

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN POR
CO-SIMULACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN
DE ANILLOS EN CALIENTE**

POR:

ING. ALAN MARIO GONZÁLEZ VILLARREAL

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

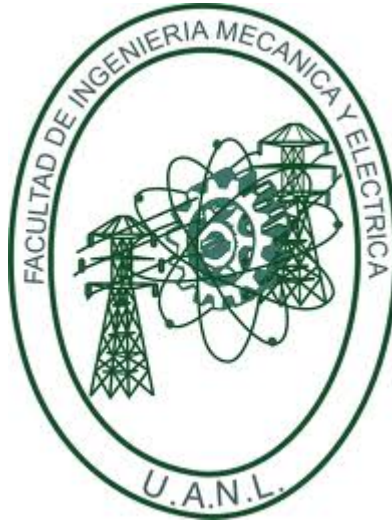
CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN POR

CO-SIMULACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN

DE ANILLOS EN CALIENTE

POR:

ING. ALAN MARIO GONZÁLEZ VILLARREAL

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA

INGENIERÍA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Determinación del coeficiente de fricción por co-simulación de la prueba de compresión de anillos en caliente” realizada por el Ing. Alan Mario González Villarreal con matrícula 1374417 sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis

Asesor

Dr. Luis Leduc Lezama

Coasesor

Dr. Nelson Garza

Revisor

Dr. Julio Morales

Director de División de Posgrado FIME

Dr. Moisés Hinojosa

Agradecimientos

A mis padres y hermanos por toda su comprensión y apoyo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al CONACYT por su apoyo.

A mi asesor Dr. Luis Leduc por su paciencia, tiempo y enseñanzas.

A mi coasesor Dr. Nelson Garza por sus recomendaciones.

A todos aquellos que con mucha disposición me ayudaron en la elaboración de este proyecto, Dr. Rafael Mercado, Dra. Martha Guerrero, Dr. Óscar Zapata, Ing. Ovidio Molina, Dr. Arturo Juárez, Dr. Marco Hernández y Dr. Julio Morales.

A mis maestros que compartieron sus conocimientos.

A mis compañeros colegas que compartimos todo tipo de momentos durante estos dos años.

A mis amigos.

Índice

Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Importancia del estudio del acero	1
1.3 Importancia del estudio de la fricción	2
1.4 Introducción al ensayo de compresión de anillos.....	2
1.5 Estructura de tesis.....	4
Capítulo 2 - Fricción	6
2.1 Introducción	6
2.2 Definición	6
2.3 Leyes de la Fricción	7
2.4 Coeficiente de Fricción	8
2.4.1 Coeficiente de Fricción Coulómbica	10
2.4.2 Factor de Fricción μ	11
2.4.3 Relación entre Coeficiente y Factor de Fricción	11
2.5 Importancia de la fricción en los procesos de conformado.....	12
2.5.1 Fricción adherente.....	13
2.6 Métodos experimentales para medir fricción	14
2.6.1 Plano inclinado.....	14
2.6.2 Medidores tribológicos de coeficiente de fricción	15
2.6.3 Pin en disco	16
2.7 Prueba de compresión de anillo.....	17
Capítulo 3 - Prueba de Compresión de Anillos.....	18
3.1 Introducción	18
3.2 Antecedentes	18
3.3 Prueba de Compresión de Anillos	19
3.3.1 Radio neutro	21
3.3.2 Curvas de calibración	21
3.3.3 Obtención del coeficiente de fricción.....	23
3.4 Ensayo de compresión de anillos a alta temperatura.....	24
Capítulo 4 - Método de Elementos Finitos	25

4.1	Introducción	25
4.2	Historia.....	25
4.3	Procedimiento en el Método del Elemento Finito.....	26
4.4	Método de Aproximación Directa.....	28
4.5	Enfoque de Abaqus.....	29
Capítulo 5 - Metodología Experimental.....		31
5.1	Introducción	31
5.2	Maquinado de platos de compresión, porta-platos y anillos.....	31
5.3	Preparación de anillos	35
5.3.1	Recubrimiento con grafito	35
5.3.2	Recubrimiento con cobre	36
5.4	Caracterización superficial de los platos de compresión y anillos.....	38
5.4.1	Composición química.....	38
5.4.2	Propiedades mecánicas y térmicas.....	39
5.4.3	Caracterización de Superficies.....	39
5.5	Medición de coeficientes de transferencia térmica	44
5.5.1	Enfriamiento de anillos al aire.....	44
5.5.2	Enfriamiento de anillos en contacto con herramientas de compresión.....	47
5.6	Ensayos de compresión con platos de acero HSS y de hierro alto cromo	48
5.7	Medición de la resistencia del material durante el ensayo de compresión	49
Capítulo 6 - Simulación		50
6.1	Introducción	50
6.2	Modelo de compresión de anillo	51
6.2.1	Preparación	51
6.2.2	Creación de las partes.....	51
6.2.3	Creación de los materiales.....	53
6.2.4	Creación y asignación de sección	54
6.2.5	Crear el ensamble	54
6.2.6	Crear los pasos.....	55
6.2.7	Datos de salida deseados.....	55
6.2.8	Interacciones	55
6.2.9	Cargas	56

6.2.10	Mallado.....	56
6.2.11	Trabajo	59
6.2.12	Visualización.....	59
6.3	Validación del modelo de compresión desarrollado vs resultados publicados.....	60
6.3.1	Obtención de datos	60
6.3.2	Obtención de Porcentajes de Deformación.....	61
6.3.3	Gráfica.....	62
6.3.4	Obtención de más curvas.....	63
6.3.5	Validación	63
6.4	Modelo de transferencia de calor.....	64
6.4.1	Propiedades térmicas	64
6.4.2	Propiedades plásticas del acero al carbono.....	65
6.4.3	Nuevas condiciones iniciales.....	67
6.4.4	Nuevos pasos.....	67
6.4.5	Nuevas propiedades	69
6.4.6	Mallado.....	69
6.5	Modelo acoplado de transferencia de calor y deformación	69
6.5.1	Mallado.....	69
Capítulo 7 - Resultados		70
7.1	Introducción	70
7.2	Resultados experimentales.....	70
7.2.1	Microscopio estereoscópico.....	70
7.3	Medición de coeficientes de transferencia térmica	73
7.3.2	Enfriamiento de anillo en contacto con herramienta fría	75
7.4	Ensayos de compresión	75
7.4.1	Ensayos de anillos a 1050°C.....	77
7.4.2	Ensayos a 800°C.....	79
7.5	Fuerzas medidas durante la compresión de anillos.....	82
7.6	Simulación del modelo físico mediante el método de elementos finitos.....	83
7.6.1	Coeficiente de enfriamiento al aire	83
7.6.2	Coeficiente de transferencia térmica a herramientas	84
Capítulo 8 - Discusión.....		86

8.1	Introducción	86
8.2	Simulación de coeficiente de transferencia térmica.....	86
8.2.1	Simulación de coeficiente de convección	86
8.2.2	Simulación coeficiente de transferencia térmica entre anillo y herramienta .	88
8.3	Obtención de las curvas de calibración	89
8.4	Obtención de coeficiente de fricción.....	91
8.4.1	Coeficiente de fricción del sistema Anillo-Acero de Alta Velocidad.....	92
8.4.2	Coeficiente de fricción del sistema Anillo-Hierro Blanco Alto en Cromo	93
8.4.3	Discusión sobre resultados del coeficiente de fricción	94
8.5	Sensibilidad del ensayo de compresión de anillos en caliente	95
8.5.1	Variación de tiempo de enfriamiento en aire.....	95
8.5.2	Variación de tiempo de conducción de transferencia térmica.....	97
8.5.3	Variación de tiempo de compresión	98
8.5.4	Variación de la temperatura inicial del anillo.....	99
8.5.5	Variación de la temperatura inicial de la herramienta.....	101
8.5.6	Variación de coeficiente de convección.....	102
8.5.7	Variación del coeficiente de transferencia de calor entre herramienta-anillo	103
8.5.8	Variación de la conductividad térmica.....	104
8.6	Influencia de variables en el ensayo de compresión de anillos en caliente.....	104
Capítulo 9 - Conclusiones y Recomendaciones.....		106
9.1	Introducción	106
9.2	Conclusiones.....	106
9.3	Recomendaciones en áreas de oportunidad	107
9.3.1	Homogeneidad en platos de compresión	107
9.3.2	Mejorar compresión de anillos.....	107
9.3.3	Optimización de simulación	108
9.4	Trabajo futuro	108
Bibliografía.....		109
Anexo I		111
Anexo II		124
Anexo III.....		125

Anexo IV.....	129
Anexo V.....	130
Anexo VI.....	132
Anexo VII	134
Anexo VIII	143

Resumen

La producción del acero es un negocio que influye en gran manera en la vida cotidiana de la humanidad. Las grandes construcciones, las máquinas, los automóviles y hasta los aparatos electrodomésticos son fabricados con partes de acero. La gran competencia en este negocio ha forzado a los fabricantes de acero a mejorar la calidad del mismo bajando los costos de producción.

La fricción toma un rol especial en la fabricación de acero, ya que puede causar problemas en la calidad de la superficie y puede disparar los costos de producción. Antes de poder controlar o buscar un coeficiente de fricción adecuado al proceso de producción de acero es necesario saber cómo medir el mismo.

La prueba de compresión de anillos ha probado ser un buen método en la medición del coeficiente de fricción. Sin embargo, este método no ha sido muy estudiado cuando el material a comprimir se encuentra a altas temperaturas. En el presente trabajo se realizaron estudios físicos y simulaciones computacionales del ensayo de compresión de anillos en caliente.

Se realizaron 60 compresiones de anillos con diferentes recubrimientos para prevenir la oxidación, a distintas temperaturas y con distintos materiales de compresión para medir el coeficiente de fricción.

Los resultados muestran que deben realizarse curvas de calibración adecuadas a cada par de materiales y a cada temperatura de trabajo, sobre todo cuando el material a comprimir tiene una baja conductividad térmica.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

En el presente trabajo se estudia el ensayo de compresión de anillos en caliente para determinar el coeficiente de fricción entre el material y la herramienta. Dicho ensayo recrea el fenómeno de la fricción durante la laminación en caliente.

La importancia y justificación de este trabajo se describe en este capítulo, dando algunos datos importantes sobre la producción de acero a nivel mundial y en México. Una pequeña introducción al tema del ensayo de compresión de anillos se encuentra aquí. Por último, la estructura de la tesis también se describe en este apartado.

1.2 Importancia del estudio del acero

La industria del acero a nivel mundial sigue siendo de las más importantes a nivel mundial. A pesar de que en los últimos años algunos materiales como el aluminio o el titanio han tomado cierto auge, la verdad es que aún se encuentran muy lejos de pisarle los talones a la producción de acero. En el año 2007 la producción mundial de acero fue de 1,351.3 millones de toneladas (1), mientras que para el 2011 fue de 1,490.1 millones de toneladas. Por otra parte, la producción de aluminio en el mundo en el 2010 es de apenas 41,400 miles de toneladas, cerca del 3% de la producción de acero.

Los mayores productores de acero son China, Japón y los Estados Unidos con una producción en el 2011 de 683.3, 107.6 y 86.2 millones de toneladas, respectivamente. México se encuentra en el lugar 13 como productor mundial de acero con una producción de 18.1 millones de toneladas en el año 2011.

Debido a la magnitud de esta industria a nivel mundial, y en México también, es muy importante desarrollar nuevas ideas y tecnología para la producción del mismo.

1.3 Importancia del estudio de la fricción

A pesar de que la industria acerera en el mundo es de las más importantes, todavía no se encuentra exenta de problemas, quedando mucho trabajo para los ingenieros y científicos.

El impacto de la fricción en la laminación, por ejemplo, sigue siendo un misterio para los metalurgistas. Por experiencia se sabe que la fricción en el proceso de laminación es necesaria para llevar a cabo el mismo proceso, pero una fricción excesiva terminará por desgastar los rodillos más rápidamente. También, una fricción excesiva puede ocasionar problemas en la superficie de la lámina, trayendo problemas en la calidad del producto.

Esos dos ejemplos de los problemas que trae la alta fricción repercuten directamente en el tema económico industrial, por lo que el estudio de la fricción en la industria acerera tiene su justificante en dicho tema.

1.4 Introducción al ensayo de compresión de anillos

La fricción es la fuerza que se resiste al movimiento relativo de superficies sólidas o fluidos. La orientación de la fuerza de fricción es, por lo tanto, en sentido contrario a la del desplazamiento del cuerpo.

La ciencia que estudia la fricción entre sólidos es la tribología. Está de más decir que la ciencia de la tribología es de las más complicadas. Esto es por el hecho que la fuerza de fricción no es una interacción fundamental, sino que forma parte de la fuerza fundamental electromagnética de cada partícula cargada de las superficies en contacto.

Es común que muchas personas cataloguen a la fuerza de fricción como algo negativo o algo a evitarse. Esto es en cierta forma cierto porque este fenómeno

puede, por ejemplo, desgastar las piezas de un motor, calentar o fundir las superficies en contacto o disminuir la eficiencia de una máquina. Sin embargo, también es cierto que sin fricción la vida sería inconcebible, no podríamos caminar o crear fuego. Está en la responsabilidad de los ingenieros en aprovechar al máximo los beneficios de la fricción y al mismo tiempo reducir los efectos negativos. Y antes de poder tratar de hacer esta difícil tarea, es necesario conocer la fricción que existe entre los materiales bajo ciertas circunstancias.

