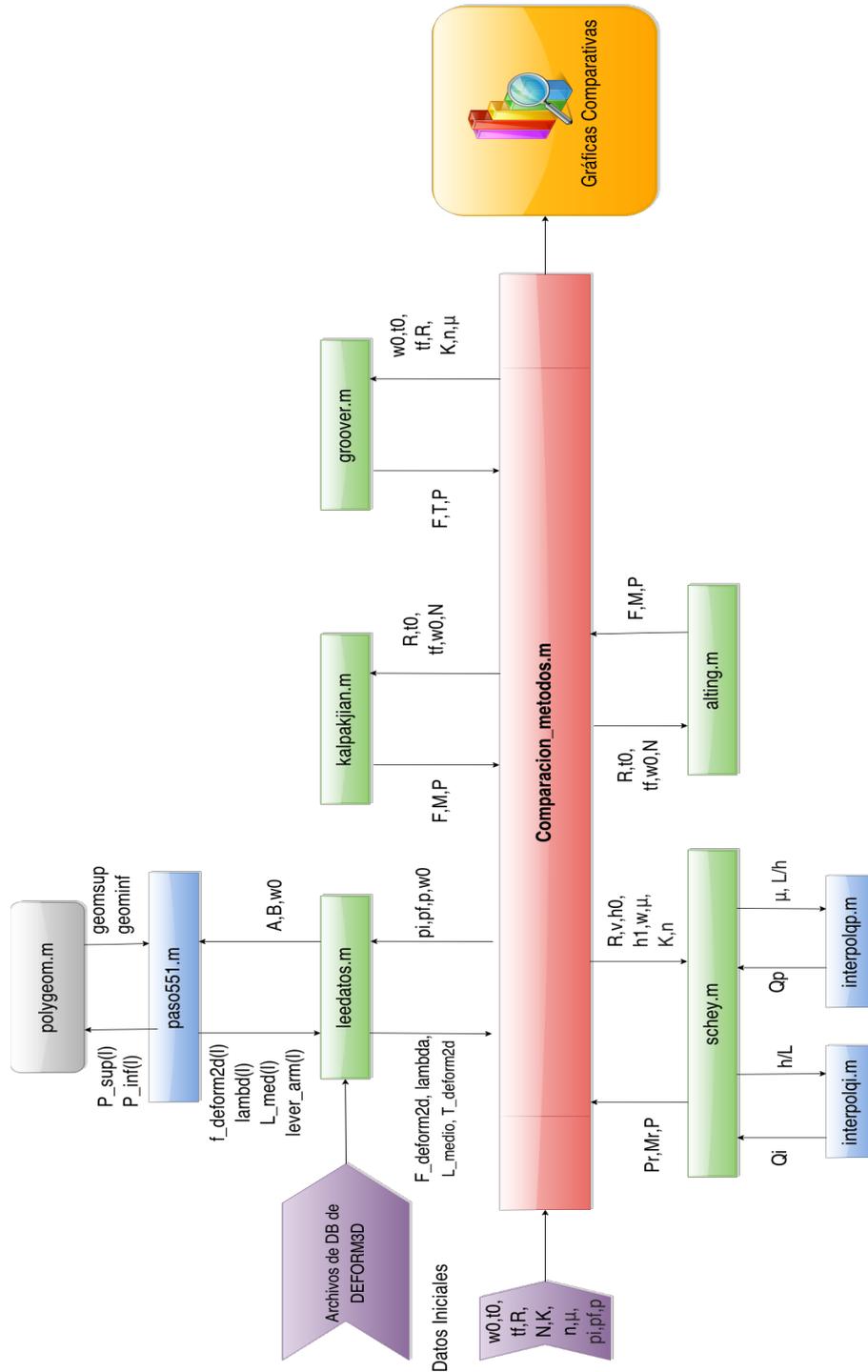


Figura 9.1: Diagrama de flujo de los programas realizados en Matlab para realizar la comparación de métodos de cálculo de fuerza y momento de laminación

En la figura 9.1 se muestra cada uno de los programas y la relación funcional entre ellos. El programa de primer nivel está dibujado en rojo, los de segundo nivel

en verde, los de tercer nivel en azul y los de cuarto nivel en gris. Las condiciones iniciales y de contorno para especificar qué caso de laminación se está simulando, así como los archivos de solución generados por DEFORM3D están dibujados en morado. Las flechas marcan los inputs y outputs de cada función. El significado de estos inputs/outputs se detallan a continuación:

- Q_i, Q_p : factor multiplicador de fricción, necesarios para el modelo simplificado de Schey [2]
- h : espesor medio [mm]
- L : longitud de contacto lámina-rodillo [mm]
- μ : coeficiente de rozamiento
- $F, F_deform2d, Pr$: fuerza de laminación para cada uno de los modelos [N]
- $T, Mr, T_deform2d, M$: momento de laminación para cada uno de los modelos [N*m]
- λ : relación entre el brazo de palanca (a) y la longitud de contacto (L)
- $f_deform2d(l)$: vector de fuerza de laminación de DEFORM3D en cada paso de simulación [N]
- $\lambda(l)$: vector de λ de DEFORM3D en cada paso de simulación
- $L_med(l)$: vector de longitud de contacto de DEFORM3D en cada paso de simulación [mm]
- $lever_arm(l)$: vector de brazo de palanca de DEFORM3D en cada paso de simulación [mm]
- A : matriz que contiene la posición x e y de los nodos del mallado en cada paso de simulación
- B : matriz que contiene los nodos afectados por la laminación y valor de presión en esos nodos

- P_{sup}, P_{inf}: vectores de distribución de presión en la cara superior e inferior de la placa
- geomsup, geominf: centro geométrico de las distribuciones de presión P_{sup} y P_{inf}
- P: potencia de laminación [W]
- w0,w: ancho de la placa a laminar [mm]
- t0, h0: espesor inicial de la placa [mm]
- tf, h1: espesor final de la placa [mm]
- R: radio de los rodillos [mm]
- N: velocidad de giro de los rodillos [rad/s]
- K: coeficiente de resistencia [MPa]
- n: coeficiente de endurecimiento por deformación
- pi: paso inicial (de la solución de DEFORM3D)
- pf: paso final (de la solución de DEFORM3D)
- p: paso

En las secciones siguientes se pasará a detallar el código de cada programa de Matlab, así como una pequeña explicación de cómo funciona.

9.1. Comparacion_metodos.m

Este programa sirve de programa matriz para recopilar toda la información calculada y generar las gráficas que nos permitirán comparar los diferentes resultados.

El encabezado de esta función contiene todos los datos necesarios para realizar los cálculos de fuerza y momento de laminación según el caso de simulación. Este encabezado se cambiará para cada caso.

Esta función matriz hace llamadas a 5 funciones, 4 de ellas proporcionan el valor de fuerza y momento de laminación según los métodos simplificados de Schey, Kalpakjian, Alting y Groover. La otra función a la que llama (leedatos) hace que se tomen los datos de los archivos generados en los sucesivos pasos de simulación de DEFORM3D y los procesa a través de otras funciones de inferior nivel.

Una vez recopila el valor de las distintas fuerzas y momentos, los muestra en gráficos como el de la figura 9.2.

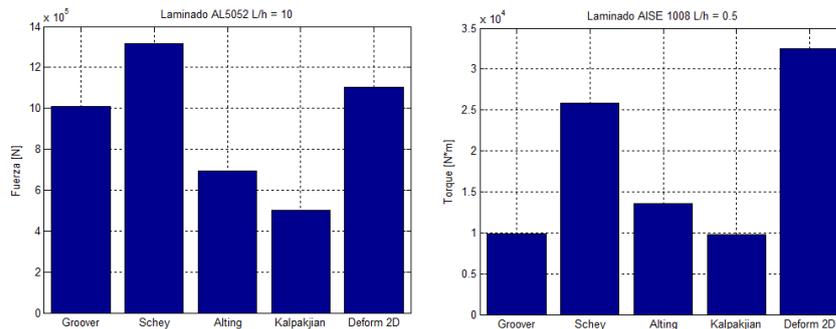


Figura 9.2: Gráficas resultantes del programa Matlab Comparacion_metodos.m

9.1.1. Código Matlab

```

1 close all
2 clc
3 clear all
4 %Comparacion de metodos
5 w0=300; %Anchura placa [mm]
6 t0=2.25; %Espesor inicial [mm]
7 tf=1.7; %Espesor final [mm]
8 R=700; %Radio rodillos [mm]
9 N=7.141509661; %Velocidad giro rodillos [rad/s]
10 K=192.885686; %Strength Coefficient [MPa]
11 n=0.0534; %Strain Hardening Exponent
12 mu=0.03; %Coeficiente de rozamiento seco de Coulomb
13 v=R*N*0.001; %Velocidad punta rodillo [m/s]
14 pi=5; %Paso inicial output de datos deform
15 pf=170; %Paso final output de datos defor
16 p=5; %Incremento en el paso

```

```
17
18 %Groover
19
20 [F_groover ,T,P_groover]=groover (w0,t0 , tf ,R,N,K,n,mu) ;
21
22 %Schey
23
24 [F_schey ,Mr,P]=schey (R,v , t0 , tf , w0,mu,K,n) ;
25
26 %Alting
27
28 [F_alting ,M3,P3]=alting (R,t0 , tf ,w0,N) ;
29
30 %Kalpakjian
31
32 [F_kalpakjian ,M4,P4]=kalpakjian (R,t0 , tf ,w0,N) ;
33
34 %Deform 2D
35
36 [F_deform2d ,lambda ,L_medio ,T_deform2d]=leedatos (pi ,pf ,p,w0) ;
37
38 fuerzas=[F_groover F_schey F_alting F_kalpakjian F_deform2d] ;
39 figure
40 bar (fuerzas)
41 set (gca , 'xtickLabel' ,{ 'Groover' , 'Schey' , 'Alting' , 'Kalpakjian' , 'Deform 2
    D' })
42 grid on
43 title ( 'Laminado AL5052 L/h = 10' )
44 ylabel ( 'Fuerza [N]' )
45
46 torque=[T,Mr,M3,M4,T_deform2d] ;
47
48 figure
49 bar (torque)
50 set (gca , 'xtickLabel' ,{ 'Groover' , 'Schey' , 'Alting' , 'Kalpakjian' , 'Deform 2
    D' })
51 grid on
```

```

52 title('Laminado AISE 1008 L/h = 0.5')
53 ylabel('Torque [N*m]')

```

9.2. kalpakjian.m

Este código realiza el cálculo de la fuerza y el momento según se ha visto en la sección 4.3.1. Para ello toma las entradas proporcionadas por la función Comparacion_metodos.m. Los datos del material están caracterizados para cada caso e incluidos en la propia función. Estos datos del material se han sacado del diálogo de DEFORM3D, tal y como se explica en el Anexo III.

9.2.1. Código Matlab

```

1 function [F,M,P]=kalpakjian(R,h0,ht,w,N)
2 L=sqrt(R*(h0-ht));
3 epsilon=log(h0/ht);
4 %y1=stressstrain(0,mat);
5 %y2=stressstrain(epsilon,mat);
6 xi=[0 2.05E-03 2.02E-01 8.02E-01 2.00E+00];%Valores...
7 %deformacion AISE 1008 (DEFORM3D)
8 yi=[0 141 165.423 198.786 202];%Valores tension (DEFORM3D)
9 y1=interp1(xi,yi,0);
10 y2=interp1(xi,yi,epsilon);
11 Y_avg=(y1+y2)/2;
12 F=L*w*Y_avg;%Fuerza de compresion a aplicar en los rodillos
13 M=F*L*0.001;%Par de torsion a aplicar en el rodillo
14 P=N*F*L;%N en rad/s
15 end

```

9.3. alting.m

Este código realiza el cálculo de la fuerza y el momento según se ha visto en la sección 4.4.1. Para ello toma las entradas proporcionadas por la función Comparacion_metodos.m. Los datos del material están caracterizados para cada caso e

incluidos en la propia función. Estos datos del material se han sacado del diálogo de DEFORM3D, tal y como se explica en el Anexo III.

9.3.1. Código Matlab

```

1 function [F,M,P]=alting(R,h0,ht,w,N)
2
3 epsilon=log(h0/ht);
4 %sigma01=stressstrain(0,mat); %Valor de la tension para una cierta
5 %                               %deformación inicial, en este caso supuesta 0
6 %sigma02=stressstrain(epsilon,mat); %Valor de la tensión cuando se
7 %                               %en la reducción de espesor
8 xi=[0 2.05E-03 2.02E-01 8.02E-01 2.00E+00]; %Valores...
9 %deformación AISE 1008 (DEFORM3D)
10 yi=[0 141 165.423 198.786 202]; %Valores tensión (DEFORM3D)
11 sigma01=interp1(xi,yi,0);
12 sigma02=interp1(xi,yi,epsilon);
13 sigma0m=(sigma01+sigma02)/2;
14 %Teniendo en cuenta los efectos de fricción
15 F=(1.2*2/sqrt(3))*sigma0m*w*sqrt(R*(h0-ht)); %Fuerza de compresión a
16 %                               %aplicar
17 L=sqrt(R*(h0-ht));
18 M=F*L*0.001; %Momento torsor a aplicar (2 rodillos)
19 P=M*N; %Potencia necesaria [kW], N en rad/s
20 end

```

9.4. groover.m

Este código realiza el cálculo de la fuerza y momento de laminación siguiendo el modelo de Groover, explicado en la sección 4.1. Para realizar los cálculos toma los datos del material de la función comparacion_metodos.m así como el resto de datos para poder modelar el proceso de laminación.

9.4.1. Código Matlab

```

1 function [F,T,P]=groover(w0,t0,tf,R,N,K,n,mu)
2 %Determinamos si la fricción es suficiente para el trabajo de laminado
3 d=t0-tf;
4 dmax=(mu^2)*R;
5 if d<dmax
6     L=sqrt(R*d);
7     e=log(t0/tf);
8     y=(K*(e^n))/(1+n);
9     F=y*w0*L;
10    T=0.5*F*L*0.001;
11    P=2*pi*N*F*L*0.001;
12 else
13     msgbox('La laminación es imposible, cambie R o mu','Error')
14 end
15 end

```

9.5. schey.m

La función schey.m realiza los cálculos pertinentes para obtener la fuerza y momento de laminación según el método de Schey, explicado en la sección 4.2. Para hacer los cálculos, esta función toma como entrada datos proporcionados por la función matriz comparacion_metodos.m.

Puesto que en el modelo de Schey existen unos coeficientes de mayorazgo Q_i y Q_p , existen a su vez, dos funciones auxiliares: interpolqi.m y interpolqp.m que obtienen el valor de estos coeficientes a través de una interpolación sobre las gráficas que se muestran en las figuras 4.6 y 4.7.

9.5.1. Código Matlab

```

1
2 %Método Schey para calcular fuerzas de rodillo en laminado
3 %R: radio del rodillo [mm]
4 %v: velocidad del rodillo [m/s]

```

```

5 %h0: espesor inicial
6 %h1: espesor final
7 %w: anchura de la plancha a laminar
8 %mu: coeficiente de rozamiento entre rodillo y plancha a laminar
9 %K: constante del material
10 %n: constante del material
11
12 function [Pr,Mr,P]=schey (R,v,h0,h1,w,mu,K,n)
13 delta_h_max=(mu^2)*R;
14 %Si cumple la condicion de draft máximo entonces hace el cálculo, si no
15     ,
16 %hay que cambiar el coeficiente de rozamiento o el radio del rodillo
17 if (h0-h1)<delta_h_max
18     L=sqrt (R*(h0-h1));
19     epsilon=log (h0/h1);
20     sigma_fm=(K*(epsilon^n))/(n+1);
21     h=(h0+h1)/2;
22     if h/L>8.7
23         Pr=3*sigma_fm*L*w;
24         Mr=Pr*L*0.001;
25         P=Pr*L*v/R;
26     elseif h/L>1 && h/L<8.7
27         Qi=interpolqi (h/L);
28         Pr=1.15*sigma_fm*Qi*L*w;
29         Mr=Pr*L*0.001;
30         P=Pr*L*v/R;
31     elseif h/L==1
32         Pr=1.15*sigma_fm*L*w;
33         Mr=Pr*L*0.001;
34         P=Pr*L*v/R;
35     elseif h/L<1
36         Qp=interpolqp (mu,L/h);
37         Pr=1.15*sigma_fm*Qp*L*w;
38         Mr=Pr*L*0.001;
39         P=Pr*L*v/R;
40     else
41     end

```

```
41 else
42     msgbox('La laminación es imposible , cambie R o mu', 'Error')
43 end
44 end
```

interpolqi.m

```
1
2 function [qi]=interpolqi(hL)
3
4 %Vector Qi
5 hL_sf=1:0.25:10;
6 Qi_sf=[1
7     1.04
8     1.075
9     1.15
10    1.22
11    1.3
12    1.37
13    1.46
14    1.525
15    1.6
16    1.65
17    1.71
18    1.77
19    1.825
20    1.875
21    1.925
22    2
23    2.05
24    2.085
25    2.14
26    2.18
27    2.22
28    2.26
29    2.31
30    2.34
```

```

31     2.385
32     2.42
33     2.45
34     2.48
35     2.5
36     2.53
37     2.55
38     2.575
39     2.59
40     2.6
41     2.615
42     2.62];
43 Qi_ad=[1.08;1.075;1.07;1.07;1.076;1.079; Qi_sf(4:37)];
44 hL_ad=[1:0.1:1.5 1.75:0.25:10];
45 qi=interp1(hL_sf, Qi_sf, hL, 'cubic');
46 end
47 %plot(hL_sf, Qi_sf, 'b', hL_ad, Qi_ad, 'g-')

```

interpolqp.m

```

1
2 function [qp]=interpolqp(mu,L)
3
4 %Definicion de los vectores de datos (datos sacados de la grafica)
5 %Vector Qp y Lh generales
6 Lh=1:0.5:20;
7 m=length(Lh);
8 Qp_000=ones(m,1);
9 Qp_005=[1
10     1
11     1
12     1.01
13     1.04
14     1.05
15     1.07
16     1.09
17     1.097

```

```
18     1.1
19     1.11
20     1.13
21     1.15
22     1.18
23     1.19
24     1.195
25     1.2
26     1.22
27     1.23
28     1.25
29     1.27
30     1.29
31     1.3
32     1.32
33     1.35
34     1.38
35     1.4
36     1.42
37     1.44
38     1.47
39     1.49
40     1.5
41     1.52
42     1.55
43     1.58
44     1.59
45     1.6
46     1.65
47     1.67];
48
49 Qp_010=[1
50     1.05
51     1.09
52     1.11
53     1.13
54     1.18
```

```
55     1.2
56     1.21
57     1.25
58     1.28
59     1.3
60     1.35
61     1.4
62     1.44
63     1.49
64     1.51
65     1.58
66     1.6
67     1.67
68     1.7
69     1.77
70     1.81
71     1.88
72     1.91
73     2
74     2.05
75     2.1
76     2.18
77     2.23
78     2.3
79     2.38
80     2.44
81     2.5
82     2.6
83     2.7
84     2.77
85     2.85
86     2.95
87     3.03];
88
89 Qp-015=[1
90     1.06
91     1.1
```

```
92     1.15
93     1.2
94     1.24
95     1.3
96     1.38
97     1.42
98     1.5
99     1.59
100    1.65
101    1.71
102    1.8
103    1.9
104    2
105    2.1
106    2.2
107    2.3
108    2.4
109    2.5
110    2.6
111    2.7
112    2.83
113    2.95
114    3.1
115    3.2
116    3.3
117    3.45
118    3.58
119    3.7
120    3.82
121    3.95
122    4.05
123    4.2
124    4.35
125    4.45
126    4.58
127    4.7];
128 Qp_020=[1.05
```

129	1.11
130	1.2
131	1.28
132	1.35
133	1.45
134	1.51
135	1.64
136	1.7
137	1.85
138	1.95
139	2.05
140	2.2
141	2.3
142	2.4
143	2.5
144	2.62
145	2.75
146	2.85
147	3
148	3.1
149	3.23
150	3.35
151	3.48
152	3.6
153	3.7
154	3.85
155	3.97
156	4.1
157	4.2
158	4.32
159	4.47
160	4.6
161	4.72
162	4.85
163	5
164	5.1
165	5.2

```
166     5.3];
167 a=4.65/19;
168 b=1.2-a;
169 Qp_ad=(a*Lh)+b;
170
171
172 val=0; %Contador que se usara posteriormente para determinar entre que
      dos
173 %curvas de Qp estamos
174 %Se comprueba que los valores mu y Lh estan dentro del rango
175 if mu>=0 && mu<=0.2
176     if L>=1 && L<=20
177         %Establecemos entre que dos curvas vamos a interpolar
178         if mu>=0 && mu<0.05
179             val=1;
180         elseif mu>=0.05 && mu<0.1
181             val=2;
182         elseif mu>=0.1 && mu<0.15
183             val=3;
184         elseif mu>=0.15 && mu<=0.2
185             val=4;
186         end
187         %Procedemos a interpolar segun el caso
188         switch val
189             case 1
190                 qp1=interp1(Lh,Qp_000,L,'cubic');
191                 qp2=interp1(Lh,Qp_005,L,'cubic');
192                 qp=interp1([0 0.05],[qp1 qp2],mu);
193             case 2
194                 qp1=interp1(Lh,Qp_005,L,'cubic');
195                 qp2=interp1(Lh,Qp_010,L,'cubic');
196                 qp=interp1([0.05 0.1],[qp1 qp2],mu);
197             case 3
198                 qp1=interp1(Lh,Qp_010,L,'cubic');
199                 qp2=interp1(Lh,Qp_015,L,'cubic');
200                 qp=interp1([0.1 0.15],[qp1 qp2],mu);
201             case 4
```

```
202         qp1=interp1(Lh,Qp_015,L,'cubic');
203         qp2=interp1(Lh,Qp_020,L,'cubic');
204         qp=interp1([0.15 0.2],[qp1 qp2],mu);
205     end
206 else
207     msgbox('L/h fuera de rango (1-20)','Error')
208 end
209 else
210     msgbox('Factor de rozamiento fuera de rango (0-0.2)','Error')
211 end
212 end
```

9.6. leedatos.m

Esta función sirve de interfaz para extraer los datos de los archivos de solución que se genera a través del post-procesador de DEFORM3D. Mediante la función principal se le aporta a la función a partir de qué paso de integración tiene que coger los datos (en general, el primer paso de integración se desprecia por no considerarse totalmente certero).

Los archivos de solución han de colocarse en la misma carpeta en la que se coloca leedatos.m y nombrados de una forma concreta, que después se particulariza en la propia función.

leedatos.m genera 2 matrices, A y B que se intruducen en la posterior función paso551.m. La primera contiene la posición de todos los nodos del mallado generado por DEFORM3D en un paso de integración concreto. La matriz B contiene el número de los nodos que están afectados por la compresión del rodillo durante la laminación, así como el valor de la presión en estos puntos.

Esta función recopila a su vez el resultado de los cálculos realizados por la función paso551.m para cada paso de integración y realiza una media. Los datos recopilados son fuerza de laminación, longitud de contacto, brazo de palanca y λ (brazo de palanca adimensional).

9.6.1. Código Matlab

```
1
2 %Script de como llamar a los ficheros
3 %voy cambiando el valor de i, i=1,2....
4 %clear all
5 %close all
6 % i=470;
7 % clc
8 % clear all
9 % close all
10 % pi=5;
11 % pf=15;
12 % p=5;
13 % w=300;
14 % a=15;
15 function [F_deform2d , lambda , L_medio , T_deform2d]=leedatos (pi , pf , p , w)
16 % F_deform2dprev=0;
17 l=1;
18 for i=pi:p:pf
19 %titlestring = ['laminado2d_Lh7_37_DataExtract_step' num2str(i) '.DAT
20     '];
21 titlestring = ['AISE1008LH1MU005_DataExtract_step' num2str(i) '.DAT'];
22 %Guardar la lectura del fichero en una matriz
23 [DA]=importdata(titlestring);
24 % assignin('base','strain',DA)
25 M=DA.data; %Accede a la matriz de datos dentro del array estructurado.
26     La
27 %estructura de la matriz es la siguiente: el primer bloque corresponde a
28     la
29 %posicion de los nodos en ese paso de integracion. Este primer bloque
30     tiene
31 %una primera fila que indica la cantidad de filas que tiene el bloque.
32     El
33 %segundo bloque corresponde a las presiones en los puntos de los nodos
34     y
```

```
30 %ambien tiene una primera fila indicando el numero de elementos.
31 M2=DA.txtdata;
32 %NOTA: esta estructura sólo sirve si guardamos cada paso por separado y
33 %sólo sacando posicion nodal y calculated nodal pressure.
34
35 %Generar las funciones A y B para que sean la entrada a la funcion
    paso550
36
37 t1=M(1,2); %Leo el número de elementos del primer bloque
38 t2=M(t1+2,2); %Leo el número de elementos del segundo bloque
39 M3=str2double(M2(2:t1+1));
40 A=zeros(t1,3);
41 A(:,1)=M3;
42 A(:,2:3)=M(2:t1+1,1:2);
43
44 B=zeros(t2,3);
45
46 n=length(M2);
47 B(1:t2,1)=str2double(M2(t1+4:n));
48 B(1:t2,2:3)=M(t1+4:t1+3+t2,1:2);
49
50
51 [f_deform2d(1),lambd(1),L_med(1),lever_arm(1)]=paso551(A,B,w);
52 l=l+1;
53
54 end
55 L_medio=mean(L_med);
56 Lever_arm=mean(lever_arm);
57 lambda=mean(lambd);
58 F_deform2d=mean(f_deform2d);
59 T_deform2d=2*Lever_arm*F_deform2d*0.001;
60
61 end
```

9.7. paso551.m

Esta función se encarga de realizar los cálculos necesarios para obtener la fuerza de laminación, longitud de contacto y brazo de palanca.

En las primeras líneas de código (1-25 aprox) se realiza una redistribución de las matrices a un formato más conveniente para el procesado de datos.

Posteriormente, de las líneas 28 a 63 se realiza una división de las matrices según estén afectadas por el rodillo superior o inferior. En la figura 9.3 se puede ver la división realizada.

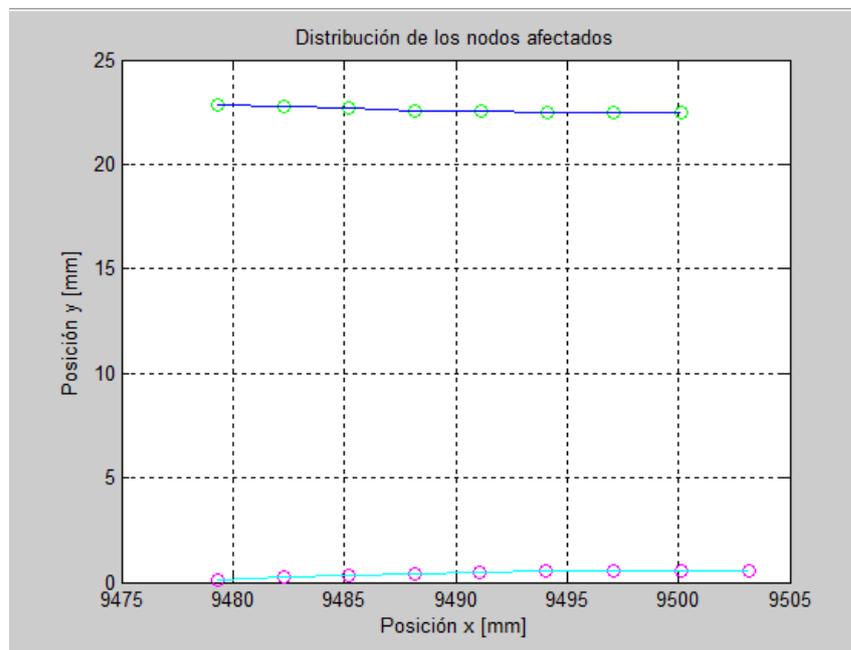


Figura 9.3: Distribución de los nodos afectados por la presión de los rodillos en un paso de laminación

De igual modo se puede dibujar la distribución de presiones. En la figura 9.4 se puede observar la distribución de presiones a la que está sometida la lámina. Esta distribución de presiones ha sido obtenida de la zona afectada por el rodillo superior. En el cálculo de de la fuerza se hace una media de la distribución de presiones superior e inferior.

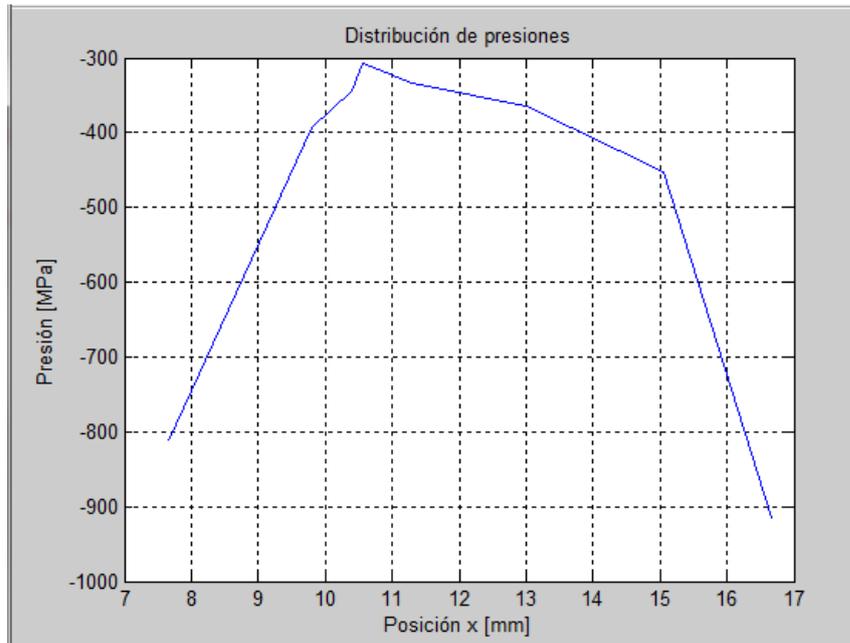


Figura 9.4: Distribución de presiones obtenida de la parte de los datos de los archivos de DEFORM3D.