La fricción no puede ser calculada por métodos matemáticos y teóricos sino que sólo puede ser medida empíricamente por medio de la experimentación. Evidentemente los grandes científicos de los siglos anteriores comenzaron a interesarse en el tema del rozamiento de materiales.

El estudio de la fricción comenzó desde el siglo XIV cuando Leonardo da Vinci midió, por medio de cuerdas y poleas, el coeficiente de fricción entre diferentes materiales, sin embargo, no publicó sus notas. Fue más de 300 años después que Charles-Augustin de Coulomb inventó el coeficiente de fricción μ .

Ya en el siglo XX con la industrialización y el crecimiento de la industria acerera los ingenieros y científicos se dieron cuenta que la fricción tiene un rol bastante importante en la fabricación del acero. La laminación, la cual tiene lugar de alguna forma en este trabajo, puede llevarse a cabo porque existe la fuerza de rozamiento.

En la laminación se pasa un planchón de material por entre 2 o más rodillos para comprimirlo y darle una forma más delgada, así como para obtener una microestructura deseada. Una “fricción adecuada” o un coeficiente de fricción correcto entre el planchón y cada rodillo ayudará a obtener el resultado esperado utilizando la menor energía en la máquina y con el menor desgaste.

Si le sumamos que en la laminación también entran otras variables como la temperatura, la velocidad de deformación, la lubricación y el porcentaje de deformación, entonces tenemos el problema de saber qué tanto influyen estos factores en la fricción.

En la década de 1960 Avitzur desarrolla un método para medir el coeficiente de fricción en la laminación; este método es conocido como el ensayo de compresión de anillos. En esta prueba se comprimen anillos de una geometría específica y se miden los porcentajes de reducción de la altura y del diámetro interno que al graficarse pueden ser comparados en una curva de comparación llamada “curva de calibración” y así se puede dar un valor al coeficiente de fricción de los materiales en cuestión.

Estas curvas de calibración se calcularon en aquellos años por medio de métodos matemáticos muy complejos. Actualmente podemos usar el método del elemento finito para que una computadora pueda hacer todos esos cálculos por nosotros y tener resultados más rápidos. Se usó el paquete ABAQUS para simular el experimento de la compresión de anillos. Otra ventaja de este paquete computacional es que se pueden meter las variables de la temperatura y la velocidad de deformación. Obviamente para que los resultados sean correctos se debe alimentar al paquete con datos confiables.

¿Qué tanto afecta la temperatura al proceso de laminación con respecto a la fricción? ¿Se pueden usar las mismas curvas de calibración para los mismos materiales? ¿Y a diferentes temperaturas? Son las preguntas que resolveremos en el presente trabajo.

1.5 Estructura de tesis

- Capítulo 2 Fricción: Se describe brevemente el fenómeno de fricción y se definen las tres leyes de la fricción. También se muestran las maneras en las que se puede caracterizar la fricción (μ y m), así como los métodos experimentales para medirla.
- Capítulo 3 Prueba de Compresión de Anillos: En este capítulo se describe ampliamente el ensayo de compresión de anillos desde su invención en 1956 hasta las mejoras actuales usando el método de elementos finitos. Se explica qué es una curva de calibración, cómo se construye y cómo se usan para obtener el coeficiente de fricción de un sistema.

- Capítulo 4 Método de Elementos Finitos: Aquí se presenta el método de elementos finitos y sus procedimientos. El método de aproximación directa es descrito, así como el enfoque que usa el paquete Abaqus.
- Capítulo 5 Metodología Experimental: Este apartado describe todo el proceso de los experimentos que se realizaron. Desde el maquinado de los platos de compresión y los anillos, hasta el ensayo de compresión de anillos, pasando por los recubrimientos para proteger contra la oxidación y la obtención de los coeficientes térmicos.
- Capítulo 6 Simulación: Se detalla paso a paso cómo se realiza la simulación de la prueba de compresión de anillos en el paquete Abaqus. También se agregaron algunas imágenes que ayudan a seguir el procedimiento.
- Capítulo 7 Resultados: Los resultados obtenidos son presentados en este capítulo. Se presentan las mediciones de las deformaciones de los anillos a distintas condiciones del ensayo, también se muestran las mediciones de las temperaturas en los ensayos de enfriamiento.
- Capítulo 8 Discusión: Los resultados obtenidos se discuten en este apartado. Se hace un estudio de sensibilidad del ensayo de compresión de anillos en caliente y se discuten los resultados. También se obtienen las curvas de calibración para el sistema estudiado.
- Capítulo 9 Conclusiones y Recomendaciones: Por último, se concluyen algunos temas en esta parte del trabajo. Se discuten algunas áreas de oportunidad y se dan recomendaciones. También se sugiere trabajo a futuro.

Capítulo 2

Fricción

2.1 Introducción

La fricción es algunas veces conocida como el “mal” de todo movimiento o moción. Si un cuerpo se mueve hacia la derecha, la fricción lo jalará a la izquierda, si se quiere desplazarse hacia arriba, la fricción deseará hacerlo para abajo. Es decir, la fricción siempre se opondrá al movimiento o desplazamiento de un cuerpo.

En el presente capítulo se describe el fenómeno de la fricción, desde su definición, las leyes que la rigen y cómo puede caracterizarse la misma. Además se presentan algunos métodos tradicionales para medir el coeficiente de fricción.

2.2 Definición

La definición más aceptada para la palabra fricción es la que la define como la fuerza resistiva al movimiento relativo de superficies sólidas (y su posible capa de fluido en medio) cuando se frotan entre sí.

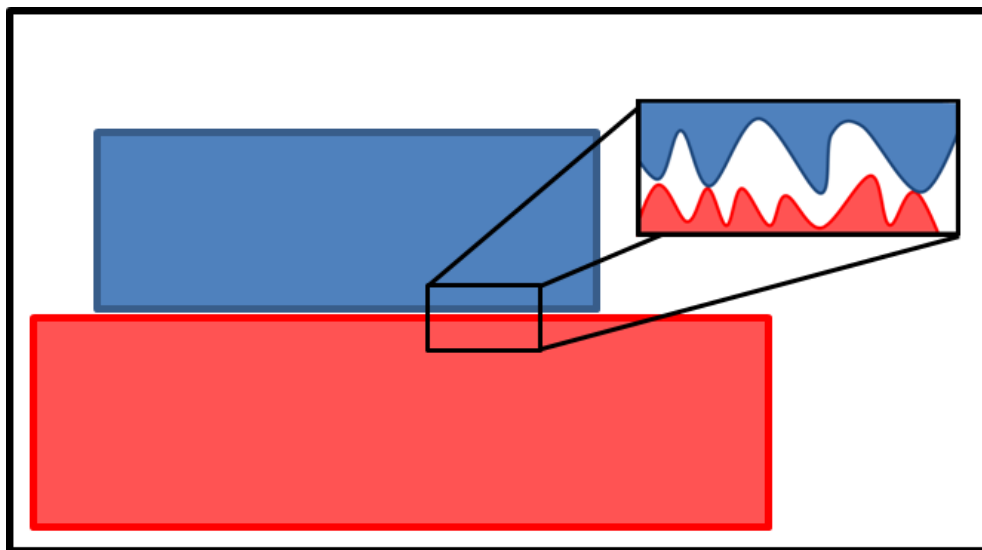


Figura 2.1 - Comparación de superficies macro y microscópicas

Esta fuerza de frotamiento aparece siempre que haya dos cuerpos en contacto sin importar qué tan lisas parezcan a simple vista las superficies de los mismos. Esto es debido a que al ver las superficies en un microscopio se puede observar que cualquiera de ellas estará bastante lejos de ser lisa. Entonces, al frotar dos superficies que en realidad no son lisas podemos esperar que se “ganchen” o “anclen”, impidiendo el movimiento (2).

Sin embargo, el fenómeno de la fricción no es del todo negativo, ya muchas actividades de la vida diaria se pueden realizar gracias a ella. Simples actividades como caminar, sentarse en un sillón y hasta comer sería imposible sin esta fuerza resistiva. Un ingeniero debe tratar de sacar el mejor provecho de la fricción y no verla como un enemigo.

Un efecto de la fuerza de frotamiento es que transforma la fuerza cinética en calor. Esto, por ejemplo, fue bien aprovechado por el ser humano primitivo desde hace miles de años para producir fuego al frotar palillos de madera. También existen casos catastróficos de generación de calor indeseado por la fricción, como la desintegración de naves espaciales al ingresar a la atmósfera terrestre o la fundición de metales en el motor de un automóvil cuando el sistema de enfriamiento por aceite es pobre.

Otro efecto de la fricción es el desgaste, el cual se define como la erosión de un material sólido provocada por otra superficie. En este trabajo no se abordará este tema.

2.3 Leyes de la Fricción

La naturaleza de la fuerza de fricción fue fundamentada bajo 3 leyes empíricas (3) descubiertas por varios científicos renombrados. Estas son:

1. **Primera Ley de Amontons:** *La fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal.*

Esta ley dice que al tener un objeto de mayor masa, y por tanto mayor peso (con gravedad constante), la fuerza de fricción será mayor. Esto es debido a que un mayor número de átomos en las superficies estarán en contacto.

2. **Segunda Ley de Amontons:** *La fuerza de fricción es independiente de la aparente área de contacto.*

La ley establece que dos masas similares pero con diferentes áreas de contacto tendrán el mismo coeficiente de fricción. Entonces, para mover dos objetos del mismo material y misma masa, pero con diferentes áreas de contacto, se necesitará la misma fuerza aplicada.

3. **Ley de Fricción de Coulomb:** *La fricción cinética es independiente de la velocidad del deslizamiento.*

Coulomb estableció que no importa la velocidad a la que se deslice un cuerpo en una superficie, el coeficiente de fricción permanecerá constante aunque varíe la rapidez.

Estas leyes, también conocidas como el Modelo de Fricción de Coulomb, son muy útiles en el mundo ingenieril, pero como todas aproximaciones empíricas, tienen sus limitantes.

Los materiales que tienen su dureza en los extremos, el diamante como el más duro y el teflón dentro de los más suaves, no se evalúan de una manera proporcional, sino de forma exponencial. También la segunda ley tiene problemas al tratar de regir las superficies muy lisas y limpias. En estos casos las interacciones de los átomos entre las superficies serán mayores y la fuerza de fricción será mucho mayor. También está el caso de la cinta adhesiva que se resiste al deslizamiento aún cuando no haya fuerza normal. En ese caso, el área aparente de contacto influye mucho en la fuerza de fricción.

2.4 Coeficiente de Fricción

El tema de la fricción y las superficies es complicado. Alguna vez el premio Nobel de Física Wolfgang Pauli dijo “Dios creó los sólidos; la superficie fue inventada por el diablo”. Esto lo adjudicó a que los átomos dentro de un sólido

interacciona con otros átomos similares, mientras que los átomos en la superficie podrán interactuar con los átomos del “mundo exterior”.

Actualmente se sabe que el fenómeno de la fricción no es una interacción fundamental sino que ocurre debido a las fuerzas electromagnéticas entre las partículas cargadas que forman parte de las superficies en contacto. Estas interacciones son por demás complejas, por lo que la fricción se mide empíricamente.

La manera más sencilla de comparar las fuerzas de rozamiento entre dos superficies es mediante el coeficiente de fricción usualmente representado por la letra griega μ . Esta medición va desde 0 hasta el 1, siendo el cero un caso hipotético donde no existiese la fuerza de fricción y la unidad sería la fricción “adhesiva”. Este coeficiente de fricción depende de los materiales usados, por ejemplo, hielo con hielo tiene un coeficiente de fricción bajo, mientras que goma con goma experimentará un elevado coeficiente.

Cuando los dos cuerpos en contacto están en reposo relativo se mide un coeficiente de fricción estático μ_s , mientras que cuando las superficies están en movimiento relativo se obtiene el coeficiente de fricción cinético μ_k . El ejemplo típico de la fricción estática es cuando ella previene que un objeto se deslice hacia abajo cuando se encuentra en un plano inclinado, mientras que la fricción cinética es la que detiene el movimiento del cuerpo cuando ya se está deslizando. Normalmente el coeficiente estático es mayor que el cinético.

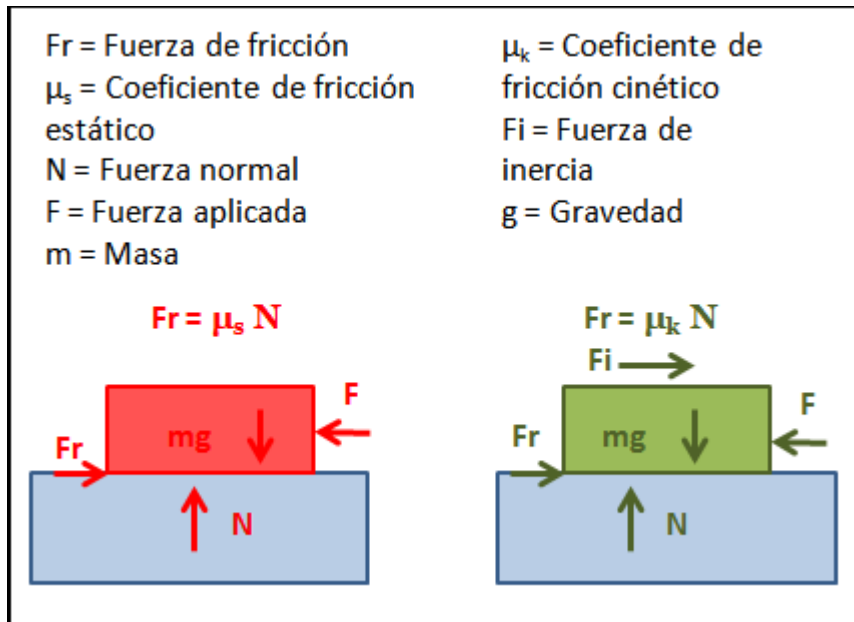


Figura 2.2 – Diagrama de fuerzas

La fricción que se genera entre dos cuerpos no es una propiedad de los materiales en contacto sino es una “propiedad del sistema”, ya que muchos factores influyen, como la temperatura, la rugosidad, la velocidad, la atmósfera, etc. Esto quiere decir que un mismo par de materiales en contacto puede tener un coeficiente de fricción distinto al aumentar la temperatura del sistema o al cambiar la rugosidad de las superficies.

2.4.1 Coeficiente de Fricción Coulómbica

El coeficiente de fricción μ fue propuesto por los primeros científicos que estudiaron la fricción (Amontons, Coulomb y Morin). Ellos sospechaban que la fricción se debía al “anclaje” de las asperezas de las superficies de los materiales en contacto. De esta manera pudieron explicar las leyes que ellos mismos formularon empíricamente.

Suponiendo que la fricción obedece la Ley de Coulomb, se tiene la siguiente expresión:

$$\tau = \mu P$$

Donde τ es el esfuerzo tangencial en cualquier punto de la superficie y es proporcional a la presión P entre los dos cuerpos y tiene una dirección opuesta a la del desplazamiento relativo de éstos. El coeficiente de fricción μ es considerado constante para dos superficies (en ciertas condiciones y con temperatura constante) y es independiente de la velocidad.

2.4.2 Factor de Fricción m

No siempre el factor μ es usado. Cuando es necesario medir la fricción en la interfase entre dos superficies resulta más conveniente usar el factor cortante de fricción interfasial m .

Este factor es desarrollado mediante análisis de esfuerzos usando el criterio de cedencia de von Mises con el cual se mide el esfuerzo cortante máximo que un material puede resistir. Dicho esfuerzo cortante máximo es:

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

Esto es cierto cuando la fricción es adhesiva, o que el factor de fricción es 1. El factor m se introduce en esa ecuación para obtener medidas de fricción intermedias entre la fricción adhesiva y la ausencia de fricción. Por lo tanto agregando m como un factor se tiene:

$$\tau = m \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

Siendo m un valor entre 0 y 1.

2.4.3 Relación entre Coeficiente y Factor de Fricción

Ninguno de los 2 métodos para medir la fricción es aceptado universalmente, pero en casos generales dan muy buenas aproximaciones del comportamiento de la fricción. En distintos casos uno de ellos puede describir mejor el fenómeno que el otro y viceversa.

Es importante, entonces, tener una manera de comparar el coeficiente con el factor de fricción. La ecuación que relaciona estos valores es:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

2.5 Importancia de la fricción en los procesos de conformado

La función obvia de los procesos de formado de metales es dar al material una forma requerida. Sin embargo, en algunos procesos es todavía más importante dar al material una microestructura deseada para que se tengan ciertas propiedades. En la industria de la laminación, el coeficiente de fricción toma un rol importante, ya que incide directamente en el tema económico, ya que una alta fricción desgasta las herramientas, puede afectar la calidad de la superficie del producto final y hace que los motores usen más potencia.

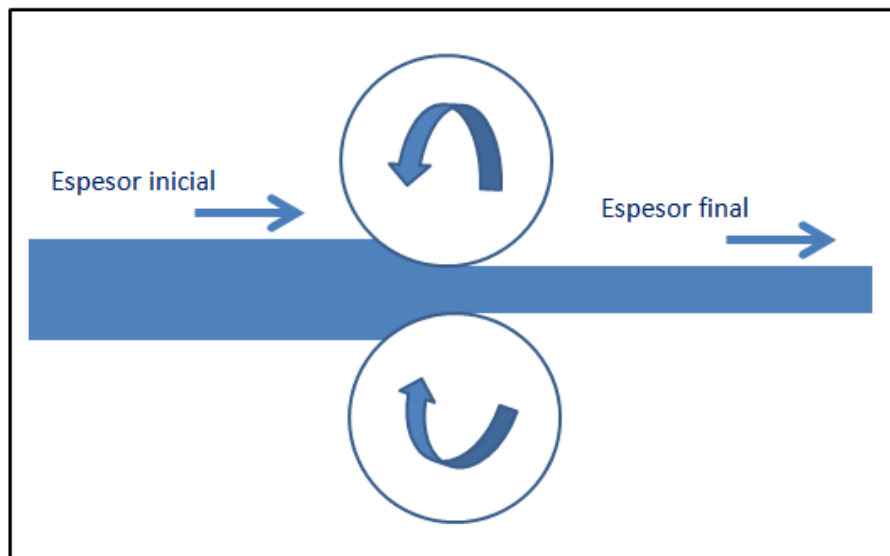


Figura 2.3 - Proceso de laminación

La fricción que se presenta en el formado de metales es distinta a la que se encuentra en los sistemas mecánicos “tradicionales”, como trenes de engranes, rodillos y rodamientos y otros componentes donde exista un movimiento relativo de superficies. En estos casos existen generalmente bajas presiones de contactos, temperaturas bajas o moderadas y una buena lubricación para evitar el

contacto directo de metales. Por el otro lado, en el conformado de metales se tienen presiones altas entre la superficie de la herramienta y la pieza de trabajo, se tiene deformación plástica y, a veces, altas temperaturas. Con estas condiciones de trabajo se llegan a alcanzar coeficientes de fricción relativamente altos, incluso con la ayuda de lubricantes.

En el formado de metales la fuerza de fricción aparece debido a la pequeña área de contacto entre la superficie de la herramienta y la pieza de trabajo, y a las altas presiones que soportan dichas superficies. En la mayoría de los procesos de conformado, la fricción es un problema por las siguientes razones:

- a) Ralentiza el flujo del metal durante el trabajo, llevando a esfuerzos residuales o defectos.
- b) Se necesita mayores fuerzas y, por consiguiente, mayor potencia en los motores de trabajo. Esto incide directamente en el recibo de energía eléctrica.
- c) Las herramientas se desgastan, lo cual lleva a defectos superficiales. Además se necesita reemplazar las herramientas desgastadas, las cuales son costosas.

Sin embargo, también es sabido que sin la fricción el mismo proceso de conformado sería inconcebible. Entonces, se puede decir que gracias a la fricción se pueden realizar los trabajos a los metales pero una muy alta fricción no es deseable. Es deber del ingeniero encontrar una fricción “ideal” donde el proceso de conformado no se vea tan castigado por la misma.

2.5.1 Fricción adherente

La fricción es mucho más grande en los procesos en caliente, por lo que el desgaste de las herramientas y la potencia usada es mayor. En algunos casos, cuando el coeficiente de fricción es suficientemente grande puede ocurrir el fenómeno de adherencia. La adherencia en el formado de metales es cuando dos superficies en movimiento relativo tienden a adherirse en vez de deslizarse. Esto ocurre cuando el esfuerzo de fricción entre dichas superficies es mayor al esfuerzo

de flujo cortante de la pieza de trabajo, haciendo que la pieza se deforme por corte en lugar de que se deslice. En el laminado en caliente, es un fenómeno recurrente.

2.6 Métodos experimentales para medir fricción

Antes de poder estudiar cómo la fricción afecta o ayuda en un sistema de trabajo es importante poder medirla. La fricción no es una propiedad de los materiales en contacto sino una “propiedad del sistema”. Las variables del sistema que afectarán a la medición del coeficiente de fricción son los materiales en contacto, la temperatura, la velocidad, la rugosidad. Esto quiere decir que un mismo par de materiales podrá tener un coeficiente de fricción distinto si se realiza el trabajo a diferente temperatura o si se tienen rugosidades diferentes.

Existen varios métodos para medir el coeficiente de fricción μ , entre ellos el rústico del plano inclinado, aparatos especiales que miden los coeficientes de fricción estático y dinámico y también otras máquinas tribológicas que miden desgaste pero también ayudan a medir la fricción como el *pin on disk*.

2.6.1 Plano inclinado

El experimento del plano inclinado es el más sencillo de realizar. En éste, un bloque se localiza en un plano inclinado a un cierto ángulo con respecto al suelo o superficie inferior. Dependiendo del coeficiente de fricción y del ángulo de inclinación, el bloque se deslizará o no.

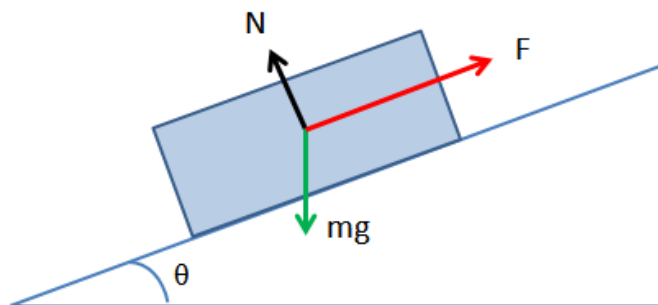


Figura 2.4 - Plano inclinado

De acuerdo a la figura, tenemos la fuerza normal N , el peso mg , y la fuerza de fricción que se opone al movimiento. Girando el sistema de coordenadas un ángulo θ , podemos separar la fuerza mg en $mg\text{Sen}\theta$ y $mg\text{Cos}\theta$.

Cuando se está en equilibrio se tiene:

$$N = mg \text{Cos } \theta$$

Y cuando el bloque se mueve a velocidad constante:

$$F = mg \text{Sen } \theta$$

Entonces:

$$F = \mu k N$$

También se puede obtener el ángulo crítico en el cual el movimiento del bloque es uniforme:

$$\mu k = \tan \theta$$

Para medir el coeficiente de fricción estático con este experimento se mide el ángulo en el cual el bloque comienza a deslizarse y se calcula su tangente.

2.6.2 Medidores tribológicos de coeficiente de fricción

Estos medidores utilizan la misma teoría que Leonardo da Vinci (4) ideó para sus experimentos tribológicos. Da Vinci usaba un mecanismo de masa - polea donde, por contrapeso, medía el peso necesario (o fuerza) para comenzar a desplazar un bloque en cierta superficie. Los medidores de hoy usan un sistema de masa – resorte, se jala el bloque y mientras éste no se deslice debido a la fricción, el resorte se estirará. Cuando la fuerza supera a la fuerza de fricción, el bloque se desliza y el resorte regresa a su forma original.

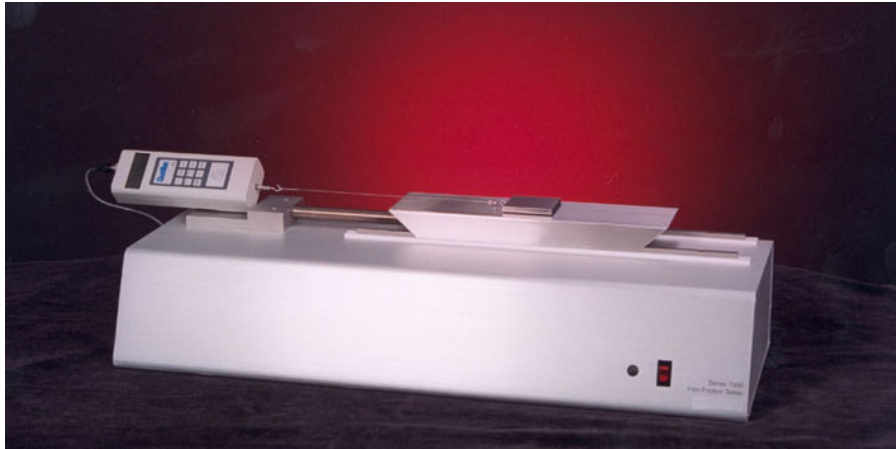


Figura 2.5 – Medidor de fricción Qualitest - 7000 Series

Con la tecnología actual se logran medir los coeficientes de fricción con suma precisión. Estos medidores tienen que cumplir la norma *ASTM D1894 – 11e1*, la cual habla sobre los estándares para medir el coeficiente de fricción.

2.6.3 Pin en disco

Esta prueba es usada principalmente para medir la velocidad de desgaste de las superficies por lo que también está fuertemente relacionada con la fuerza de fricción.

Esta prueba consiste en dos probetas de diferentes materiales, la primera es de un tamaño pequeño en forma de *pin*, mientras que la otra es mucho más grande y normalmente en forma de disco. La máquina hace girar entre sí a las dos probetas con una fuerza o peso específico durante algún tiempo. Al paso del tiempo los materiales se desgastan y se puede medir la masa y el volumen perdido en las superficies.