En las líneas 64 y 65 se utiliza la función auxiliar `polygeom.m` para calcular el centroide de la distribución de presiones, lo cual nos servirá para realizar el cálculo de longitud de brazo de palanca.

Para el cálculo de la fuerza se realiza la integración de la distribución de presiones a lo largo de la longitud de contacto tanto superior como inferior. Posteriormente se hace una media para obtener la resultante de la distribución de presión en ese paso de integración.

En las siguientes líneas se calcula la longitud de contacto y el brazo de palanca. Para calcular la longitud de contacto, el programa calcula la longitud de cada segmento que conforman el arco superior e inferior de la figura 9.3 y después realiza una media.

Para calcular la longitud de brazo de palanca y la longitud de brazo de palanca adimensional λ , se calcula la distancia entre la línea imaginaria que une los centros de los dos rodillos y el centroide de la distribución de presiones, tal y como se muestra en la figura 9.5.

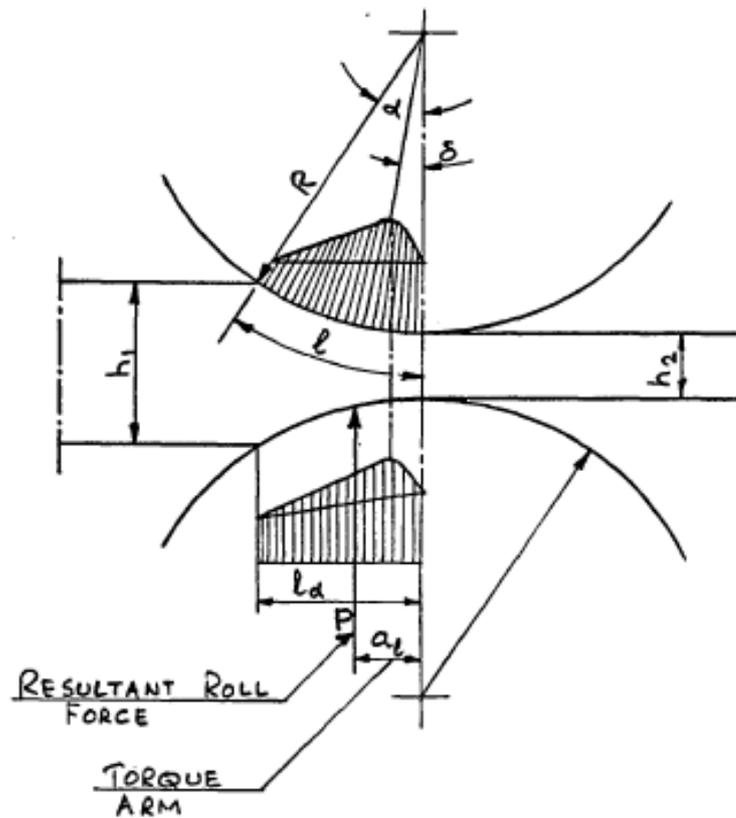


Figura 9.5: Método de cálculo del brazo de palanca, [6, pág 77]

9.7.1. Código Matlab

```

1 function [f_deform2d , lambda , L_medio , lever_arm]=paso551 (A,B,w)
2 k=length(B);
3 B;
4 for l=1:k
5     G(1)=B(1,1);
6     P(1,1)=B(1,1); %Numero del nodo afectado
7     P(1,2)=A(G(1),2); %Posición X de los nodos afectados
8     P(1,3)=A(G(1),3); %Posición Y de los nodos afectados
9     P(1,4)=B(1,2); %Componente x de la presión en ese nodo afectado
10    P(1,5)=B(1,3); %Componente y de la presión en ese nodo afectado
11 end
12 %format long
13 %

```

```

14 % plot3(P(:,2),P(:,3),P(:,4),'go')
15 % hold on
16 % plot3(P(:,2),P(:,3),P(:,4),'b')
17 % grid on
18
19 for l=1:k
20     P_abs(l)=sqrt((P(l,5)^2)); %Se han despreciado aquí las componentes
        x
21     % y de las presiones, tomando sólo la componente que es
        estrictamente
22     %vertical
23 end
24
25 %Se intentará separar los puntos pertenecientes al plano superior y
26 %aquellos pertenecientes al plano inferior.
27
28 [amax,bmax]=max(P(:,3)); %amax es el valor y bmax es la componente del
        vector
29 [amin,bmin]=min(P(:,3));
30 amedio=(amax+amin)/2; %Calculamos la altura aproximada del plano medio.
        De
31 %esta forma podremos decir que los puntos que estén por encima del
        plano
32 %medio serán de la superficie superior y viceversa.
33
34 %Se separan ahora en dos matrices los puntos del plano superior y los
        del
35 %plano inferior
36 t=length(P);
37 i=1;
38 n=1;
39 for l=1:t
40     %Plano Superior
41
42     if P(l,3)>amedio
43         P_sup(i,1)=P(l,1); %Número del nodo
44         P_sup(i,2)=P(l,2); %Posición x del nodo

```

```

45     P_sup(i,3)=P(1,3); %Posición y del nodo
46     P_sup(i,4)=P(1,4); %Componente x de la presión
47     P_sup(i,5)=P(1,5); %Componente y de la presión
48     P_sup(i,6)=sqrt((P(1,4)^2)+(P(1,5)^2)); %Presión absoluta
49     i=i+1;
50
51     %Plano Inferior
52     else
53         P_inf(n,1)=P(1,1); %Número del nodo
54         P_inf(n,2)=P(1,2); %Posición x del nodo
55         P_inf(n,3)=P(1,3); %Posición y del nodo
56         P_inf(n,4)=P(1,4); %Componente x de la presión
57         P_inf(n,5)=P(1,5); %Componente y de la presión
58         P_inf(n,6)=sqrt((P(1,4)^2)+(P(1,5)^2)); %Presión absoluta
59         n=n+1;
60     end
61 end
62 P_sup2=sortrows(P_sup,2);
63 P_inf2=sortrows(P_inf,2);
64 [geomsup, inersup, cpmosup]=polygeom(P_sup2(:,2),-P_sup2(:,6));
65 [geominf, inerinf, cpmoinf]=polygeom(P_inf2(:,2),P_inf2(:,6));
66
67 % plot(P_sup2(:,2),P_sup2(:,3),'go')
68 % hold on
69 % plot(P_sup2(:,2),P_sup2(:,3),'b')
70 % grid on
71 % figure
72 % plot(P_inf2(:,2),P_inf2(:,3),'mo')
73 % hold on
74 % plot(P_inf2(:,2),P_inf2(:,3),'c')
75 % grid on
76
77 F1=w*trapz(P_sup2(:,2),P_sup2(:,6));
78 F2=w*trapz(P_inf2(:,2),P_inf2(:,6));
79 F_tot=(F1+F2)/2;
80 f_deform2d=F_tot;
81

```

```

82 %Cálculo de la longitud de contacto L
83
84 L_sup=0;
85 n=length(P_sup2(:,2));
86 for l=1:n-1
87     %d1=sqrt(((P_sup2(l+1,2)-P_sup2(l,2))^2)+((P_sup2(l+1,3)-P_sup2(l
88         ,3))^2));
89     d1=sqrt(((P_sup2(l+1,2)-P_sup2(l,2))^2));
90     L_sup=L_sup+d1;
91 end
92 L_sup;
93 %Calculo brazo palanca—> torque
94 lever_arm_sup=P_sup2(n,2)-geomsup(2);
95
96 L_inf=0;
97 n=length(P_inf2(:,2));
98 for l=1:n-1
99     %d1=sqrt(((P_inf2(l+1,2)-P_inf2(l,2))^2)+((P_inf2(l+1,3)-P_inf2(l
100         ,3))^2));
101     d1=sqrt(((P_inf2(l+1,2)-P_inf2(l,2))^2));
102     L_inf=L_inf+d1;
103 end
104 L_inf;
105 %Calculo brazo palanca—> torque
106 lever_arm_inf=P_inf2(n,2)-geominf(2);
107
108 L_medio=(L_sup+L_inf)/2;
109
110 %Cálculo de labmda y fuerza de torque
111 lambda_sup=lever_arm_sup/L_sup;
112 lambda_inf=lever_arm_inf/L_inf;
113 lambda=(lambda_sup+lambda_inf)/2;
114 lever_arm=(lever_arm_sup+lever_arm_inf)/2;
115
116 % %Cálculo de la fuerza de laminado considerando la fuerza Fz

```

```

117 % F_sup=sum(abs(P_sup2(:,10)));
118 % F_inf=sum(abs(P_inf2(:,10)));
119 % F_laminado3D=(F_sup+F_inf)/2;
120 %
121 % Determinación del punto neutro por cambio de fuerzas de rozamiento
122 % i=1;
123 % while P_sup2(i,9)<0
124 %     i=i+1;
125 % end
126 % p_neutro_sup=(P_sup2(i,3)+P_sup2(i-1,3))/2; %Posición Y del p.neutro
127 %
128 % q=1;
129 % while P_inf2(q,9)<0
130 %     q=q+1;
131 % end
132 % p_neutro_inf=(P_inf2(q,3)+P_inf2(q-1,3))/2; %Posición Y del punto
    neutro
133 %
134 % p_neutro_fuerza3D=(p_neutro_sup+p_neutro_inf)/2;
135 end

```

polygeom.m

Esta función ha sido utilizada bajo licencia BSD en este proyecto para el cálculo del centroide de la distribución de presiones sobre la lámina.

Este código es propiedad de H.J. Sommer y se reproduce en este proyecto bajo las condiciones explicitadas en el código.

```

1 % Copyright (c) 1998, H.J. Sommer
2 % All rights reserved.
3 %
4 % Redistribution and use in source and binary forms, with or without
5 % modification, are permitted provided that the following conditions
    are
6 % met:
7 %
8 % * Redistributions of source code must retain the above copyright

```

```
9 %      notice , this list of conditions and the following disclaimer .
10 %      * Redistributions in binary form must reproduce the above
      copyright
11 %      notice , this list of conditions and the following disclaimer in
12 %      the documentation and/or other materials provided with the
      distribution
13 %      * Neither the name of the Penn State University nor the names
14 %      of its contributors may be used to endorse or promote products
      derived
15 %      from this software without specific prior written permission .
16 %
17 % THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "
      AS IS"
18 % AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO,
      THE
19 % IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR
      PURPOSE
20 % ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT OWNER OR CONTRIBUTORS
      BE
21 % LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR
22 % CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF
23 % SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR
      BUSINESS
24 % INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER
      IN
25 % CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR
      OTHERWISE)
26 % ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED
      OF THE
27 % POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.
28
29 function [ geom , iner , cpmo ] = polygeom( x , y )
30 % POLYGEOM Geometry of a planar polygon
31 %
32 % POLYGEOM( X, Y ) returns area , X centroid ,
33 % Y centroid and perimeter for the planar polygon
34 % specified by vertices in vectors X and Y.
```

```

35 %
36 % [ GEOM, INER, CPMO ] = POLYGEOM( X, Y ) returns
37 % area, centroid, perimeter and area moments of
38 % inertia for the polygon.
39 % GEOM = [ area  X_cen  Y_cen  perimeter ]
40 % INER = [ Ixx  Iyy  Ixy  Iuu  Ivv  Iuv ]
41 %   u,v are centroidal axes parallel to x,y axes.
42 % CPMO = [ I1  ang1  I2  ang2  J ]
43 %   I1,I2 are centroidal principal moments about axes
44 %       at angles ang1,ang2.
45 %   ang1 and ang2 are in radians.
46 %   J is centroidal polar moment.  J = I1 + I2 = Iuu + Ivv
47
48 %H.J. Sommer III - 02.05.14 - tested under MATLAB v5.2
49 %
50 % sample data
51 % x = [ 2.000  0.500  4.830  6.330 ]';
52 % y = [ 4.000  6.598  9.098  6.500 ]';
53 % 3x5 test rectangle with long axis at 30 degrees
54 % area=15, x_cen=3.415, y_cen=6.549, perimeter=16
55 % Ixx=659.561, Iyy=201.173, Ixy=344.117
56 % Iuu=16.249, Ivv=26.247, Iuv=8.660
57 % I1=11.249, ang1=30deg, I2=31.247, ang2=120deg, J=42.496
58 %
59 %H.J. Sommer III, Ph.D., Professor of Mechanical Engineering, 337
    Leonhard Bldg
60 %The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802
61 % (814)863-8997 FAX (814)865-9693 hjs1@psu.edu www.me.psu.edu/sommer
    /
62
63 %begin function POLYGEOM
64
65 %check if inputs are same size
66 if ~isequal( size(x), size(y) ),
67     error( 'X and Y must be the same size' );
68 end
69

```

```

70 %number of vertices
71 [ x, ns ] = shiftdim( x );
72 [ y, ns ] = shiftdim( y );
73 [ n, c ] = size( x );
74
75 %temporarily shift data to mean of vertices for improved accuracy
76 xm = mean(x);
77 ym = mean(y);
78 x = x - xm*ones(n,1);
79 y = y - ym*ones(n,1);
80
81 %delta x and delta y
82 dx = x( [ 2:n 1 ] ) - x;
83 dy = y( [ 2:n 1 ] ) - y;
84
85 %summations for CW boundary integrals
86 A = sum( y.*dx - x.*dy )/2;
87 Axc = sum( 6*x.*y.*dx -3*x.*x.*dy +3*y.*dx.*dx +dx.*dx.*dy )/12;
88 Ayc = sum( 3*y.*y.*dx -6*x.*y.*dy -3*x.*dy.*dy -dx.*dy.*dy )/12;
89 Ixx = sum( 2*y.*y.*y.*dx -6*x.*y.*y.*dy -6*x.*y.*dy.*dy ...
90           -2*x.*dy.*dy.*dy -2*y.*dx.*dy.*dy -dx.*dy.*dy.*dy )/12;
91 Iyy = sum( 6*x.*x.*y.*dx -2*x.*x.*x.*dy +6*x.*y.*dx.*dx ...
92           +2*y.*dx.*dx.*dx +2*x.*dx.*dx.*dy +dx.*dx.*dx.*dy )/12;
93 Ixy = sum( 6*x.*y.*y.*dx -6*x.*x.*y.*dy +3*y.*y.*dx.*dx ...
94           -3*x.*x.*dy.*dy +2*y.*dx.*dx.*dy -2*x.*dx.*dy.*dy )/24;
95 P = sum( sqrt( dx.*dx +dy.*dy ) );
96
97 %check for CCW versus CW boundary
98 if A < 0,
99     A = -A;
100     Axc = -Axc;
101     Ayc = -Ayc;
102     Ixx = -Ixx;
103     Iyy = -Iyy;
104     Ixy = -Ixy;
105 end
106

```

```
107 % centroidal moments
108 xc = Axc / A;
109 yc = Ayc / A;
110 Iuu = Ixx - A*yc*yc;
111 Ivv = Iyy - A*xc*xc;
112 Iuv = Ixy - A*xc*yc;
113 J = Iuu + Ivv;
114
115 % replace mean of vertices
116 x_cen = xc + xm;
117 y_cen = yc + ym;
118 Ixx = Iuu + A*y_cen*y_cen;
119 Iyy = Ivv + A*x_cen*x_cen;
120 Ixy = Iuv + A*x_cen*y_cen;
121
122 % principal moments and orientation
123 I = [ Iuu  -Iuv ;
124       -Iuv  Ivv ];
125 [ eig_vec , eig_val ] = eig(I);
126 I1 = eig_val(1,1);
127 I2 = eig_val(2,2);
128 ang1 = atan2( eig_vec(2,1) , eig_vec(1,1) );
129 ang2 = atan2( eig_vec(2,2) , eig_vec(1,2) );
130
131 % return values
132 geom = [ A  x_cen  y_cen  P ];
133 iner = [ Ixx  Iyy  Ixy  Iuu  Ivv  Iuv ];
134 cpmo = [ I1  ang1  I2  ang2  J ];
135
136 %end of function POLYGEOM
```

10. *Anexo III: Definición de los datos de material*

Para poder realizar la simulación correctamente es necesario obtener ciertos datos del material a fin de que exista coherencia entre los datos introducidos en las fórmulas clásicas y en el programa Deform3D.