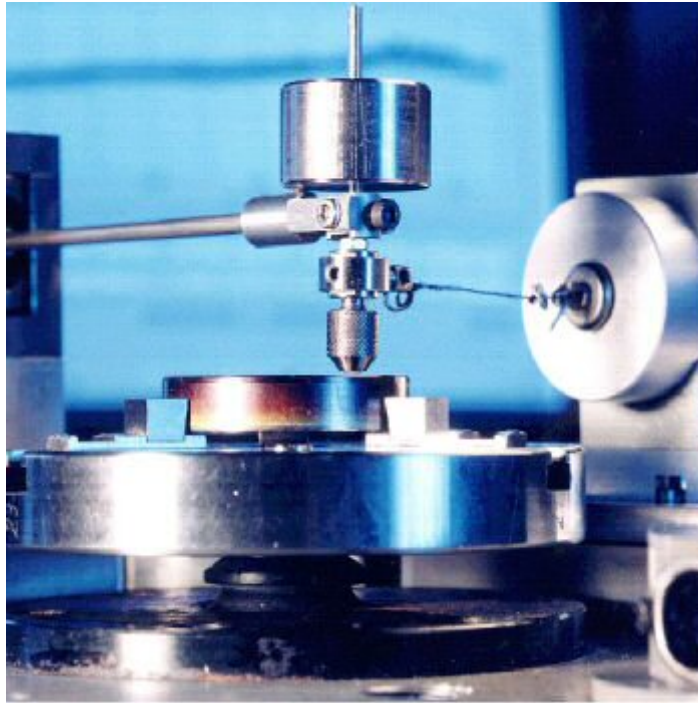


Figura 2.6 - Pin en disco

2.7 Prueba de compresión de anillo

De estas pruebas mencionadas ninguna se puede usar para medir la fricción interfacial de dos superficies cuando existe una deformación plástica importante. Para estos casos, como en la laminación, existe la prueba de compresión de anillos donde sí se toma en cuenta la deformación. El siguiente capítulo habla sobre dicha prueba.

Capítulo 3

Prueba de Compresión de Anillos

3.1 Introducción

Como se mencionó en el capítulo anterior, es de gran importancia controlar la fricción interfacial que existe entre la pieza de trabajo y la herramienta para mejorar la calidad del producto final y para ahorrar energía y dinero. Para poder encontrar un coeficiente de fricción óptimo para el conformado es primordial, entonces, conocer primero la fricción que se tiene entre las superficies de la herramienta y la pieza de trabajo.

En el pasado capítulo se mencionó que los métodos tradicionales para medir el coeficiente de fricción no funcionan para los procesos de conformado debido a las grandes deformaciones plásticas que se alcanzan en éstos. La manera en que se puede medir el coeficiente de fricción en las superficies herramienta-pieza de trabajo es por medio de métodos experimentales como la compresión de anillos o cilindros, siendo más utilizados los anillos.

3.2 Antecedentes

La prueba de compresión de anillos fue propuesta por Kunogi (5) desde 1956, y después fue mejorada por Male y Cockcroft (6) en 1964-65. Después Avitzur (7) sentó las bases para todo el trabajo subsecuente. Lee (8) caracterizó la fricción interfacial comprimiendo anillos simétricos con un coeficiente de fricción constante.

Hasan Sofuoglu (9) desarrolló una técnica llamada “*open die backward extrusion test technique (ODBET)*” como un método alternativo a la compresión de anillos para medir el coeficiente de fricción en la pieza de trabajo así como en la herramienta. Robinson (10) estudió la prueba de compresión de anillos usando simulación de elementos finitos. Bhattacharyya (11) comprimió anillos de cobre y

aluminio para calcular la fricción interfacial. Li (12) reportó que la fricción se debe, sobre todo, debido a la rugosidad en la pieza y en la herramienta y a las altas presiones, además confirmó que la lubricación reduce la fricción. El efecto de la rugosidad y la textura de la superficie en la fricción fue estudiado por Pradeep (13).

Avitzur (7) y Hawkyard y Johnson (14) analizaron teóricamente el anillo asumiendo distorsión uniforme, sin “barrilamiento”, ni endurecimiento por deformación y, lo más importante, una interface con fricción constante m . Male (15) demostró que se pueden obtener variaciones en el coeficiente de fricción si se incrementa la velocidad de deformación.

En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica también se ha estudiado la prueba de compresión de anillos. Domínguez (16) estudió los cambios en el coeficiente de fricción cuando se aplican distintos lubricantes por medio de la prueba mencionada. Rodríguez (17) usó el método de elementos finitos en 3 dimensiones para construir las curvas de calibración de un acero.

3.3 Prueba de Compresión de Anillos

Como se dijo, el ensayo de compresión de anillos es bastante antiguo, data de 1956, y partir de entonces se ha venido actualizando y mejorando la técnica, aunque sus bases permanecen casi intactas. Al día de hoy se sigue usando esta técnica para conocer la fricción interfacial entre la pieza y la herramienta en los procesos de laminado.

Este método para medir la fricción consiste en comprimir un material en forma de anillo y medir la reducción de su altura en porcentaje, así como su cambio en el diámetro interno, el cual puede reducirse o agrandarse dependiendo de la fricción interfacial. El anillo debe comprimirse en medio de dos platos o superficies paralelas planas. La proporción de las medidas del anillo que se usa habitualmente es 6:3:2 (diámetro exterior: diámetro interior: altura), aunque también se han hecho experimentos con proporción 6:3:1 (18) y 4:2:1 (19).

Si la fricción interfacial entre los dos materiales es poca, el material del anillo podrá fluir hacia afuera haciendo que el diámetro interior se haga más grande. En cambio, una fricción más grande no dejará al material fluir tan fácilmente, por lo que el diámetro interno se reducirá.

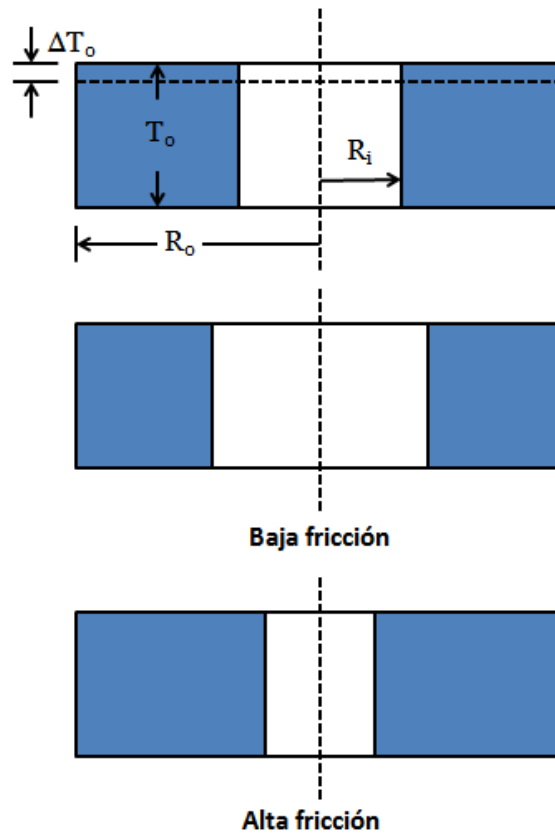


Figura 3.7 - Deformación de diámetro interno con baja y alta fricción

En una prueba real de compresión una parte del material fluirá hacia adentro y otra parte fluirá radialmente hacia afuera, pero también algunos puntos se quedarán sin moverse hacia ningún lugar. Los puntos que no llegarán a moverse se localizarán en el llamado *radio neutro* R_n . Entonces el material (o los puntos) que se encuentre más allá del radio neutro fluirá hacia afuera, mientras que el que se localice dentro de dicho radio se moverá hacia adentro. En el caso de la nula o muy baja fricción el radio neutro es menor que el radio interno R_i , por lo que todo el material se encontrará más allá del radio interno y fluirá hacia afuera.

3.3.1 Radio neutro

El radio neutro mencionado puede ser calculado por medio de las siguientes ecuaciones (18):

Si $R_n < R_i$ y $m \frac{R_o}{T} < \frac{1}{2}$, entonces:

$$R_n = \frac{3}{4} R_o \sqrt{\frac{\left(1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 x^2\right)}{\sqrt{x(x-1) \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 x\right]}}}$$

$$x = \left\{ \frac{R_o}{R_i} \exp \left[-m \frac{R_o}{T} \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right) \right] \right\}^2$$

Si no, se resuelve la siguiente ecuación para R_n por un método numérico:

$$2m \frac{R_o}{T} \left(1 + \frac{R_i}{R_o} - 2 \frac{R_n}{R_o}\right) + \ln \left| \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \frac{\left[\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_n}{R_o}\right)^4}\right]}{\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 + \left(\frac{R_n}{R_o}\right)^4}} \right| = 0$$

Siendo:

R_n = radio neutro

R_o = radio externo

R_i = radio interno

m = factor de fricción interfacial

T = altura del anillo

3.3.2 Curvas de calibración

Male y Cockroft bautizaron a las gráficas que relacionan el cambio en la altura con respecto al cambio en el diámetro interior como *curvas de calibración*. Una curva de calibración tiene el aspecto de la figura 3.2.

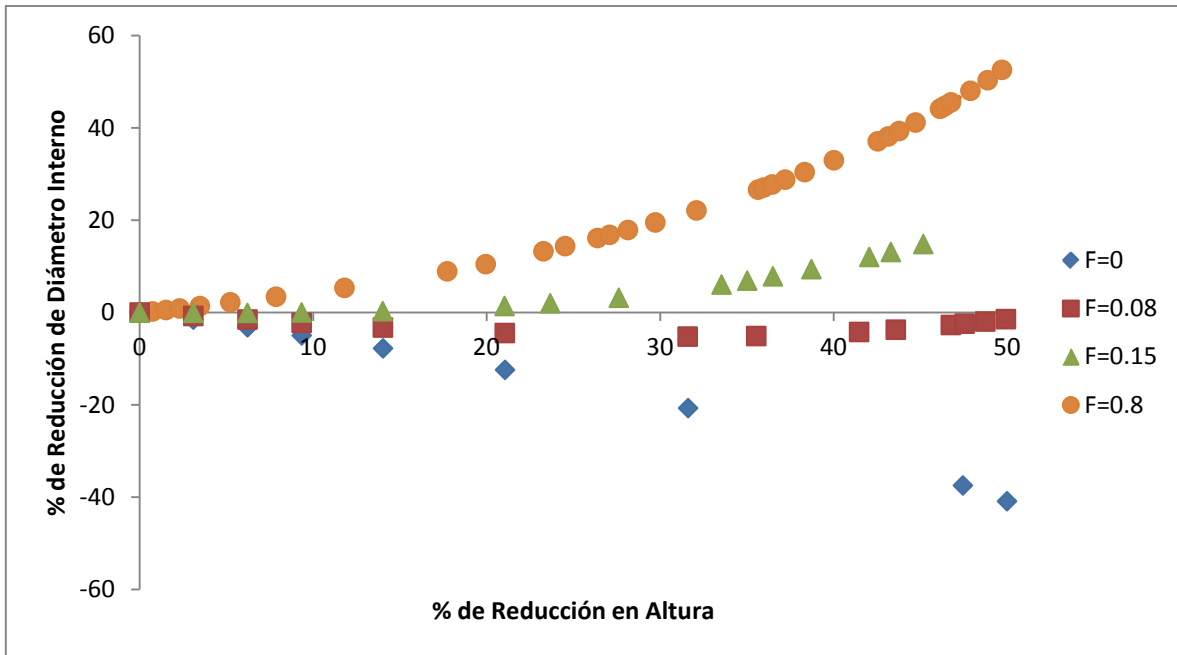


Figura 3.8 - Curva de calibración típica

Estas curvas se construyen matemáticamente y después se realizan experimentos físicos y se miden los coeficientes de fricción en la interface del material y la herramienta. Es decir, se obtienen primero las curvas de calibración, luego se comprime un anillo a un determinado porcentaje y se mide la reducción de su diámetro interno. El punto obtenido de la relación reducción de altura – reducción de diámetro interno se coloca en la curva de calibración y así se puede ver entre qué valores se encuentra el coeficiente de fricción. Para validar el coeficiente de fricción obtenido se puede experimentar con más muestras a diferentes porcentajes de altura y comprobar que los puntos obtenidos tengan un comportamiento similar a las curvas de calibración.

3.3.2.1 Curvas de calibración por medio matemáticos

Para construir las curvas de calibración para diferentes coeficientes de fricción (m o μ) se pueden usar ecuaciones y métodos numéricos. Uno de los primeros estudios para construir las curvas de calibración fue realizado por Chen y Ling (20). Ellos usan una aproximación de *límite superior* para obtener los datos de las curvas de calibración.

Después DePierre y Gurney (21) proveen un algoritmo para obtener las curvas de calibración y las gráficas de esfuerzo – deformación con más de 20 ecuaciones.

3.3.2.2 Curvas de calibración por el método de elementos finitos

Con la invención de los paquetes computacionales que emplean el método de elementos finitos muchos ingenieros comenzaron a buscar posibles aplicaciones y el ensayo de compresión de anillos fue uno de ellas. Muchos trabajos (9) (19) (22), incluido el presente, toman ventaja de las posibilidades que ofrece este método computacional.

Por medio de este método es posible simular el proceso de compresión de anillos a diferentes velocidades de deformación, temperaturas, factores de fricción, entre otras variables, para poder estimar las deformaciones del anillo, y así construir curvas de calibración.

3.3.3 Obtención del coeficiente de fricción

Las curvas de calibración sirven como referencia para calcular el coeficiente de fricción de un sistema de materiales ensayado. Se llevan a cabo varios ensayos de compresión de la muestra y se miden los porcentajes de deformación en la altura y el diámetro interno. Comparando los porcentajes de deformación medidos experimentalmente contra las curvas de calibración se puede estimar el coeficiente de fricción en el sistema.

La figura 3.3 muestra un ejemplo de los datos de un experimento y las curvas de calibración. En dicho ejemplo, se observa que los datos experimentales se localizan encima de la curva de $\mu = 0.1443$ y por debajo de la de $\mu = 0.2309$, por lo que se podría estimar un coeficiente de $\mu = 0.155$ aproximadamente.

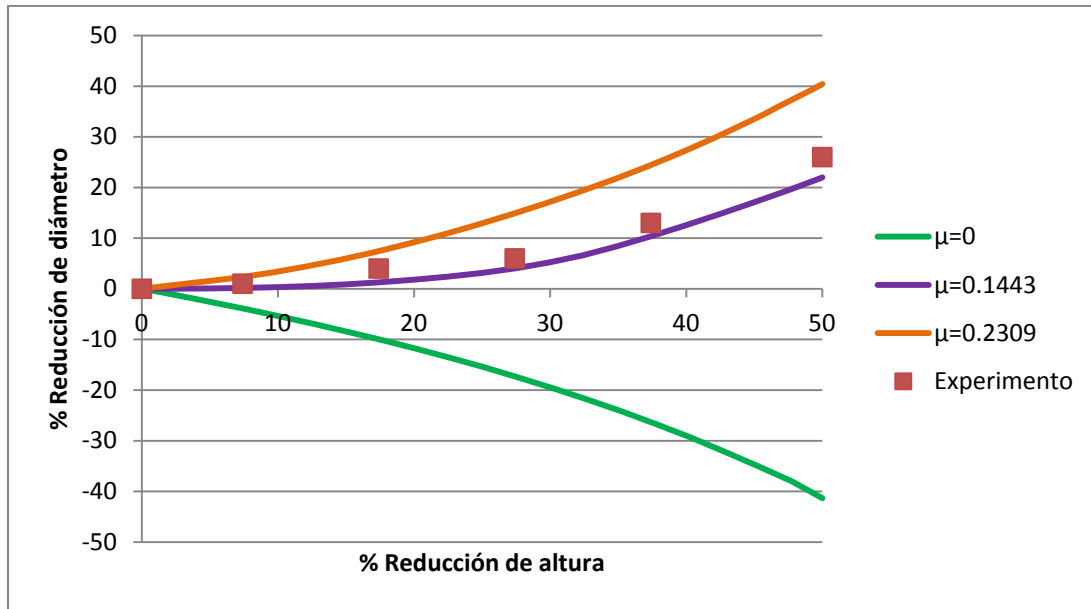


Figura 9.3 - Obtención de coeficiente de fricción

3.4 Ensayo de compresión de anillos a alta temperatura

A pesar de la importancia de los procesos de conformado en caliente, es poca la información en la literatura acerca de las mediciones del coeficiente de fricción a altas temperaturas.

Trabajos recientes (19) (23) comienzan a estudiar los efectos de la temperatura en la medición de la fricción en el conformado de superaleaciones. Zhu (19) comprime anillos a alta temperatura de titanio 64 con herramientas a una temperatura de 200°C. Por su parte, Shahriari (23) comprime superaleaciones de Nimonic a alta temperatura con herramientas a la misma temperatura. El acero al carbono, en cambio, no ha sido tan estudiado.

Capítulo 4

Método de Elementos Finitos

4.1 Introducción

En el presente trabajo se utilizó el paquete computacional Abaqus® para realizar las simulaciones del ensayo de compresión de anillo. Dicho código utiliza el método de los elementos finitos que en su definición más simple, puede considerarse como un método aplicado a la resolución de ecuaciones diferenciales complejas por métodos algebraicos. Existen muchos métodos numéricos para resolver los problemas por medio de los elementos finitos, pero aquí se concentrará la atención en la manera en que el paquete Abaqus realiza los cálculos.

En el presente capítulo se presenta la historia del método de los elementos finitos, así como la manera en que el Abaqus resuelve las ecuaciones para realizar los cálculos de deformación del material, así como también el modo en que la transferencia de calor que se lleva a cabo en un experimento de compresión de anillos en caliente.

4.2 Historia

Antiguos matemáticos ya usaban métodos numéricos para calcular la circunferencia del círculo, y después para medir el número pi (24). El enfoque que tuvieron estos matemáticos fue el de interponer un círculo y un polígono, dígame un pentágono, con el mismo punto central y de manera que los vértices del polígono tocan la circunferencia. El método numérico dice que es posible aproximar el valor de la circunferencia sumando los lados del pentágono, es decir, la circunferencia puede aproximarse al perímetro del pentágono. En ese caso se tiene un elemento finito de 5 líneas, o un mallado de 5 *elementos*.

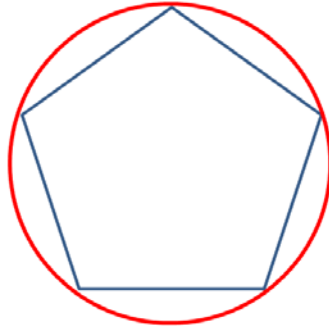


Figura 4.10 - MEF de 5 elementos para calcular circunferencia de círculo

Si se quiere obtener una aproximación más real se puede hacer un mallado de más elementos. En la siguiente figura podemos ver cómo el perímetro de un dodecágono (12 elementos) nos arrojaría un valor más aproximado a una circunferencia. Evidentemente con la ayuda de una computadora se podría calcular el perímetro de un polígono de n elementos, obteniendo un resultado bastante aproximado a la circunferencia del círculo.

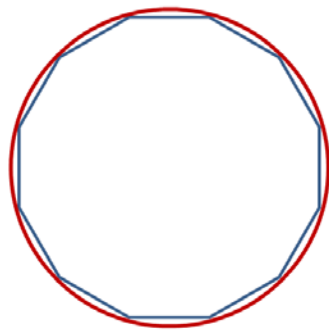


Figura 4.11 - MEF de 12 elementos para calcular circunferencia

4.3 Procedimiento en el Método del Elemento Finito

La resolución de un problema por medio del método del elemento finito (25) sigue un proceso ordenado de pasos. Los pasos se enumeran a continuación:

I. Discretización del medio continuo:

Primero se divide el objeto de estudio en varios elementos. Se pueden usar gran variedad de formas y elementos para hacer esta división. El número y

la forma de los elementos dependerán de la precisión que se busque en la aproximación y el tiempo de cómputo esperado.

II. Selección de las funciones de interpolación:

Después de la discretización del conjunto, se asignan puntos o nodos a cada elemento y después se selecciona una función de interpolación para representar el cambio de la variable de interés sobre el elemento, de manera que es posible determinar el valor de la variable de interés en cualquier punto dentro del elemento. Dicha variable puede ser representada como un escalar, vector o tensor.

III. Determinar las ecuaciones elementales:

Cuando ya se tienen las funciones de interpolación establecidas, se determinan ecuaciones elementales que representan las propiedades de cada elemento.

IV. Ensamble de ecuaciones elementales para obtener el sistema de ecuaciones:

El siguiente paso es el ensamble de las ecuaciones elementales, para esto se combinan éstas en una matriz de ecuaciones.

V. Especificar las condiciones de frontera:

Se imponen valores conocidos a los nodos en las fronteras del modelo. Estas condiciones de frontera se basan en dos clasificaciones que se identifican como condiciones de frontera esenciales y condiciones de frontera naturales.

Las condiciones de frontera esenciales comprenden derivaciones de menor orden. También se conocen como cinemáticas, de desplazamiento o de geometría. Mientras que las condiciones de frontera naturales son las derivaciones de orden mayor y se le conocen como dinámicas, de fuerza o esfuerzos.

VI. Resolver el sistema de ecuaciones:

Al tener ya listo el sistema de ecuaciones que involucran los valores desconocidos de los nodos del modelo se verifica si el comportamiento es estable o no. Si el sistema es estable se resuelven ecuaciones algebraicas

lineales o no lineales. Si el problema es inestable se resolverán ecuaciones diferenciales ordinarias, ya que los nodos desconocidos están en función del tiempo.

VII. Post-procesamiento:

Por último se obtienen las respuestas a los valores desconocidos. Estas respuestas pueden ser usadas para calcular otros parámetros.

4.4 Método de Aproximación Directa

Este método sólo se utiliza cuando se tiene un problema relativamente simple, pero proporciona un buen panorama para saber cómo funciona el método de los elementos finitos.

De los sistemas más básicos para poder estudiarlo por medio del elemento finito es el sistema lineal de dos resortes conectados en serie con un lado empotrado a una pared rígida y el otro lado se encuentra libre. Los resortes pueden estar sometidos a fuerzas de tensión o compresión. Los únicos parámetros del sistema serán la fuerza, el desplazamiento y la rigidez del resorte.

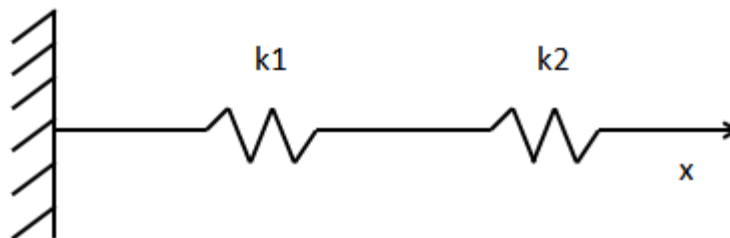


Figura 12 - Sistema lineal simple de 2 resortes

Para determinar las propiedades del elemento, que en este caso serían las ecuaciones de fuerza y desplazamiento, se toma el sistema como un elemento aislado, como en la Figura 4. La fuerza y el desplazamiento son definidos en cada nodo y, por conveniencia, se toma la fuerza y el desplazamiento en una dirección positiva. La variable de campo para este ejemplo sería el desplazamiento.

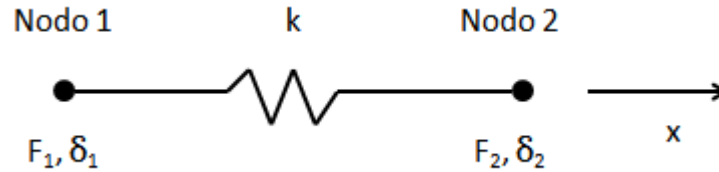


Figura 13 - Diagrama de cuerpo libre

Usando la Ley de Hooke se tiene la relación del desplazamiento y las fuerzas aplicadas sobre los nodos. Siendo F la carga axial, δ el desplazamiento, k la rigidez del resorte y a su flexibilidad:

$$\delta = \frac{F}{k} = aF$$

Entonces se puede deducir la relación fuerza-deflexión para el resorte en términos de una fuerza nodal F_1 y el desplazamiento nodal:

$$F_1 = k\delta_1 - k\delta_2 \quad y \quad -F_2 = -k\delta_1 + k\delta_2$$

Escribiendo estas ecuaciones en forma de matriz se puede describir la ecuación de las propiedades de fuerza-desplazamiento de un elemento:

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

Y en su forma reducida:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez, $\{\delta\}$ es el vector de desplazamientos nodales y $\{F\}$ es el vector de fuerzas nodales. Además, los componentes de $[K]$ se escriben usualmente como k_{ij} para denotar su locación en la fila i y columna j .

4.5 Enfoque de Abaqus

El concepto más básico de Abaqus es el de dividir la *historia* del problema en *pasos*. Un paso es cualquier fase conveniente en la historia del problema, un desplazamiento, un calentamiento, o ambos a la vez. En cada paso el usuario

elige un *procedimiento* en donde se define el tipo de análisis a llevarse a cabo durante dicho paso, por ejemplo, análisis de esfuerzos dinámicos, análisis de la transferencia de calor, etc.

Abaqus (26) ataca los problemas con dos posibles aproximaciones, la lineal y la no lineal. En la primera se obtienen un número finitos de líneas pequeñas que al unirse dan una aproximación a una línea curva. Por el otro lado, en los problemas no lineales, el objetivo es encontrar una solución convergente con el menor costo posible. Para este enfoque, se puede elegir controlar el tamaño de los incrementos, así como las tolerancias de error. Los problemas de *creep*, o transferencia de calor se resuelven por este método.

En el anexo I se describen las ecuaciones que resuelve el código.

Capítulo 5

Metodología Experimental

5.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta la experimentación que se hizo y la metodología usada. Para comenzar se mandaron a fabricar las herramientas y los materiales necesarios, después se caracterizaron y se midieron algunos coeficientes de enfriamiento necesarios para la modelación por Abaqus. También se describen otros procedimientos como el recubrimiento de cobre necesario para proteger contra la oxidación a alta temperatura.