Para poder explicar el procedimiento seguido a la hora de extraer los datos, se realizará el ejemplo para obtener los datos del Aluminio 5052.

10.1. Aluminio AL5052

Los datos se sacarán de las gráficas que proporciona el propio programa Deform. Pulsando sobre el botón señalado en marrón en la figura 8.4 se accede al menú que se muestra en la figura 10.1.

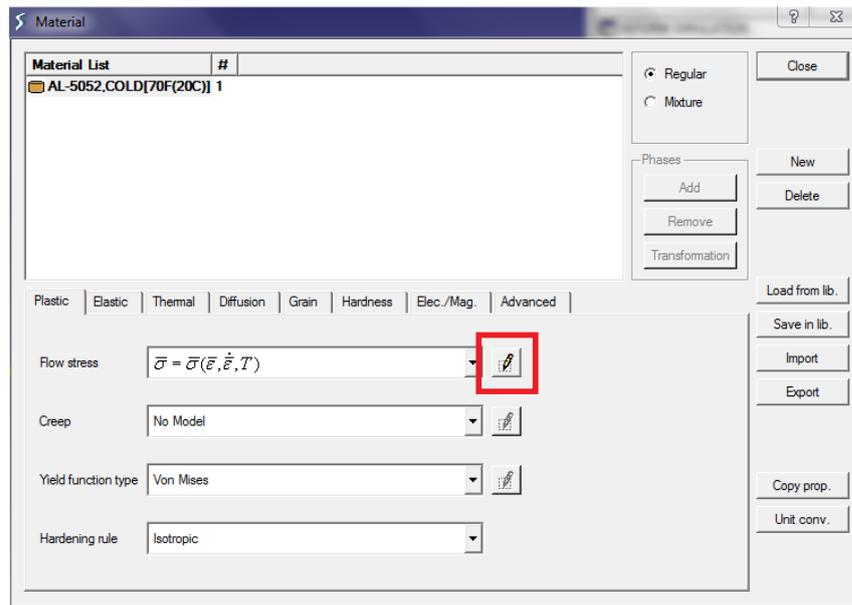


Figura 10.1: Menú de material

En primer lugar se copiará el valor del módulo elástico, E, pulsando en la pestaña elastic. Pulsando ahora en el botón marcado con un rectángulo rojo en la figura 10.1 se accede a la información de la región plástica del material, mostrado en la figura 10.2. En el caso del trabajo en frío el efecto de la velocidad de deformación (strain rate) no es relevante por lo que se tomarán los datos de por ejemplo la segunda columna. Estos datos serán exportados a Microsoft Excel.

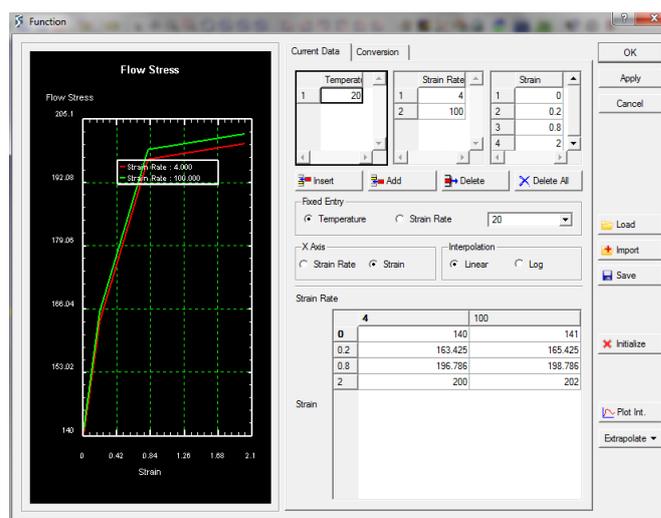


Figura 10.2: Gráfica del comportamiento plástico del material

Una vez exportados a Excel, se aplica logaritmo en base 10 a los datos y se representan en la gráfica mostrada en la figura 10.3.

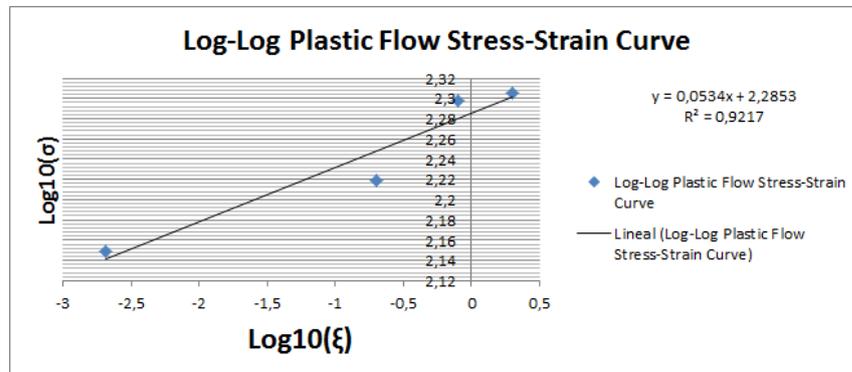


Figura 10.3: Gráfica logarítmica de los datos de la región plástica

Aplicando la función de tendencia lineal de Excel se obtiene que la ecuación de la regresión lineal es la mostrada en (10.1.1). Asumiendo que esta línea recta es una aproximación al comportamiento plástico en escala logarítmica, la ecuación (10.1.1) deberá tener la forma de la ecuación (10.1.2) [9]. Por tanto:

- $K = 10^{2,2853} = 192.885686 MPa$
- $n = 0.0534$

$$y = 0.0534x + 2.2853 \quad (10.1.1)$$

$$\log_{10}(\sigma) = n \log_{10}(\epsilon) + \log_{10}(K) \quad (10.1.2)$$

Para asegurar que la obtención de estos valores es correcto se muestra una gráfica comparativa en la figura 10.4. Como se puede apreciar la aproximación se ajusta bastante bien en la región plástica del material, que es lo que se buscaba, por tanto se dan por válidos los datos obtenidos.

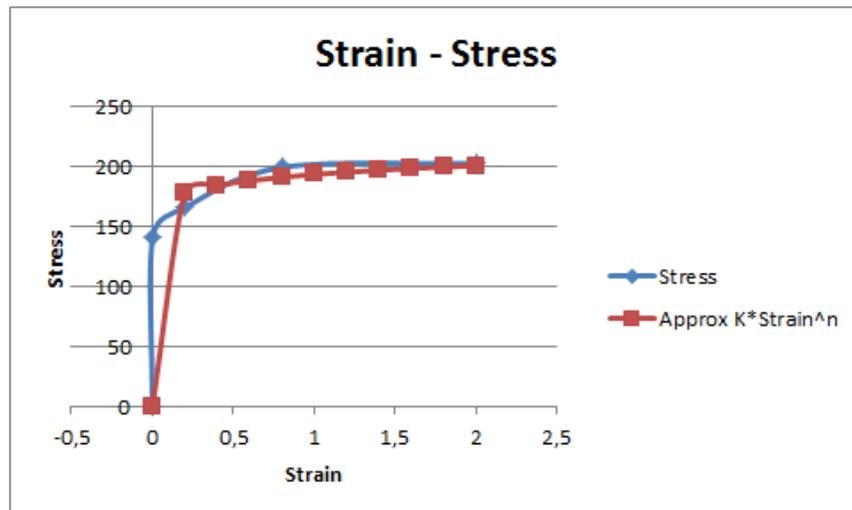


Figura 10.4: Comparación de la aproximación y la curva real de comportamiento del material

A modo de resumen se presentan a continuación los datos más importantes del material AL5052:

- $E= 68900 \text{ MPa}$
- $K= 192.885686 \text{ MPa}$
- $n= 0.0534$
- $\nu= 0.33$
- $\alpha= 2.2 \cdot 10^{-5}$

10.2. Acero AISI1008

La obtención de los datos para este acero se ha realizado igual forma que para el Aluminio AL5052, por lo que se mostrarán a continuación sólo los resultados obtenidos:

- $E= 206754 \text{ MPa}$
- $K= 567 \text{ MPa}$

- $n= 0.1128$
- $\nu= 0.3$
- $\alpha= 1.2 \cdot 10^{-5}$

10.3. Latón Cartridge Brass

La obtención de los datos para este acero se ha realizado igual forma que para el Aluminio AL5052 y el acero AISI1008, por lo que se mostrarán a continuación sólo los resultados obtenidos:

- $E= 110000 \text{ MPa}$
- $K= 856 \text{ MPa}$
- $n= 0.3604$
- $\nu= 0.33$
- $\alpha= 2.2 \cdot 10^{-5}$

11. *Anexo IV: Resultado de las fuerzas y momentos calculados según los modelos simplificados y DEFORM3D*

En este anexo se adjuntan los resultados de las simulaciones realizadas y posteriormente procesadas a través de Matlab.

El proceso seguido para obtener los resultados ha sido el explicado en el Anexo II, y aquí se mostrarán los resultados para cada caso de cálculo.

En algunos de los casos simulados, el coeficiente de rozamiento seco de Coulomb que se definió para cada material en la sección 5.1, no ha sido suficiente para llevar a cabo una laminación efectiva, ya que los rodillos patinaban y no permitían que se efectuara laminación. En dichos casos se ha aumentado el coeficiente de laminación hasta que la laminación ha podido llevarse a cabo.

11.1. **Acero AISI1008**

Para el caso del Acero AISI1008 se exponen a continuación los resultados de las simulaciones llevadas a cabo. Para el caso $L/h=0.1$ la laminación no ha podido llevarse a cabo ni para valores muy altos del coeficiente de rozamiento.

11.1.1. **L/h = 10**

1. Datos Iniciales

- $R= 700$ [mm]

- Velocidad de Giro= 68.2092613 [rpm]
- $K= 567.022$ [MPa]
- $n= 0.1128$
- $\mu= 0.05$
- $h_0= 4$ [mm]
- $h_f= 2.5$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 31.37330521 [mm]
- Brazo de palanca= 14,17759662 [mm]
- $\lambda= 0.4519$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 3492204.663 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 6430542.334 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 4548956.711 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 2520281.628 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 6323190.971 [N]
- Gráfica comparativa:

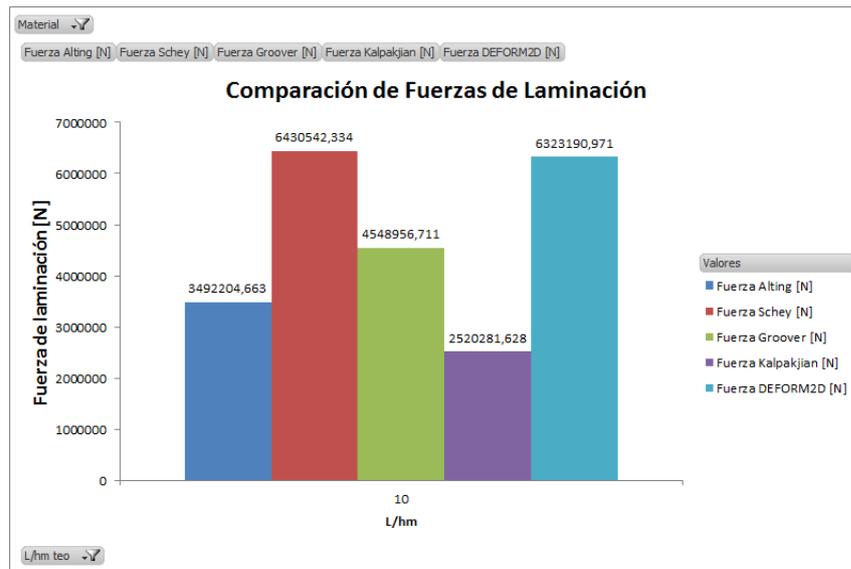


Figura 11.1: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=10

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 113160,3644 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 208373,3871 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 147403,0444 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 81666,4586 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 198811,0418 [N*m]
- Gráfica comparativa:

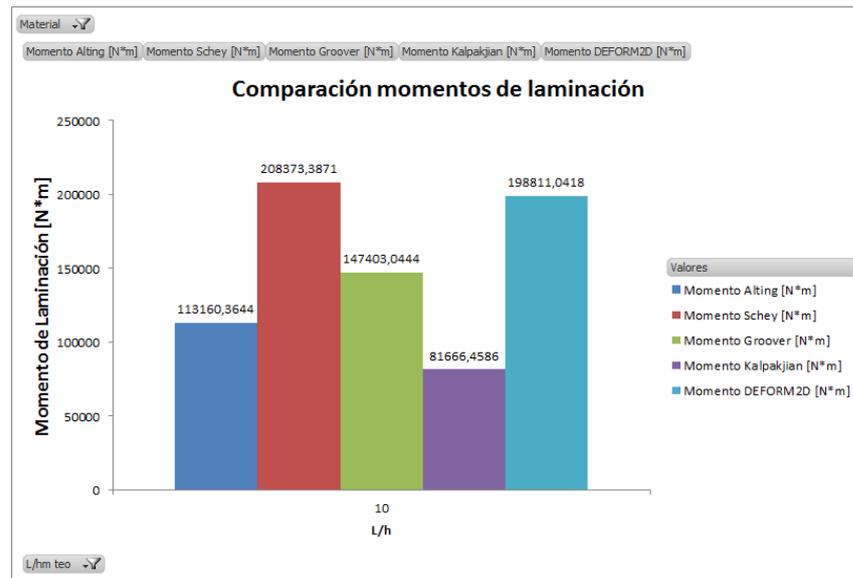


Figura 11.2: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=10

11.1.2. L/h = 5

1. Datos Iniciales

- $R = 700$ [mm]
- Velocidad de Giro = 68.2092613 [rpm]
- $K = 567.022$ [MPa]
- $n = 0.1128$
- $\mu = 0.05$
- $h_0 = 6.5$ [mm]
- $h_f = 5.25$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto = 27.23149285 [mm]
- Brazo de palanca = 13.65136972 [mm]
- $\lambda = 0.4895$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 2596407.386 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 4793961.836 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 3799104.545 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 1873795.629 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 4924264.044 [N]
- Gráfica comparativa:

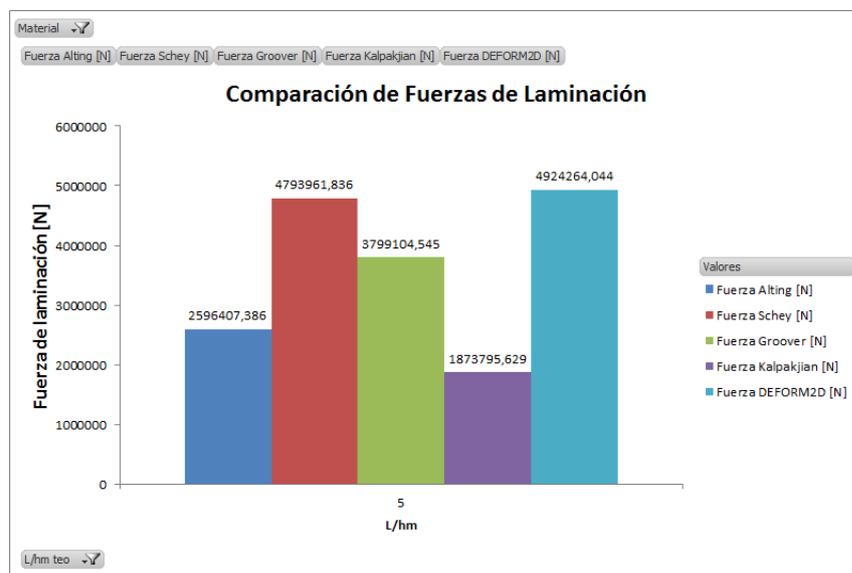


Figura 11.3: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=5

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 76802.76623 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 141807.3035 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 56189.51397 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 55427.6222 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 134445.2952 [N*m]
- Gráfica comparativa:

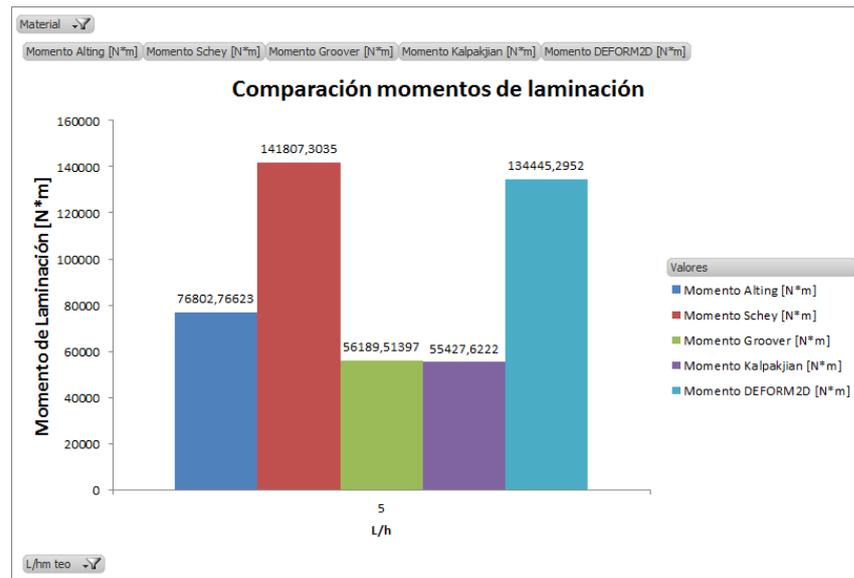


Figura 11.4: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=5

11.1.3. L/h = 1

1. Datos Iniciales

- $R = 500$ [mm]
- Velocidad de Giro = 95.49296585 [rpm]
- $K = 567.022$ [MPa]
- $n = 0.1128$
- $\mu = 0.05$
- $h_0 = 23$ [mm]
- $h_f = 22$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto = 20.47415005 [mm]
- Brazo de palanca = 10.52780796 [mm]
- $\lambda = 0,5142$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 1504650.363 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 2769669.761 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 2405863.689 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 1085887.865 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 2825612.898 [N]
- Gráfica comparativa:

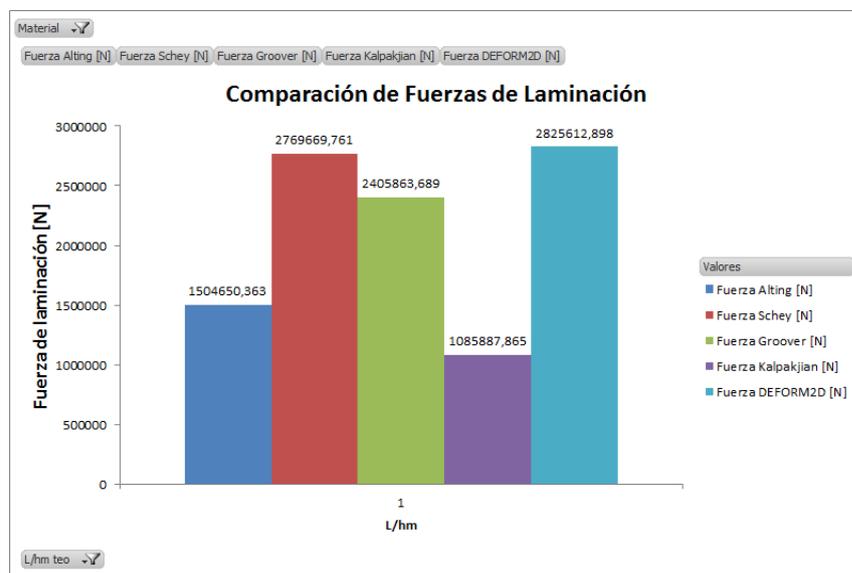


Figura 11.5: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=1

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 33645.00495 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 61931.6986 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 26898.37377 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 24281.19083 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 57905.32739 [N*m]
- Gráfica comparativa:

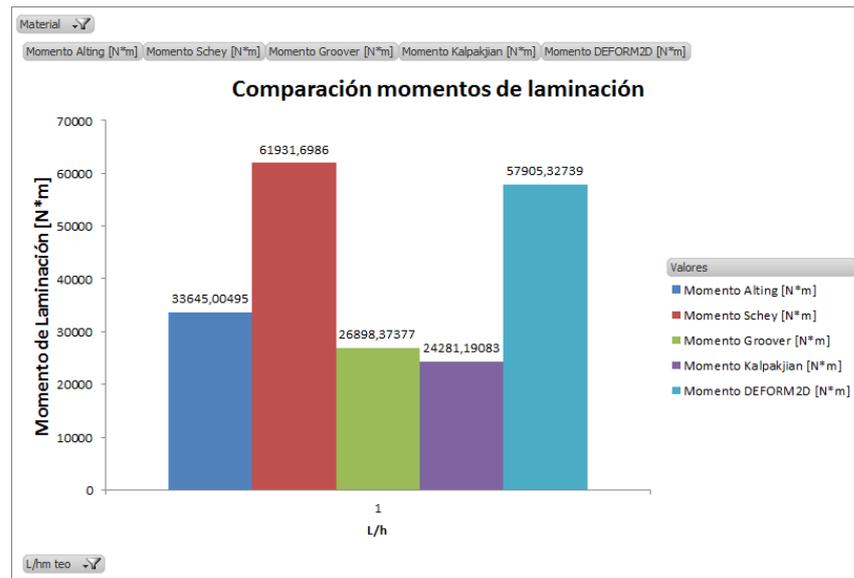


Figura 11.6: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=1

11.1.4. L/h = 0.5

1. Datos Iniciales

- R= 400 [mm]
- Velocidad de Giro= 119.3662073 [rpm]
- K= 567.022 [MPa]
- n= 0.1128
- μ = 0.05
- h_0 = 35 [mm]
- h_f = 34.25 [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 16.48686904 [mm]
- Brazo de palanca= 8.248890532 [mm]
- λ = 0.5306

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 1084106.101 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 2410403.938 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 1718424.373 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 782386.1868 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 2258313.58 [N]
- Gráfica comparativa:

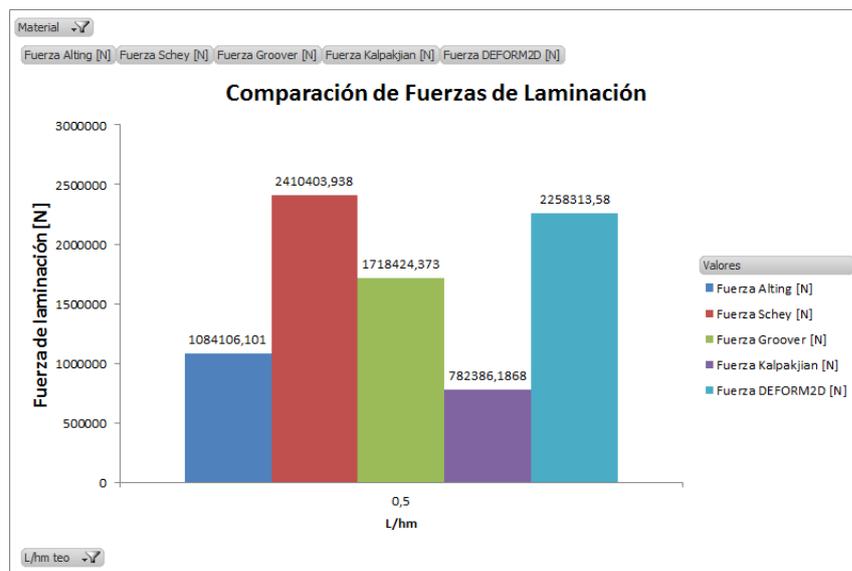


Figura 11.7: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=0.5

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 18777.26848 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 41749.42087 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 14881.99161 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 13551.32627 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 37256.69599 [N*m]
- Gráfica comparativa:

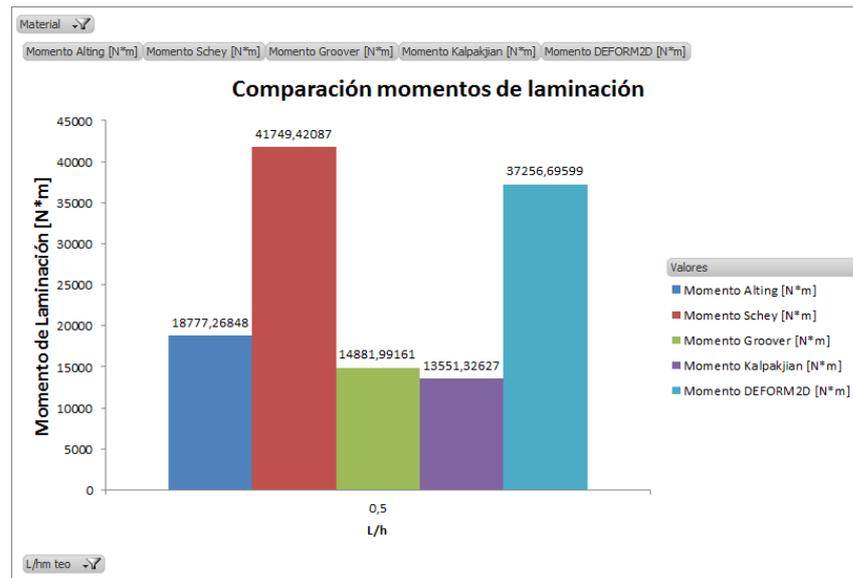


Figura 11.8: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AISI1008, L/h=0.5

11.2. Aluminio AL5052

Para el caso del Aluminio AL5052 se exponen a continuación los resultados de las simulaciones llevadas a cabo. A partir del caso L/h= 1 el coeficiente de rozamiento ha sido aumentado para que la laminación pudiera llevarse a cabo. Además en los casos L/h=10 y L/h=1 se han colocado guías para que la placa al laminarse no hiciera movimientos no deseados.

11.2.1. L/h = 10

1. Datos Iniciales

- R= 700 [mm]
- Velocidad de Giro= 68.20926132 [rpm]
- K= 192.886 [MPa]
- n= 0.0534
- μ = 0.03
- h_0 = 2.25 [mm]

- $h_f = 1.7$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 29.22262703 [mm]
- Brazo de palanca= 14.6853063 [mm]
- $\lambda =$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 692390.4103 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 1316859.397 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 1007074.366 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 499689.7372 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 1104997.775 [N]
- Gráfica comparativa:

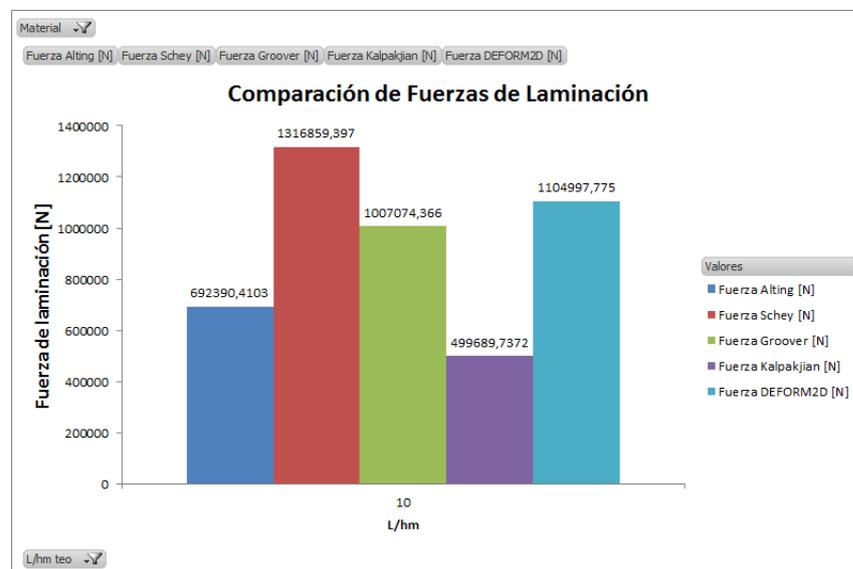


Figura 11.9: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=10

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 13585.68088 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 25838.64719 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 9880.112973 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 9804.62064 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 32456.08713 [N*m]
- Gráfica comparativa:

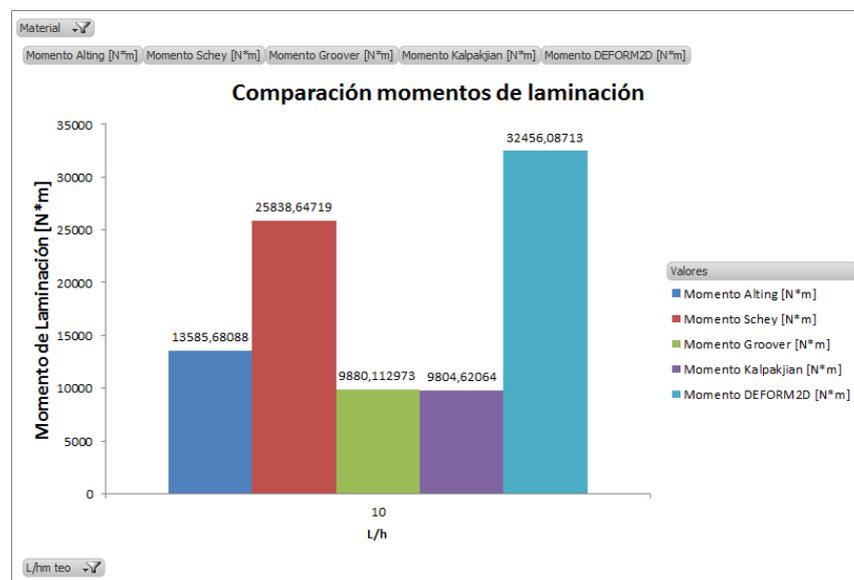


Figura 11.10: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=10

11.2.2. L/h = 5

1. Datos Iniciales

- R= 700 [mm]
- Velocidad de Giro= 68.20926132 [rpm]
- K= 192.886 [MPa]
- n= 0.0534
- μ = 0.03
- h_0 = 4 [mm]