La metodología contemplada originalmente sufrió de algunas modificaciones a lo largo del trabajo, por lo que al final aquí se relata la usada finalmente. No sería sorpresa que los métodos aquí usados no sean los más óptimos o adecuados. En el capítulo de recomendaciones se tratará ese tema.

5.2 Maquinado de platos de compresión, porta-platos y anillos

Para realizar el presente trabajo se consiguieron dos barras de materiales con los cuales se fabrican rodillos de laminación. Los dos materiales estudiados son un acero de alta velocidad (o acero rápido, o *High Speed Steel (HSS)*) y un hierro blanco alto en cromo (*HCr*).

La barra de acero de alta velocidad era un cilindro de 60 mm de diámetro y 25 mm de altura, mientras que la barra del hierro era un prisma con sección rectangular de 72 mm de lado por 120 mm de altura.



Figura 5.14 - A la izquierda, hierro alto en cromo; a la derecha, el acero de alta velocidad

De ambos materiales se obtuvieron dos piezas de tamaño similar para fabricar los platos compresores del anillo. Las dimensiones finales de las piezas fabricadas del acero de alta velocidad fueron de un diámetro de 60 mm y un espesor de 12.45 mm. Las dimensiones finales de las piezas fabricadas del hierro blanco alto en cromo fueron de 72 mm de lado y 12.39 mm de espesor. En la figura 5.1 se observa un plato de cada material al final de su proceso de maquinado. Debido a la gran dureza de ambos materiales se optó por cortarlos por electroerosión con hilo. Debido al alto costo de este proceso se decidió cortar secciones transversales de distintas geometrías.

Para estos experimentos también se maquinaron porta-platos cuya función es la de sujetar las piezas que simulan el rodillo de laminación (hierro blanco y acero de alta velocidad). Estas piezas se colocarían en la máquina universal, por lo que se midieron las dimensiones necesarias para fabricar estos porta-platos.

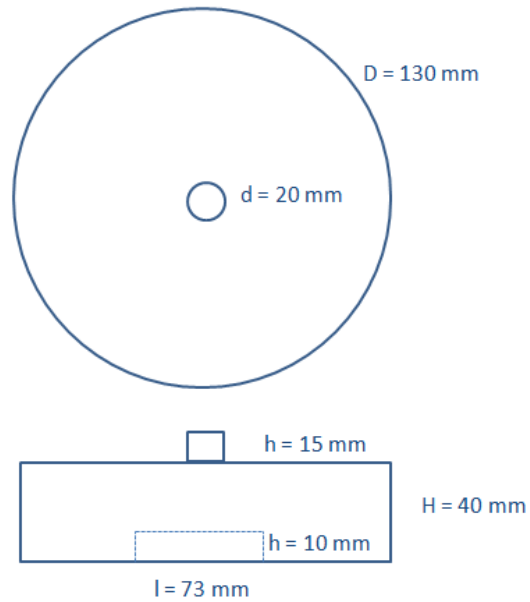


Figura 5.15 – Diseño y dimensiones de porta-platos

Para la fabricación de los porta-platos se utilizó acero comercial 1045 para facilitar su proceso de maquinado. Las piezas fueron tratadas térmicamente después del maquinado para mejorar sus propiedades mecánicas.



Figura 5.16 – Porta-platos, vista de parte superior



Figura 5.17 – Porta-platos, vista de “caja”

En las figuras 5.3 y 5.4 se observa el porta-platos superior con sus detalles para que pueda ser ensamblado y atornillado en la máquina universal, así como el detalle del lado contrario donde se aprecia la “caja” donde se pueden insertar las piezas de los materiales de laminación. En las perforaciones que se aprecian hay cuatro tornillos opresores que sirven para sujetar la pieza en la “caja”.

El porta-platos inferior es de la misma forma y tamaño, excepto que no cuenta con los tornillos opresores.

De manera simultánea se fabricaron las probetas para los ensayos. Éstas consistían de anillos de acero al carbono. Se fabricaron 90 anillos con unas medidas de diámetro exterior $9/8$ " (28.575 mm), diámetro interior $9/16$ " (14.2875 mm) y altura $3/8$ " (9.525 mm); dichas medidas respetan la relación 6:3:2 como se recomienda en la sección 3.3. La razón por la que usamos ahora el sistema de medición inglés es porque en los talleres de maquinado se tienen herramientas en dichas unidades.

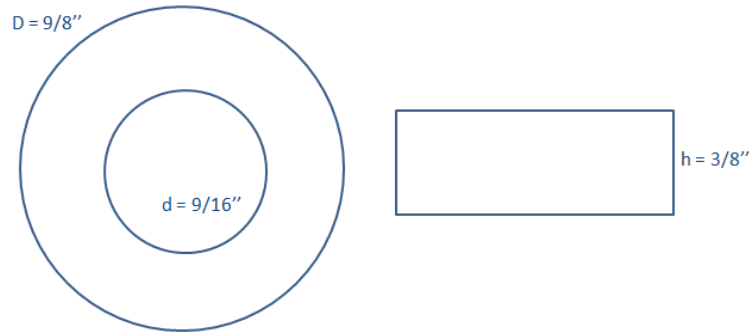


Figura 5.18 - Diseño de anillos

5.3 Preparación de anillos

Debido a que los anillos de acero se someterán a altas temperaturas para esta medición es bastante probable que se forme una capa de óxido de alta temperatura en su superficie, lo cual afectaría el proceso de la medición de temperaturas, por ejemplo, ya que el óxido puede actuar como un aislante térmico. Para evitar el fenómeno de la oxidación a alta temperatura se tienen dos opciones, la primera es recubrir los anillos con grafito y la segunda es recubrirlos con cobre.

5.3.1 Recubrimiento con grafito

Este método es relativamente fácil, sólo hay que enterrar los anillos en grafito en polvo al momento de meterlos al horno o mufla. Lo complicado es encontrar un recipiente de un material adecuado (acero, cerámico, colcha cerámica) del tamaño correcto que quepa en el horno y que pueda contener los anillos.



Figura 5.19 - Grafito en polvo

El grafito sólo protege al acero contra la oxidación a alta temperatura, no lo afecta en otro sentido. La desventaja es que al momento de hacer la compresión podrá actuar como un lubricante.

5.3.2 Recubrimiento con cobre

El otro método para ayudar a resistir al óxido de alta temperatura es el recubrimiento de cobre (27). La idea es formar una capa muy delgada de cobre encima del acero la cual no se oxidaría a altas temperaturas, teniendo la limitante que el punto de fusión del cobre es, aproximadamente, 1084°C.

Para realizar este recubrimiento se utilizaron los siguientes materiales y reactivos:

Vaso de precipitado de 250 mL
15 g de sulfato de cobre
200 mL de agua destilada o desionizada
15 mL de ácido sulfúrico

Tabla 5.1 - Preparación de solución



Figura 5.20 - Cristales de sulfato de cobre

En el vaso de precipitado se disuelven los 15 gramos de sulfato de cobre en los 200 mililitros de agua destilada. Después se agregan con cuidado y lentamente los 15 mililitros del ácido sulfúrico. Quedará una solución de color azul como en la figura 8.



Figura 5.21 - Solución de sulfato de cobre y ácido sulfúrico

Con ayuda de un gancho se sumergen los anillos de acero por 1 o 2 segundos y se retiran inmediatamente. Si se pasa el tiempo de sumersión se corre el riesgo de que la capa de cobre sea tan espesa que se caiga. Después se seca el anillo con una secadora.



Figura 5.22 - Anillo cobrizado y sin cobrizar

5.4 Caracterización superficial de los platos de compresión y anillos

El acero de alta velocidad es un acero que contiene cantidades considerables de elementos como cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio. La microestructura del acero que resulta de un tratamiento térmico de austenitización y de revenido se caracteriza por tener una matriz martensítica y carburos eutécticos de precipitados del tipo M_6C , M_2C y MC que le dan gran resistencia al desgaste.

Por su parte, el hierro blanco alto en cromo se caracteriza por su contenido de cromo de entre el 16 y el 19% y un contenido de carbono entre 2.7 y 2.9%. La microestructura típica de este material se compone de una matriz martensítica, en la cual alrededor de 25 y 30% de carburos de cromo (M_7C_3) están presentes, lo cual promueve que el material tenga una buena resistencia al desgaste.

5.4.1 Composición química

La composición química de los materiales de los platos de compresión se obtuvo directamente de la información proporcionada por el fabricante (28) (29).

Acero de Alta Velocidad (% Peso)									
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	V	W
1 - 2.5	0.1 - 0.5	0.5 - 1.5	1 - 2.5	4 - 8	2 - 8	<0.05	<0.015	3 - 9	2 - 8

Tabla 5.2 - Composición química de acero de alta velocidad

Hierro Blanco Alto Cromo (% Peso)							
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
2.7 - 2.9	0.4 - 0.6	0.9 - 1.1	1.2 - 1.4	16 - 19	1.2 - 1.4	<0.05	<0.015

Tabla 5.3 - Composición química del hierro blanco alto cromo

5.4.2 Propiedades mecánicas y térmicas

Para la realización del modelo físico de compresión de anillo fue preciso conocer algunas propiedades mecánicas y térmicas de los materiales de estudio como fueron el módulo de Young (E), la conductividad térmica (k) y el calor específico (C). También estas propiedades se obtuvieron de las especificaciones del fabricante (28) (29).

	Acero Alta Velocidad	Alto cromo
Módulo de Young (MPa)	200000 - 210000	210000 - 220000
Conductividad Térmica (W/m-K)	17 - 18	16 - 20
Calor específico (J/Kg-K)	500 - 540	460 - 480

Tabla 5.4 - Propiedades mecánicas de las herramientas

5.4.3 Caracterización de Superficies

El coeficiente de fricción está fuertemente relacionado con las características que presenten las superficies, sobretodo su rugosidad. Es probable que dos sistemas de materiales iguales presenten coeficientes de fricción distintos si presentan rugosidades diferentes.

5.4.3.1 Rugosidad

Con la ayuda de un rugosímetro Mitutoyo SurfTest-211 se midió la rugosidad de los platos para comprimir, así como también la rugosidad de los anillos de acero al carbono antes y después de las pruebas. El funcionamiento de este aparato de medición es muy sencillo, una aguja con punta de diamante se desplaza en línea recta a través de la superficie a medir y se miden las pequeñas variaciones en la altura que va sintiendo la punta de diamante. Este rugosímetro otorga valores de los parámetros comunes de rugosidad denominados R_a , R_z y R_y en unidades de μm .

En la siguiente tabla podemos ver la descripción de cada parámetro que caracteriza la rugosidad.

	Descripción
Ra	Media aritméticas de los valores absolutos de los "picos" y "valles"
Rz	Media de los valores absolutos de las 5 crestas de perfil más altas y los 5 valles más bajos
Ry	Máxima altura entre picos y valles

Tabla 5.5 - Parámetros de rugosidad

Se midieron las rugosidades de cada material en dos direcciones perpendiculares entre si, antes y después de ser usados para comprimir. También se midieron las rugosidades de los anillos antes y después de ser comprimidos; así como los anillos recubiertos de cobre y los enterrados en grafito antes y después de la compresión.



Figura 5.23 - Rugosímetro

Para el material de hierro alto cromo se usaron los platos en sus dos lados. De ahí el hecho que se hayan hecho medidas de todas las superficies de los platos de ese material. En cambio, el acero de alta velocidad sólo se utilizó por un lado.

Entonces, queda la medición de rugosidad de las superficies de los platos de la siguiente manera (cada uno se mide en dos direcciones, obteniendo R_a , R_z y R_y).

Alto Cromo				
	Plato superior Lado A Original	Plato superior Lado A Trabajado	Plato Inferior Lado A Original	Plato Inferior Lado A Trabajado
Ra	0.46	0.79	4.95	4.02
Rz	3.8	6.5	31.1	30.4
Ry	4.8	11.2	34.8	40
Ra	0.48	1.04	4	3.36
Rz	3.6	9.7	26.8	21
Ry	4.4	10.8	29.1	22.7
	Plato superior Lado B Original	Plato superior Lado B Trabajado	Plato Inferior Lado B Original	Plato Inferior Lado B Trabajado
Ra	3.1	1.35	5.51	4.86
Rz	20.2	11.8	31.7	31.3
Ry	24	14.7	37.4	35.8
Ra	5.54	2.21	3.72	4.26
Rz	29.6	14.7	26.6	26.6
Ry	33.9	17.2	35.5	30.4

Tabla 5.6 - Rugosidad medida con perfilómetro en los plato de hierro blanco

Alta velocidad		
	Plato Superior Original	Plato Superior Trabajado
Ra	0.32	0.22
Rz	2.3	2.3
Ry	3.4	2.9
Ra	0.36	0.62
Rz	3.3	4.1
Ry	5.1	6
	Plato Inferior Original	Plato Inferior Trabajado
Ra	0.32	0.42
Rz	3.1	4.1
Ry	4.3	7
Ra	0.34	0.85
Rz	3.4	8.4
Ry	4.8	10.7

Tabla 5.7 - Rugosidad medida con perfilómetro en los plato de acero de alta velocidad

Los anillos antes de la compresión con y sin recubrimiento de cobre también fueron medidos de la misma manera (R_a , R_z y R_y).

Anillo sin comprimir		
	Recubierto Cobre	Limpio
Ra	5.8	2.37
Rz	38.9	11.3
Ry	49.9	13.7
Ra	4.59	2.46
Rz	28.2	11.1
Ry	34.2	13.4

Tabla 5.8 - Rugosidad medida con perfilómetro en anillos sin comprimir

Por último, también se tomaron las medidas de rugosidad de los anillos ya comprimidos en cada diferente sistema. Igualmente, se midieron en dos direcciones y obtenemos (R_a , R_z y R_y).

Anillos comprimidos			
	Grafito	Cobre	Sin recubrimiento
	Alta velocidad	Alta velocidad	Alta velocidad
Ra	2.51	1.33	1.19
Rz	19.7	9.7	10.3
Ry	42.2	18.8	12.1
Ra	4.52	0.68	2.32
Rz	25.1	6.2	16.5
Ry	74.2	9.2	25.9
	Alto Cromo	Alto Cromo	Alto Cromo
Ra	1.86	2.43	2.3
Rz	11.2	15.6	18.3
Ry	15	21.7	22.4
Ra	2.29	2.98	6.07
Rz	12.8	19.8	26.6
Ry	18.2	26.2	37.4

Tabla 5.9 - Rugosidad medida con perfilómetro en anillos ensayados

5.4.3.2 Mediciones superficiales en microscopio confocal

Con un microscopio confocal Weiss se tomaron micrografías de las superficies de anillos y de las herramientas de trabajo y se midieron rugosidades.

El microscopio confocal es una técnica óptica que incrementa la resolución y el contraste de una micrografía usando iluminación puntual y un *pinhole* espacial para eliminar la luz desenfocada. Permite la construcción de estructuras en 3D de las imágenes obtenidas.

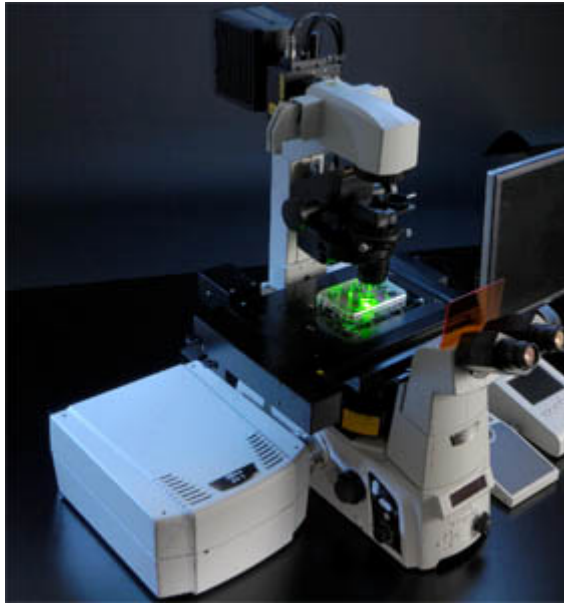


Figura 5.24 - Microscopio confocal

Para realizar las mediciones y obtenciones de micrografías se coloca la pieza en la platina del microscopio y se enfoca en un punto de la pieza a analizar. Con el software integrado se manipulan los lentes a usarse y se llevan a cabo las mediciones deseadas.

Todas las imágenes y los datos obtenidos por este método se encuentran en el anexo I.

5.4.3.3 Microscopía estereoscópica

Por último se tomarán unas fotografías a macro escala con el microscopio estereoscópico de las superficies antes y después de los trabajos. Se utilizó un microscopio Nikon SMZ745T. Con esta técnica se pueden obtener imágenes que simulan profundidad o 3D cuando dos imágenes ligeramente distintas se superponen, dando dicho efecto.



Figura 5.25 - Microscopio estereoscópico

La utilización de este microscopio es relativamente sencilla. Se colocan las piezas a observar en la platina inferior y se encienden dos focos para brindar luz, uno debajo de la pieza y otro encima de ella. Una pantalla está conectada al microscopio y ahí se puede ver la imagen de la pieza. Una vez que se enfoca bien se graban las imágenes.

5.5 Medición de coeficientes de transferencia térmica

Con el fin de crear un modelo de enfriamiento con fines de simulación computacional fue importante saber la velocidad de enfriamiento al aire de los anillos desde una temperatura de prueba hasta temperatura ambiente. Así como la velocidad con la que se transmite el calor del anillo caliente a otro acero, en este caso las herramientas de compresión. Para medir estos dos coeficientes se realizaron los siguientes experimentos.

5.5.1 Enfriamiento de anillos al aire

Para calcular la velocidad a la que un anillo pierde temperatura se realizaron mediciones por medio de termopares localizados en dos puntos de los anillos. La probeta se calentó en un horno tipo mufla por encima de los 1000°C y, después de la estabilización, el espécimen fue retirado del horno y enfriado por convección natural al aire. La historia de la temperatura se registró mediante un sistema de adquisición de datos a una velocidad de 3 datos/segundo.



Figura 5.26 – Horno tipo mufla

Se barrenaron con una broca de 1/16” los anillos a las medidas especificadas en la figura 5.12.

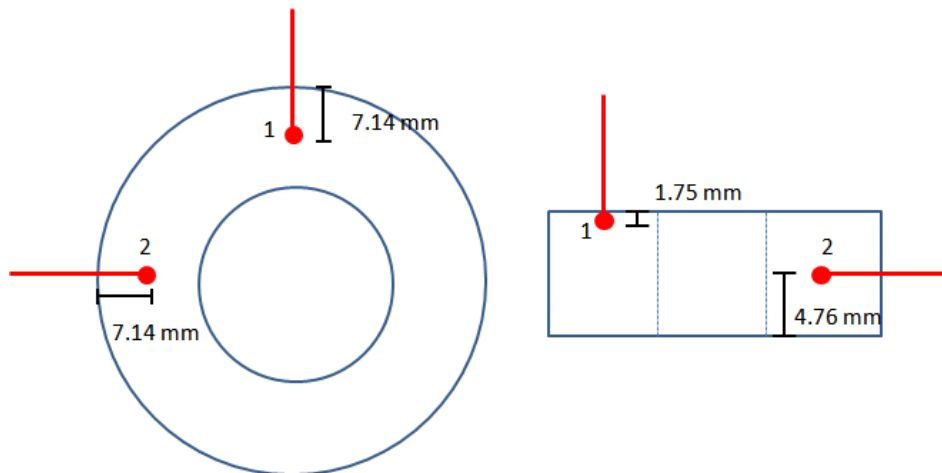


Figura 5.27 - Colocación de termopares

El termopar localizado cercano a la superficie tiene como finalidad otorgar una idea de la temperatura que está en ese punto. El otro termopar medirá la temperatura en la zona más caliente de la muestra debido a su lejana ubicación con las superficies que están en contacto directo con el medio ambiente.

La metodología fue la siguiente:

Temperatura inicial	Temperatura ambiente	Recubrimiento		
1050°C	24°C	Sin recubrimiento	Cobrizado	Grafito
800°C	24°C	Sin recubrimiento	Cobrizado	Grafito

Tabla 5.10 - Metodología de experimentación de medición de enfriamiento al aire



Figura 5.28 - Medición de temperaturas

La mufla usada es una marca Felisa con capacidad de hasta 1200°C. Se usaron termopares tipo K (cromel-alumel) con un espesor en su diámetro de 1/16” para medir las temperaturas y una tarjeta de adquisición de datos NI Instruments. Con el software LabView Signal Express 3.0 se obtuvieron todos los datos.



Figura 5.29 - Anillo a alta temperatura con termopares

5.5.2 Enfriamiento de anillos en contacto con herramientas de compresión

Fue importante conocer la conductividad térmica que se establece entre el anillo caliente y la herramienta fría. Un buen modelo de la conductividad permite conocer la temperatura de los anillos o de los platos prácticamente a cualquier tiempo del ensayo.

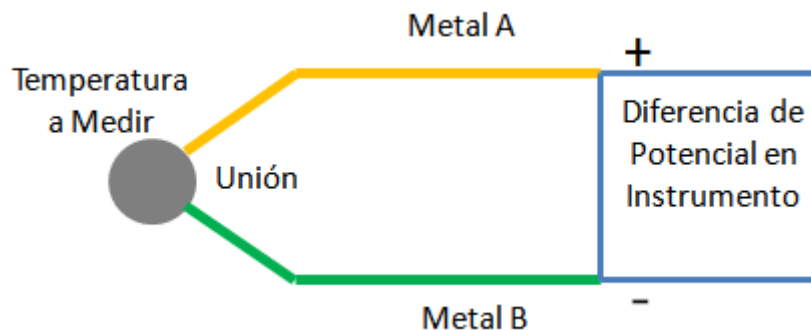


Figura 5.30 - Termopar

Para realizar estas mediciones se usó la misma metodología del enfriamiento al aire, es decir, se conectaron los termopares en los mismos puntos, la diferencia fue que en este se realizó al mismo tiempo la compresión al anillo, registrando temperaturas durante todo el proceso.

Temperatura anillo	Temperatura herramienta	Recubrimiento
1050°C	24°C	Cobrizado

Tabla 5.11 - Metodología de experimentación de medición de transferencia térmica de anillo caliente a herramienta fría

La máquina universal usada es una marca Shimadzu con capacidad de 30,000 kN.

5.6 Ensayos de compresión con platos de acero grado herramienta y de hierro alto cromo

Una vez que se tuvieron los valores de los coeficientes de enfriamiento de los materiales en aire y cuando están en contacto con las herramientas de trabajo, se realizaron 60 compresiones de anillos a distintas temperaturas, diferentes deformaciones, con los dos materiales de herramienta y con distintos recubrimientos con la finalidad de medir los porcentajes de deformación en la altura y en el diámetro interno.



Figura 5.31 - Máquina universal

Al término de estos ensayos se midieron los porcentajes de deformación en la altura y en el diámetro interno para poder graficar los comportamientos de los materiales y se podrán comparar en las curvas de calibración para asignarle un coeficiente de fricción a cada sistema.

Platos	Temperatura inicial anillo	Temperatura ambiente	Recubrimiento	Número de anillos
Alta velocidad	1050°C	24°C	Sin recubrimiento	5
			Cobrizado	5
			Grafito	5
	800°C	24°C	Sin recubrimiento	5
			Cobrizado	5
			Grafito	5
Alto cromo	1050°C	24°C	Sin recubrimiento	5
			Cobrizado	5
			Grafito	5
	800°C	24°C	Sin recubrimiento	5
			Cobrizado	5
			Grafito	5

Tabla 5.12 - Metodología de experimentación de ensayos de compresión

5.7 Medición de la resistencia del material durante el ensayo de compresión de anillos

Se tomaron los datos de la computadora conectada a la máquina universal para obtener algunos datos como la fuerza máxima y el desplazamiento del pistón. Después se midieron las deformaciones de los anillos en altura y en diámetro interno.

Con dichos datos es posible obtener una aproximación de la gráfica de esfuerzo deformación del acero comprimido.

Capítulo 6

Simulación

6.1 Introducción

Uno de nuestros objetivos es obtener las curvas de calibración del coeficiente de fricción en altas temperaturas para nuestro par de materiales. Para realizar éstas nos apoyamos en el método de los elementos finitos para que una computadora haga todos los cálculos por nosotros.

La parte experimental de nuestro trabajo consiste de dos partes complementarias: la simulación y el experimento físico. Como ya habíamos advertido, se usó el paquete Abaqus para la simulación del ensayo de compresión de anillos.

El procedimiento a seguir en esta parte del trabajo fue primero hacer una simulación que funcionara aunque faltasen algunos datos y constantes de los materiales. La primera simulación debía funcionar a bajas temperaturas, comparando los resultados de trabajos anteriores, para después usar el mismo modelo para altas temperaturas. Después realizar los experimentos físicos para validar y retroalimentar la simulación.

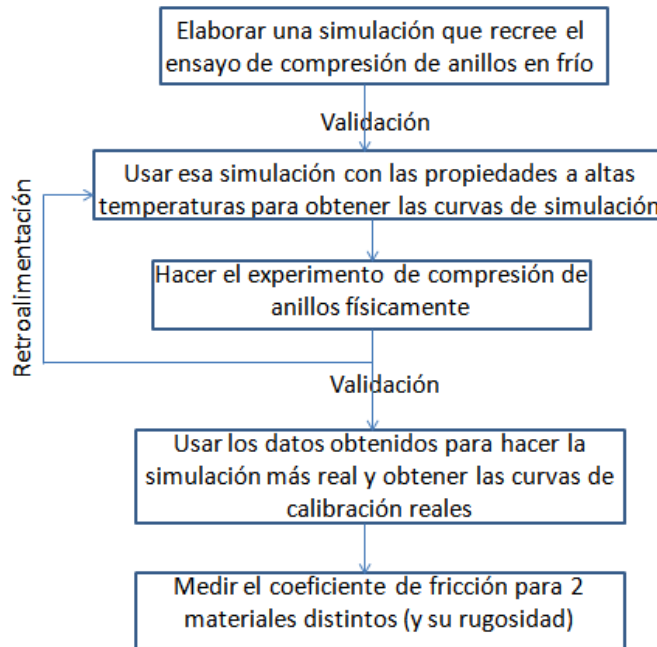


Figura 6.32 - Mapa Conceptual de Metodología de Simulación

6.2 Modelo de compresión de anillo

En esta parte se detallarán los pasos que se siguieron para realizar la simulación desde el paquete Abaqus. En este trabajo usamos el ABAQUS/CAE versión 6.11, cualquier otra versión debe funcionar de una manera bastante similar.