- $h_f = 3.5$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 20.84355151 [mm]
- Brazo de palanca= 10,43110967 [mm]
- $\lambda = 0,536$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 610718.5564 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 1123079.32 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 922928.6233 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 440748.1537 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 1136778.783 [N]
- Gráfica comparativa:

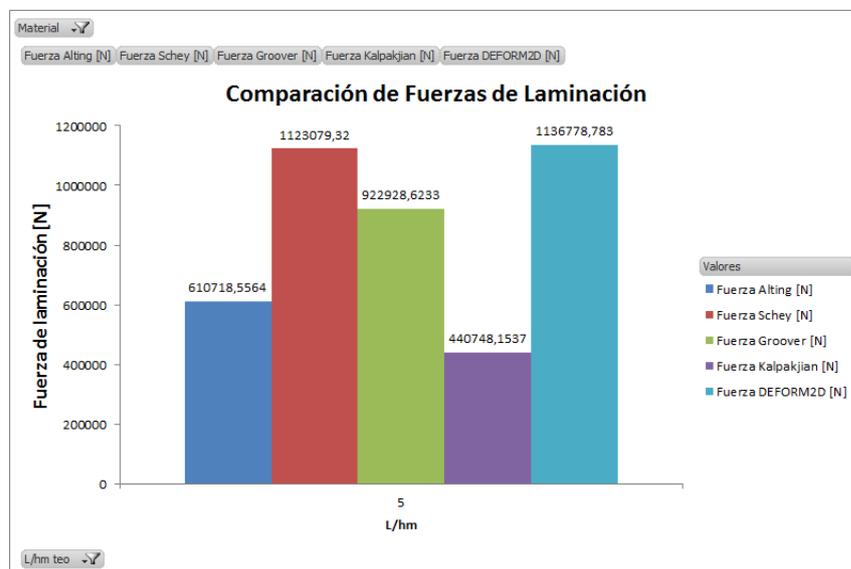


Figura 11.11: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=5

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 11425.49799 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 21010.89017 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 8633.206752 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 8245.642924 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 23715.55549 [N*m]
- Gráfica comparativa:

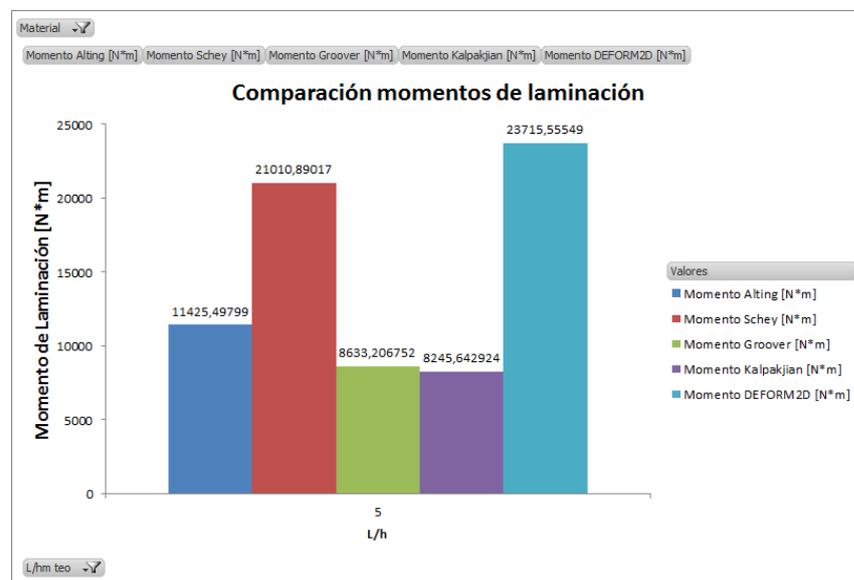


Figura 11.12: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=5

11.2.3. L/h = 1

1. Datos Iniciales

- R= 500 [mm]
- Velocidad de Giro= 95.49296585 [rpm]
- K= 192.886 [MPa]
- n= 0.0534
- μ = 0.12
- h_0 = 14.3 [mm]

- $h_f = 13.9$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 18.72094209 [mm]
- Brazo de palanca= 9.721785228 [mm]
- $\lambda =$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 639281.5338 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 1189696.379 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 981939.9641 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian=461361.707 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 1197550.933 [N]
- Gráfica comparativa:

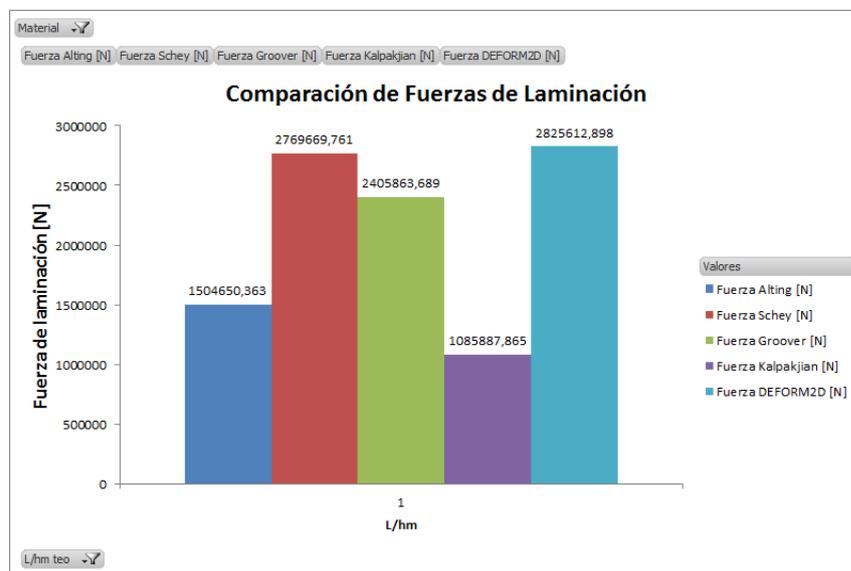


Figura 11.13: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AISI1008, L/h=1

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 13256.42403 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 24670.06919 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 10180.97024 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 9566.999981 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 22435.92147 [N*m]
- Gráfica comparativa:

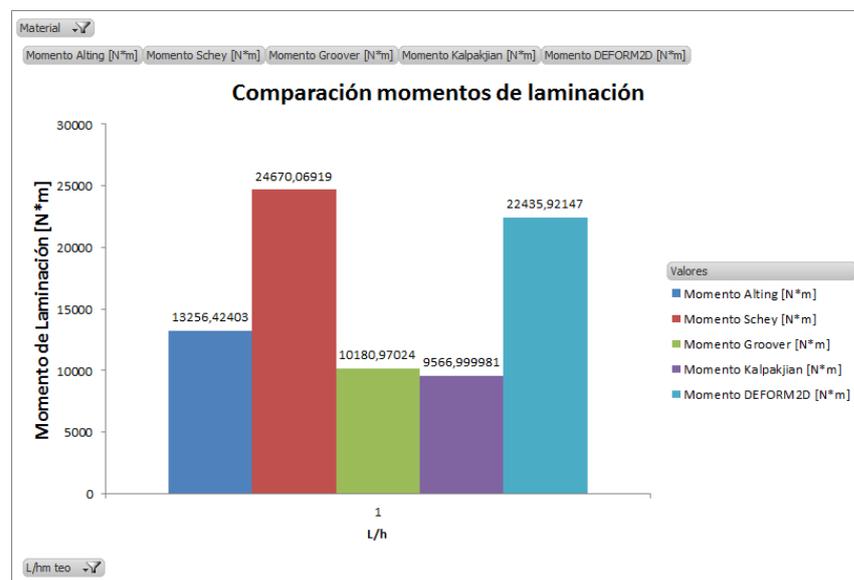


Figura 11.14: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=1

11.2.4. L/h = 0.5

1. Datos Iniciales

- R= 400 [mm]
- Velocidad de Giro= 119.3662073 [rpm]
- K= 192.886 [MPa]
- n= 0.0534
- μ = 0.12
- h_0 = 22.1 [mm]

- $h_f = 21.8$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto = 11.2412942 [mm]
- Brazo de palanca = 5.626518193 [mm]
- $\lambda =$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting = 324265.3612 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey = 671927.2108 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover = 478480.8887 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian = 234018.3669 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D = 802216.6991 [N]
- Gráfica comparativa:

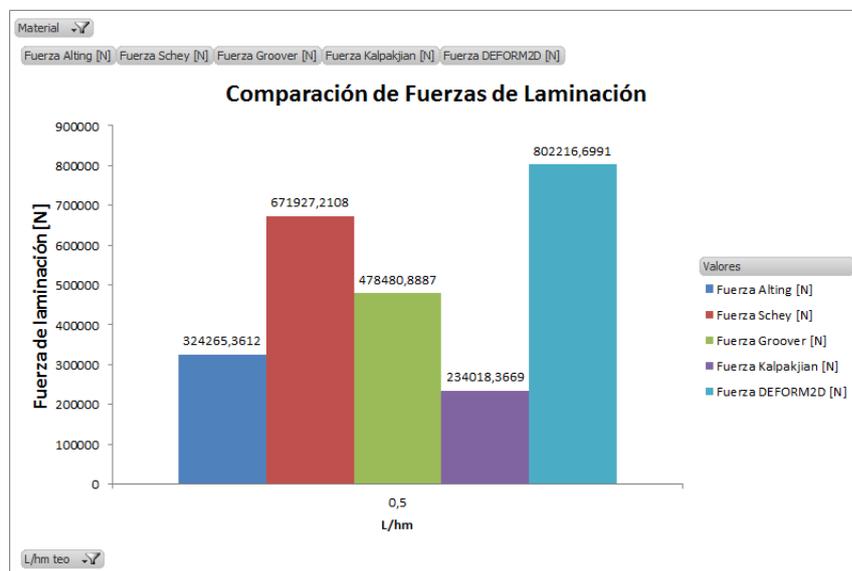


Figura 11.15: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=0.5

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 3552.149058 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 7360.593807 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 2620.747761 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 2563.542769 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 9027.229945 [N*m]
- Gráfica comparativa:

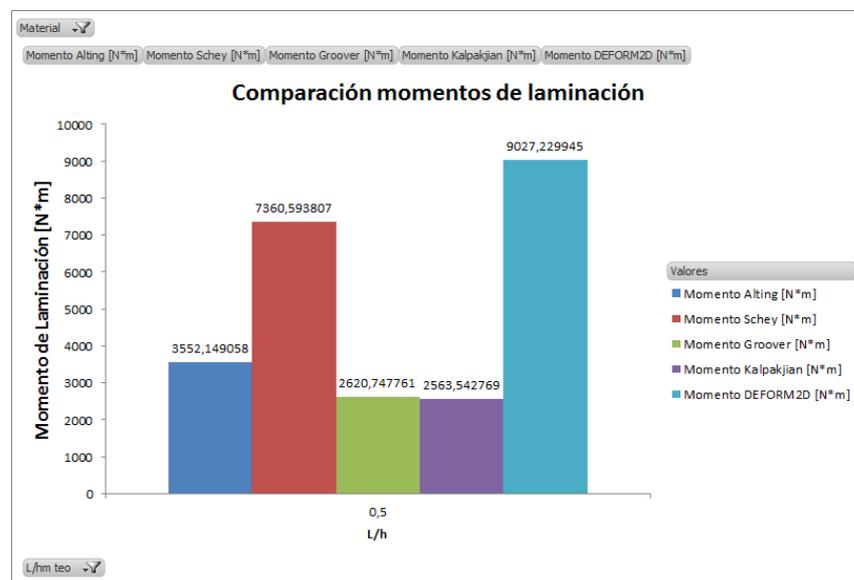


Figura 11.16: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=0.5

11.2.5. L/h = 0.1

1. Datos Iniciales

- R= 300 [mm]
- Velocidad de Giro= 159.1549431 [rpm]
- K= 192.886 [MPa]
- n= 0.0534
- μ = 0.13
- h_0 = 77.55 [mm]

- $h_f = 77.35$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 11.52200072 [mm]
- Brazo de palanca= 5.765653222 [mm]
- $\lambda = 0.591$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 227110.3006 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 928594.4663 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 309531.4888 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 163902.7415 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 1322051.684 [N]
- Gráfica comparativa:

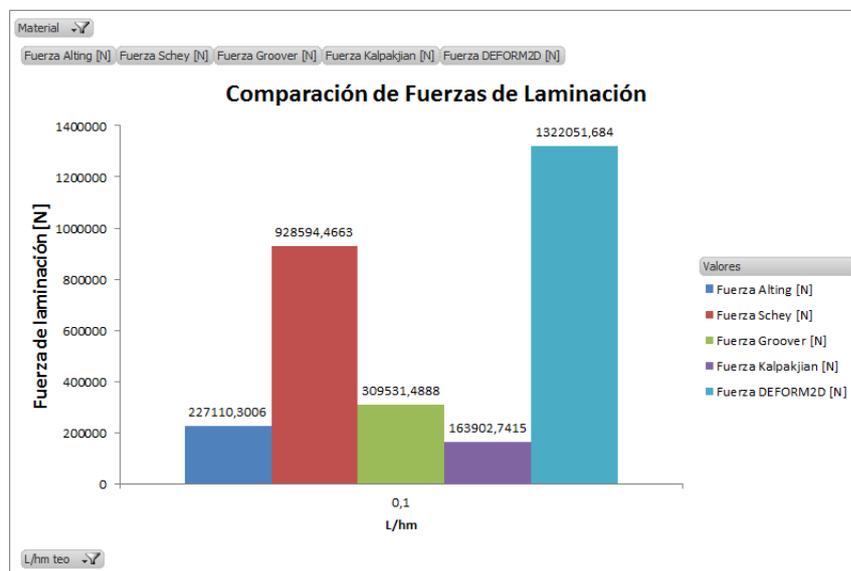


Figura 11.17: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, AL5052, L/h=0.1

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 1759.188824 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 7192.861807 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 1198.810301 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 1269.585176 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 15245.09929 [N*m]
- Gráfica comparativa:

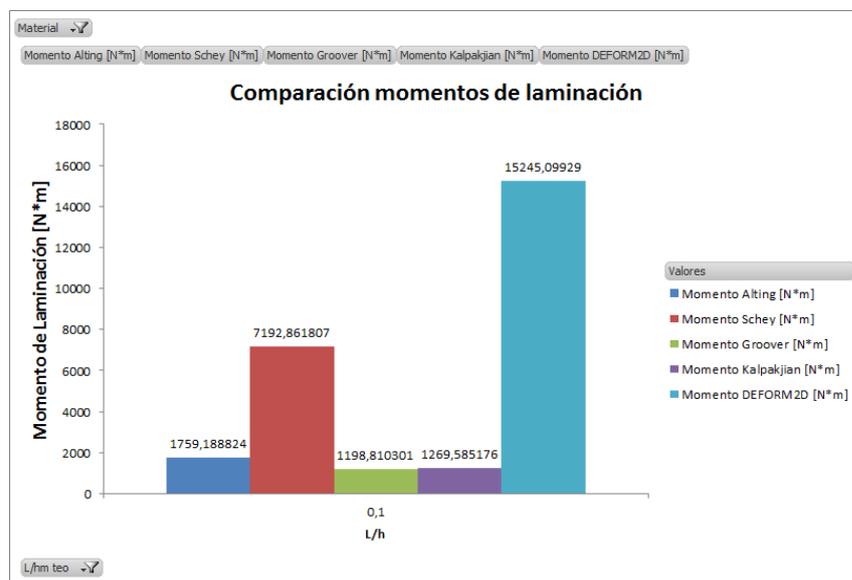


Figura 11.18: Gráfica comparativa de momentos de laminación, AL5052, L/h=0.1

11.3. Latón CARTRIDGE BRASS

Para el caso del Latón Cartridge Brass se exponen a continuación los resultados de las simulaciones llevadas a cabo. El coeficiente de rozamiento seco de Coulomb ha sido aumentado en los dos últimos casos para que se pudiera laminar la placa.

11.3.1. L/h = 10

1. Datos Iniciales

- R= 700 [mm]

- Velocidad de Giro= 68.20926132 [rpm]
- $K= 856.052$ [MPa]
- $n= 0.3604$
- $\mu= 0.1$
- $h_0= 9.5$ [mm]
- $h_f= 3.5$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 63.69453583 [mm]
- Brazo de palanca= 27.83451216 [mm]
- $\lambda= 0.437$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 12556225.84 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 23444028.87 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 12227814.45 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 9061675.462 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 24495580.69 [N]
- Gráfica comparativa:

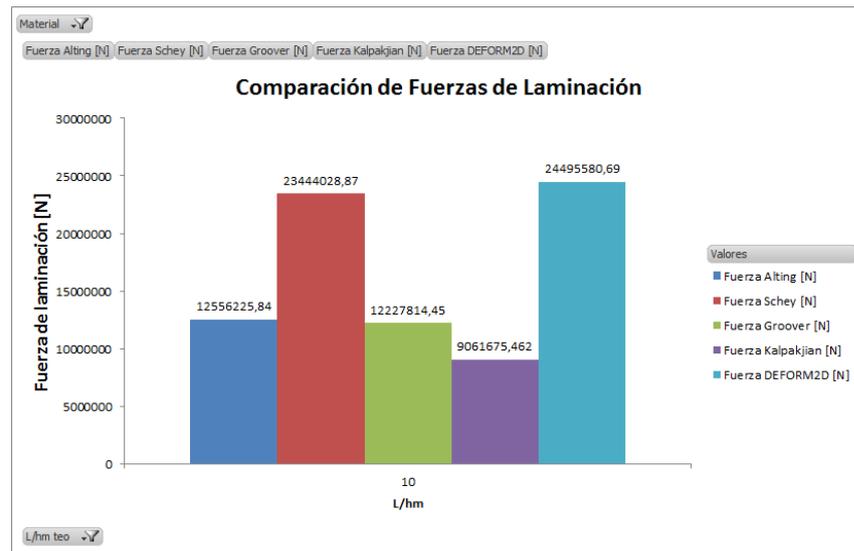


Figura 11.19: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=10$

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 813736.4383 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 1519346.72 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 396226.4738 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 587263.6896 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 1568826.994 [N*m]
- Gráfica comparativa:

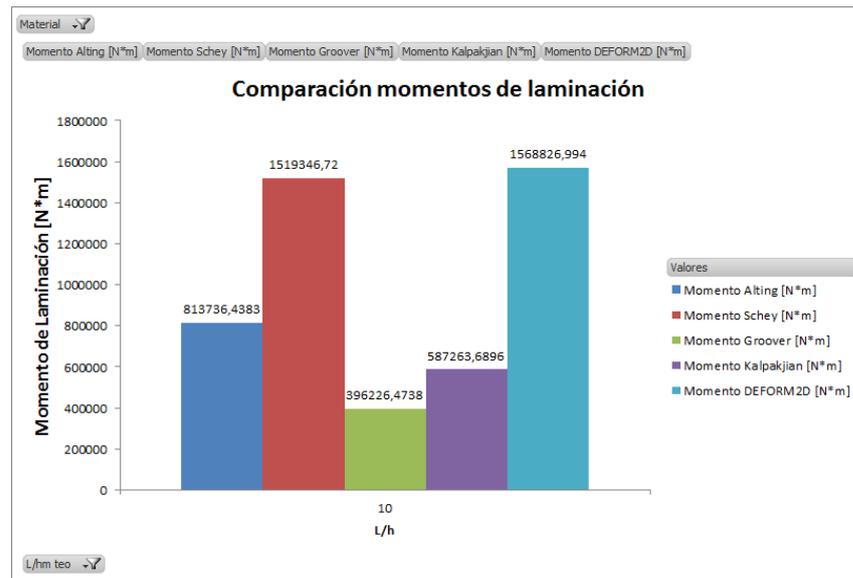


Figura 11.20: Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=10$

11.3.2. $L/h = 5$

1. Datos Iniciales

- $R = 700$ [mm]
- Velocidad de Giro = 68.20926132 [rpm]
- $K = 856.052$ [MPa]
- $n = 0.,3604$
- $\mu = 0.1$
- $h_0 = 14.25$ [mm]
- $h_f = 9.25$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto = 54.86680316 [mm]
- Brazo de palanca = 23.77378581 [mm]
- $\lambda = 0.4333$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 7427349.283 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 11887779.1 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 8254015.973 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 5360227.635 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 11705076.09 [N]
- Gráfica comparativa:

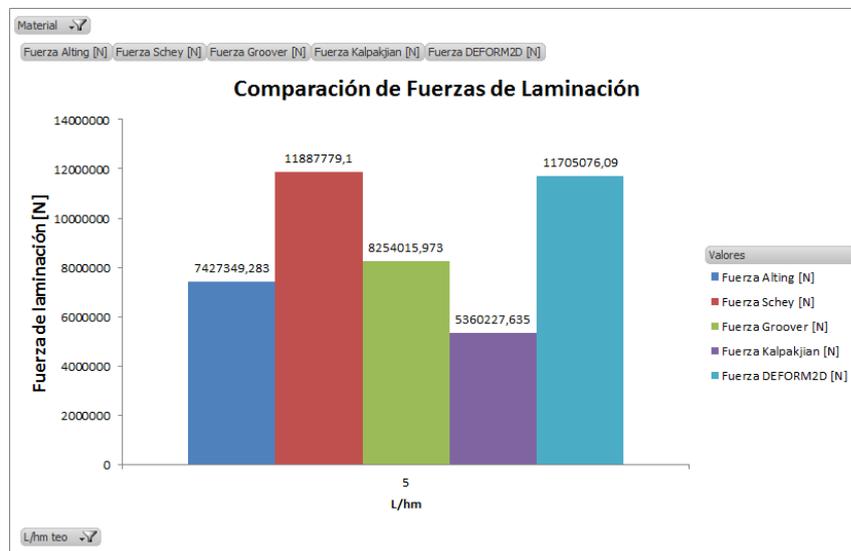


Figura 11.21: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=5$

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 439407.9094 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 703290.4958 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 244157.0851 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 317115.3434 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 643359.8708 [N*m]

- Gráfica comparativa:

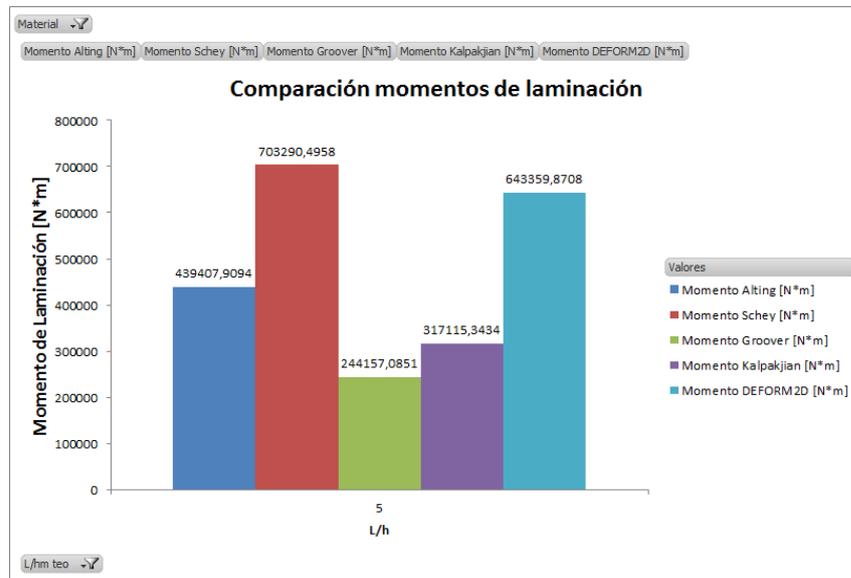


Figura 11.22: Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=5$

11.3.3. $L/h = 1$

1. Datos Iniciales

- $R= 500$ [mm]
- Velocidad de Giro= 95.49296585 [rpm]
- $K= 856.052$ [MPa]
- $n= 0.3604$
- $\mu= 0.1$
- $h_0= 46.75$ [mm]
- $h_f= 42.75$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 41.40187149 [mm]
- Brazo de palanca= 20.7175956 [mm]

- $\lambda = 0.7161$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 1837921.689 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 4067763.128 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 3536800.326 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 1326405.728 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 3227134.11 [N]
- Gráfica comparativa:

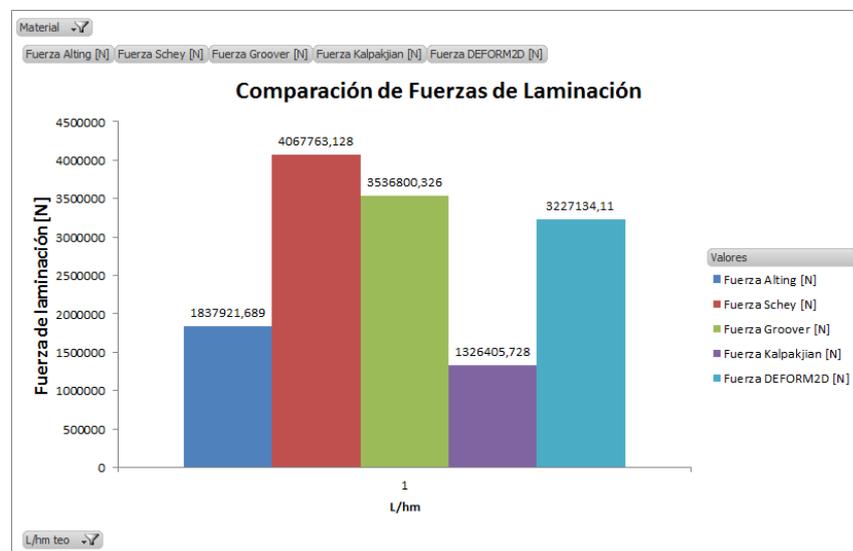


Figura 11.23: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=1$

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 82194.3567 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 181915.8974 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 79085.25952 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 59318.66746 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 133716.9357 [N*m]

- Gráfica comparativa:

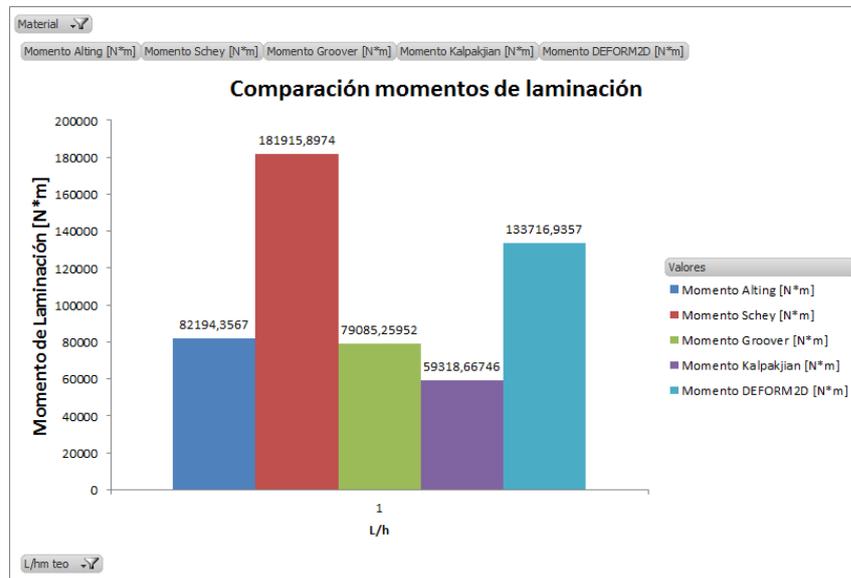


Figura 11.24: Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=1$

11.3.4. $L/h = 0.5$

1. Datos Iniciales

- $R= 400$ [mm]
- Velocidad de Giro= 119.3662073 [rpm]
- $K=856.052$ [MPa]
- $n= 0.3604$
- $\mu= 0.11$
- $h_0= 71$ [mm]
- $h_f= 68$ [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 31.37174225 [mm]
- Brazo de palanca= 15.70081911 [mm]

- $\lambda = 0.5888$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 1028638.996 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 2960754.628 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 2107039.8 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 742356.2519 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 2146016.512 [N]
- Gráfica comparativa:

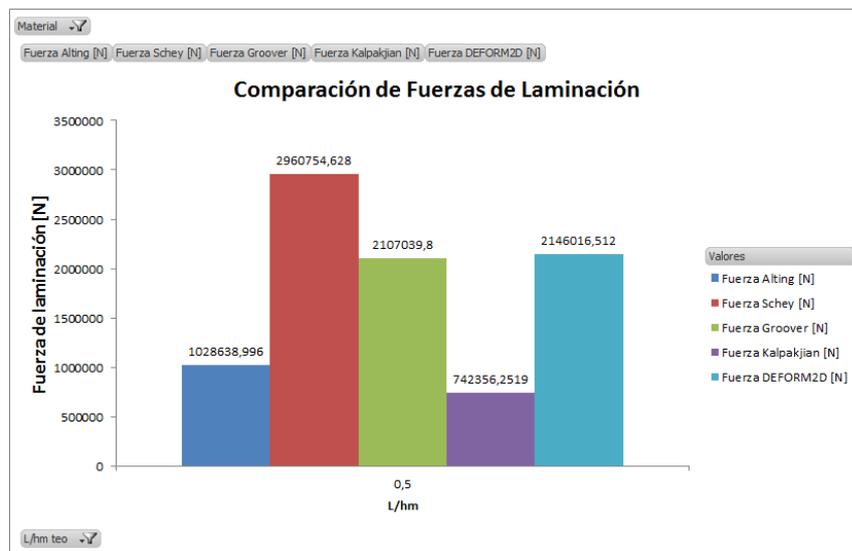


Figura 11.25: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=0.5$

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 35633.10009 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 102563.5489 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 36494.99987 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 25715.97491 [N*m]

- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 67388.07089 [N*m]
- Gráfica comparativa:

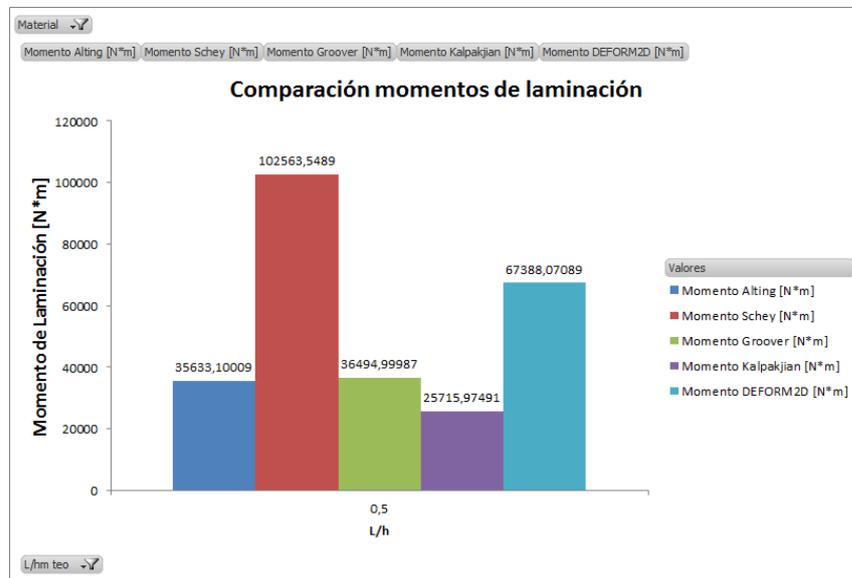


Figura 11.26: Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.5

11.3.5. L/h = 0.1

1. Datos Iniciales

- R= 300 [mm]
- Velocidad de Giro= 159.1549431 [rpm]
- K= 856.052 [MPa]
- n= 0.3604
- μ = 0.15
- h_0 = 246 [mm]
- h_f = 244 [mm]

2. Parámetros calculados

- Longitud de contacto= 23.50831874 [mm]

- Brazo de palanca= 11.76394038 [mm]
- $\lambda = 0.6103$

3. Fuerzas de Laminación calculadas

- Fuerza de laminación según modelo de Alting= 511133.4881 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Schey= 2452382.081 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Groover= 817460.6937 [N]
- Fuerza de laminación según modelo de Kalpakjian= 368878.8212 [N]
- Fuerza de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 2991818.597 [N]
- Gráfica comparativa:

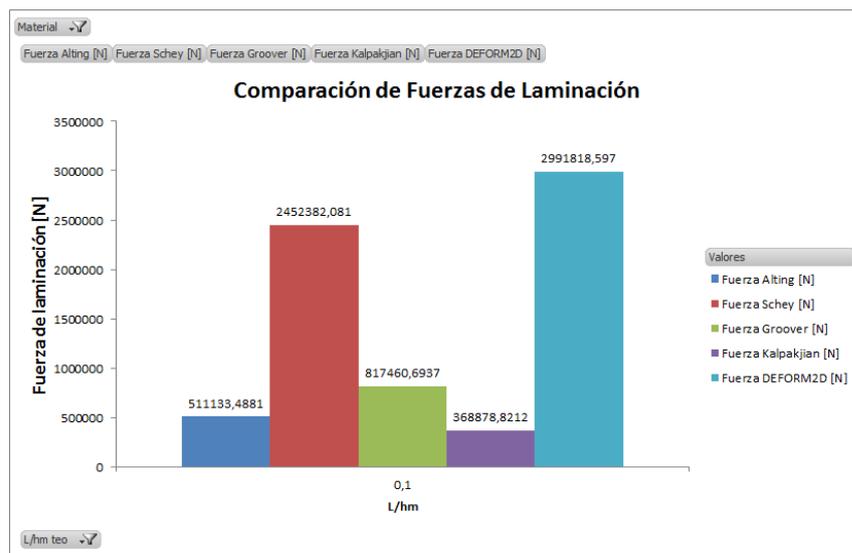


Figura 11.27: Gráfica comparativa de fuerzas de laminación, CARTRIDGE BRASS, $L/h=0.1$

4. Momentos de Laminación calculados

- Momento de laminación según modelo de Alting= 12520.16236 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Schey= 60070.84753 [N*m]
- Momento de laminación según modelo de Groover= 10011.80792 [N*m]

- Momento de laminación según modelo de Kalpakjian= 9035.648888 [N*m]
- Momento de laminación obtenida del modelo DEFORM3D= 70392.22228 [N*m]
- Gráfica comparativa:

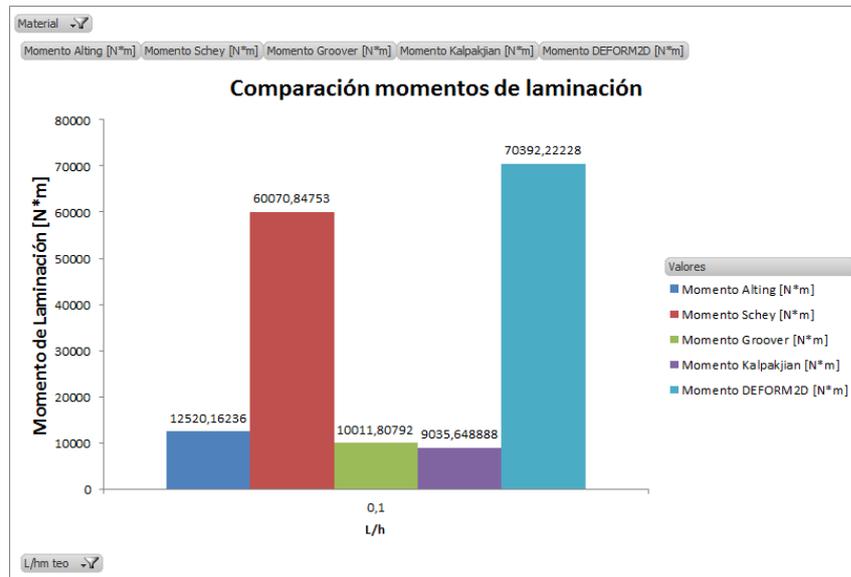


Figura 11.28: Gráfica comparativa de momentos de laminación, CARTRIDGE BRASS, L/h=0.1

12. Anexo V: Graph2Vector

En un principio se pensó obtener los datos del material a través de gráficas pertenecientes a diferentes libros. Aunque finalmente la obtención de datos del material se ha realizado de forma diferente, tal y como se explica en el Anexo III, sí que ha sido necesario la obtención de datos de gráficas a partir de imágenes, por ejemplo las gráficas correspondiente a los coeficientes Q_i y Q_p del modelo de Schey.

Graph2Vector es un GUI programado en Matlab que permite introducir una gráfica, inicialmente estaba ideado para diagramas tensión-deformación, y a través de clicks de ratón poder establecer los límites de dicha gráfica y los puntos de la misma.

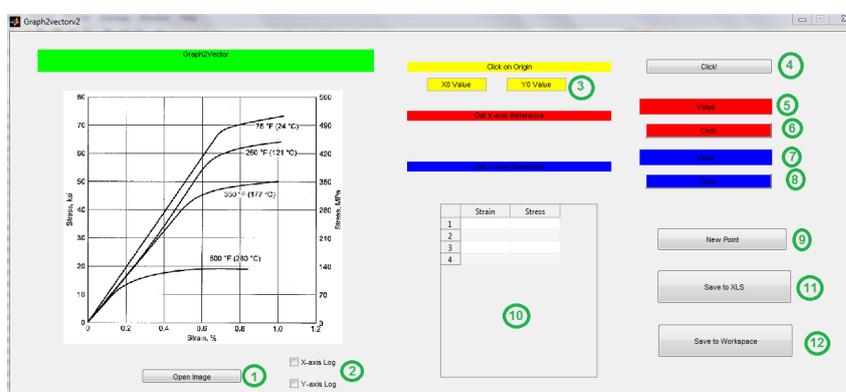


Figura 12.1: Graph2Vector GUI

12.1. Descripción del entorno gráfico

Se describirá el entorno gráfico del programa en función de la numeración descrita en la figura 12.1.

1. Mediante el botón "Open Image" se puede seleccionar la imagen de la gráfica

de la cual se quiere obtener los datos. En esta versión del programa se hace necesario que la imagen este lo menos distorsionada y girada posible. Posteriormente se mostrará la imagen seleccionada en los ejes dispuestos para ello

2. Mediante esta opción se podrá seleccionar si algún eje de la gráfica, o los dos, son ejes logarítmicos o no.

3. En el caso de que el origen de coordenadas no corresponda con los valores $x=0$ e $y=0$, se puede especificar el valor en los recuadros en amarillo.

4. Mediante el boton click on origin se seleccionará el origen en la gráfica introducida.

5. y 7. En estos cuadros de texto se introducirá los valores de los puntos de referencia de los ejes x e y respectivamente. Esto se hace con intención de poder dimensionar los valores posteriormente.

6. y 8. Estos botones permitirán seleccionar con el ratón el lugar en que se encuentran los puntos de referencia de los ejes x e y respectivamente.

9. Una vez definidas todas las referencias este botón permitirá seleccionar con el ratón los distintos puntos de la gráfica que se quiere guardar. Cada vez que se quiera agregar un punto nuevo se ha de pinchar en este botón. Se recomienda tomar los puntos en el sentido de las x crecientes.

10. Cada uno de los puntos que se guardan se muestran en esta tabla.

11. Este botón permite, una vez se han seleccionado todos los puntos exportar los resultados a una hoja excel, que se guardará en el mismo directorio donde se esté ejecutando el programa, con el nombre graph2vector.xls.

12. Mediante este botón se guardarán los puntos seleccionados en la gráfica en el Workspace de Matlab para poder trabajar con ellos posteriormente.

12.2. Ejemplo de utilización

En primer lugar se seleccionará la imagen de la gráfica que se quiera guardar haciendo uso del botón **1**.

Luego se hará click en el botón **4** y posteriormente en el origen de gráfica tal y como se muestra en la figura 12.2. En este caso el origen de coordenadas co-

responde a $x=0$ e $y=0$ por lo que no es necesario introducir ningún valor en los cuadros amarillos. Asimismo ningún eje de la gráfica es logarítmico por lo que no se seleccionará ninguna casilla de **2**.

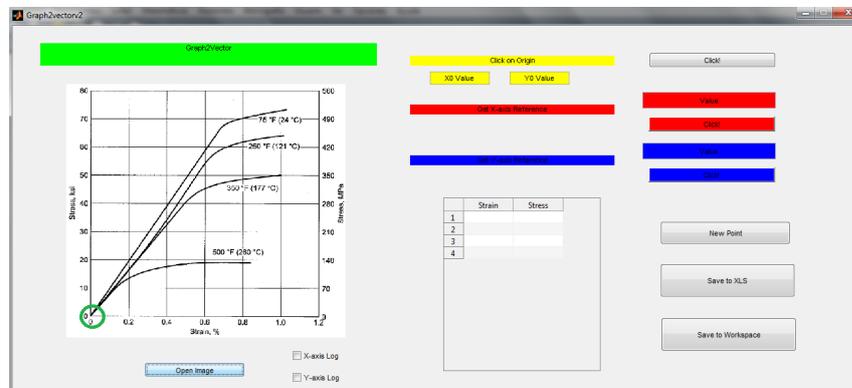


Figura 12.2: Graph2Vector GUI, paso 2

Posteriormente se introducirán los puntos de referencia del eje x y del eje y. Los puntos de referencia están marcados en la figura 12.3. Por tanto en el recuadro **5** se escribirá 0.8 y en el **7** 40. Seguidamente se pincha con el ratón sobre los botones **6** y **8** y se indica dónde se encuentran los puntos de referencia en la imagen de la gráfica.



Figura 12.3: Graph2Vector GUI, paso 3

Una vez hecho esto ya se puede proceder a la introducción de los puntos de la gráfica. Para introducir un punto, ha de pincharse sobre el botón **8** y posteriormente en el punto de la gráfica deseado. Las coordenadas de los puntos referencias en ejes

de la imagen de la gráfica aparecerá en la tabla **10**. En la figura 12.4 se muestran los puntos seleccionados y las coordenadas de los mismos.

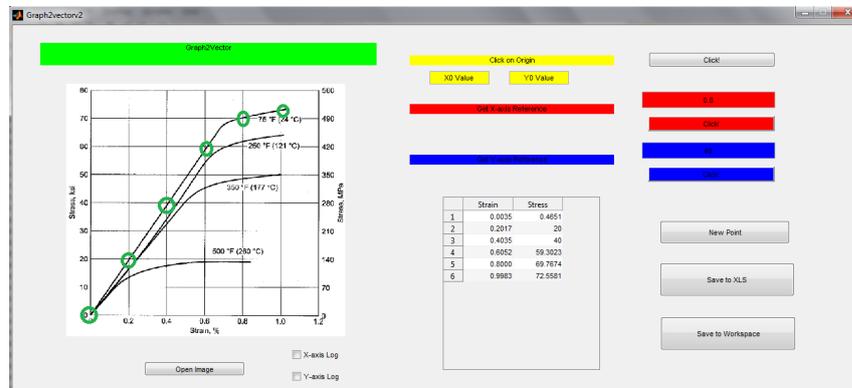


Figura 12.4: Graph2Vector GUI, paso 4

Una vez seleccionados todos los puntos deseados se puede guardar en un archivo de excel, que se guardará en la misma carpeta en la que se esté ejecutando el programa, pinchando sobre el botón **11**. En caso de que se quiera guardar al Workspace de Matlab basta con pinchar sobre el botón **12**.

Referencias

- [1] Groover, M.P. (2010), *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. ISBN: 9780470467008, Mc-Graw-Hill
- [2] Schey, J.A. and Cárdenas, J.L. (2002), *Procesos de manufactura*. ISBN: 9789701035733, Mc-Graw-Hill
- [3] Kalpakjian, S. and Schmid, S.R. and García, G.S. and López, U.F.(2002), *Manufactura, ingeniería y tecnología*. ISBN: 9789702601371, Pearson Educación
- [4] Leo Alting (1993), *Manufacturing Engineering Processes, Second Edition*. ISBN: 9780824791292, Taylor & Francis
- [5] International, ASM (2002), *Atlas of Stress-strain Curves*. ISBN: 9780871707390, ASM International
- [6] Kumar K. Mukerjee (1973), *A CRITICAL REVIEW OF THE MECHANICS OF METAL ROLLING; ITS APPLICATION TO THE DESIGN OF HOT STRIP MILLS*.
- [7] Scientific Forming Technologies Corporation (2011), *DEFORM 2D V10.2 System Manual*
- [8] Hitchcock, J.H. (1935), *Roll neck bearings. Report of ASME Research Committee*
- [9] Materion Brush Performance Alloys, TECHNICAL TIDBITS, Issue 50 (2013) *Strain Hardening*

-
- [10] J.A. SCHEY, T.R. VENNER and S.L. TAKOMANA (1982), *THE EFFECT OF FRICTION ON PRESSURE IN UPSETTING AT LOW DIAMETER-TO-HEIGHT RATIOS*, *Journal of Mechanical Working Technology*, 6 (1982), 23-33
- [11] J.F.W. Bishop (1956), *An approximate Method for determining the temperatures reached in steady motion problems of plane plastic strain*, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 9 236-246