6.2.1 Preparación

Una vez abierto el programa, se debe seleccionar la carpeta donde irán grabando todos los archivos. En *File/Set Work Directory* se elige la carpeta deseada. Esta carpeta es importante porque se graban muchos archivos necesarios, por lo que, si después se quiere continuar un trabajo debe seleccionarse la misma carpeta para que el software pueda encontrar estos archivos necesarios.

6.2.2 Creación de las partes

En esta parte se explica cómo se crearon las dos partes: el anillo a comprimir y la placa compresora.

Debido a la simetría del sistema, basta con dibujar sólo una cuarta parte del mismo. Con esto podemos ahorrar recursos de la computadora y tardará menos tiempo en hacer los cálculos.

El paquete no pregunta nunca por unidades, por lo que es responsabilidad del usuario usar unidades congruentes. En las medidas de longitud se usarán milímetros.

Las medidas del anillo serán las mismas que las del anillo que se maquinaron, quedando las medidas así:

Parámetro	Medidas
Diámetro Exterior	28.575 mm (9/8")
Diámetro Interior	14.2875 mm (9/16")
Altura	9.525 mm (3/8")

Tabla 6.13 - Medidas de las probetas

Para el anillo: En *Create Part* se selecciona *Modeling Space: Axisymmetric*, *Type: Deformable*, *Base Feature: Shell*, *Approximate Size: 20*.

Hacerlo “*axisymmetric*” significa que le decimos al paquete que, por simetría, podemos dibujar sólo una mitad de la parte y así ahorrar tiempo en los cálculos, como en nuestro caso.

En *Create Lines: Rectangle* pedirá una esquina del rectángulo, se escribe (7.14375, 0) y como segunda esquina el punto (14.2875, 4.7625). Sabemos que usaremos los milímetros como unidad, y notamos que el 4.7625 es la mitad de la altura original (9.525 mm) y el valor de 7.14375 (mm) es la diferencia de los radios exterior e interior.

Para la placa compresora: Mismo procedimiento, con las esquinas (0, 4.7625) y (30, 16.7625)

De esta manera quedaría un rectángulo de 30mm de largo y 12mm de altura. Estas medidas también están acorde a las del material físico que tendremos.

6.2.3 Creación de los materiales

El paquete permite crear materiales con sus respectivas propiedades para después asignar a una parte creada esas propiedades. Se crearán los materiales del anillo a comprimir y el de la placa compresora, ya que se tratarán de aceros de distintas propiedades.

En *Create Material* se puede nombrar al material y asignarle valores a las propiedades que la simulación vaya a requerir. Para la primera simulación, sólo se necesitará de alimentar al programa con las propiedades de densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson y las propiedades plásticas.

El material del anillo es acero al carbono, por lo que tiene propiedades muy fáciles de encontrar en la literatura. En *General/Density* se pone el valor correspondiente, en *Mechanical/Elasticity/Elastic* se caracteriza el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Los valores que se encontraron en la literatura son (30) (31):

Propiedades del Anillo	
Propiedad	Valor
Densidad (ton/mm ³)	7.85E-9
Módulo de Young (N/mm ²)	195E3
Coefficiente de Poisson	0.3

Tabla 6.14 - Propiedades del acero al carbono

Para las propiedades plásticas se selecciona *Mechanical/Plasticity/Plastic* donde se ponen los valores de esfuerzo-deformación. Estos valores fueron tomados de un trabajo de una ex-compañera de la facultad (17).

Esfuerzo (Mpa)	Deformación (%)
289.38	0
381.56	0.025
420.27	0.049
447.34	0.073
468.45	0.098
485.64	0.124
499.49	0.15

511.09	0.177
520.64	0.204
528.4	0.232
534.6	0.261
539.29	0.29
542.93	0.321
545.41	0.353
547.11	0.385
548.12	0.419
548.86	0.453
549.64	0.489

Tabla 6.15 - Propiedades plásticas del acero al carbono

Se crea un segundo material para la placa compresora. A este material se le puede poner la misma densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson (Recordando que por el momento se desea hacer una simulación que funcione, no que sea totalmente realista). No se le dan valores de plasticidad.

6.2.4 Creación y asignación de sección

En *Create Section* se elige *Category/Solid* y *Type/Homogeneous* y se asocia el material correspondiente a cada una de las secciones.

Luego, en *Assign Section*, se asigna cada sección a los dibujos correspondientes para que así tengan las propiedades que se alimentaron.

6.2.5 Crear el ensamble

Hasta este punto las dos partes están en distintos planos, por lo que es necesario crear un ensamble para que puedan interactuar.

En *Module: Assembly* después *Instance Part* aparecerá una nueva ventana, donde se seleccionan las dos partes al mismo tiempo (usando la tecla *Shift*), y se elige *Instance Type: Independent*.

6.2.6 Crear los pasos

El paquete llama *Steps* (pasos) a los trabajos que se quieran simular. Cada paso tendrá su propia función y duración y pueden ser dependientes o independientes de otros. Es muy importante definir bien estos pasos.

En esta primera simulación sólo se tendrá el paso inicial (*Inicial step*), el cual está por default, y el paso de la compresión el cual se creará. Para esto, se elige *Create step / Procedure type: General, Static, General*. En *Time period* se pone el valor que se quiere que dure dicho paso en segundos. En la parte superior hay una pestaña que dice *Incrementation* donde se escribe el número máximo de incrementos o iteraciones que el paquete hará en sus cálculos, así como el tamaño de estos incrementos.

Para esta simulación de compresión se pone que dure un segundo, 100 como el número máximo de incrementos, 1 como incremento inicial, 1E-005 al incremento mínimo, y 1 al incremento máximo.

Para terminar, se verifica que en *Step Manager* el paso recién creado tenga activada la opción *Nlgeom*.

6.2.7 Datos de salida deseados

El paquete da la opción de elegir qué datos se requieren al final de los cálculos. Para esta simulación se va a querer ver los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

En *Create Field Output* se tachan los cuadros *Stresses*, *Strains* y *Displacement/Velocity/Acceleration*.

6.2.8 Interacciones

En *Module: Interaction* se le dice al paquete qué cuerpos o superficies van a interactuar entre sí.

Se selecciona *Create Interaction / Surface-to-surface contact (Standard)*. Como *Master surface* y está la superficie inferior de la placa compresora y como la *Slave type* actuará la parte superior del anillo así como las caras interior y exterior.

La razón por la cual también se seleccionan las caras interior y exterior es porque, debido a la compresión, en algún momento el contacto será entre estas caras y la inferior de la placa.

En *Create Interaction Property / Type: Contact* se elige *Mechanical/Tangential Behavior*, donde dirá *Friction formulation*. Se selecciona automáticamente *Frictionless*. Es decir, diremos que en este caso no existirá fricción. Aquí mismo se puede cambiar el coeficiente de fricción a cualquier valor deseado.

6.2.9 Cargas

El siguiente módulo es el llamado *Load*. Aquí podemos definir las cargas mecánicas, térmicas, entre otras, a las que estará sometido el modelo. También se definen las condiciones inicial o condiciones de frontera.

La primera condición de frontera que se hará es hacer que la superficie inferior del anillo no se mueva en el eje x. En *Create Boundary Condition*, la nombramos y se elige el paso donde existirá esta condición, por lo que elegimos el paso inicial. En *Category/Mechanical* y en *Types for Selected Step* se presiona en *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*. Esta condición se tendrá en la superficie inferior del anillo eligiendo la opción *YSYMM*.

La siguiente condición de frontera será el movimiento de la placa superior en dirección negativa a lo largo del eje y para comprimir el anillo. Se hace el mismo procedimiento, pero ahora el tipo de condición será *Displacement/Rotation* y se elige la superficie superior de la placa compresora. En la ventana que se abre se escribe la magnitud del desplazamiento que queremos. En nuestro caso será 2.38125 (mm) en la dirección U2 (eje y) para que sea el 50% de la altura inicial.

6.2.10 Mallado

El mallado es parte importante de la resolución de las ecuaciones por medio de los elementos finitos, ya que la precisión de los resultados dependerá del

mismo. Un mallado muy fino dará resultados bastante precisos pero la computadora tardará mucho tiempo en resolver las ecuaciones, en cambio con un mallado muy grueso se obtendrán resultados muy rápidos pero con menos precisión.

Antes de hacer el mallado, se hacen unas particiones en la figura del anillo para hacer más realista la simulación. En *Module:Mesh / Tools, Partition / Face, Sketch* y se elige la figura del anillo. La ventana de trabajo se convertirá en una pantalla para dibujar. Con *Create Lines: Connected* se hacen unas líneas como se muestran en la figura (las dimensiones pueden variar un poco). Con estas particiones los elementos del mallado se comportarán de una manera más real y no se empalmarán cuando se compriman.

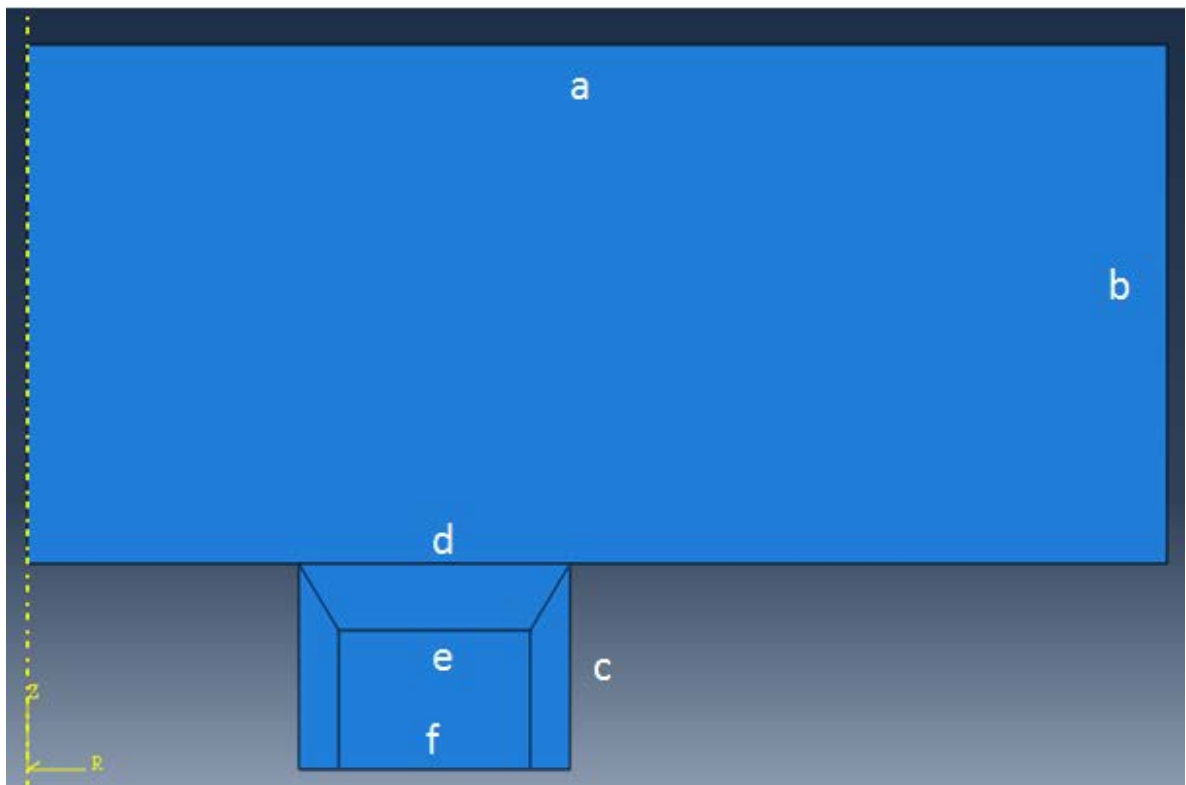


Figura 6.33 - Superficies del modelo

Para hacer el mallado, en *Mesh/Element Type* se sombrea el anillo y la placa. Luego en *Family* dirá *Axisymmetric stress*. En *Seed edges*, se elige cada superficie y se sugirieron estos valores, de acuerdo a la figura 6.2:

Superficie	Superficie	No. de segmentos
Placa superior	a	22
Placa lateral	b	10
Anillo laterales	c	8
Anillo superior y medio	d - e	10
Anillo inferior central	f	10

Tabla 6.16 - Segmentos sugeridos para el mallado

Luego en *Mesh Part Instance* se selecciona todo el modelo. El paquete hará el mallado de manera que quede así:

Área	No. de elementos
Herramienta	220
Anillo laterales	16
Anillo Superior	20
Anillo medio	80

Tabla 6.17 - Número de elementos por superficie en el modelo

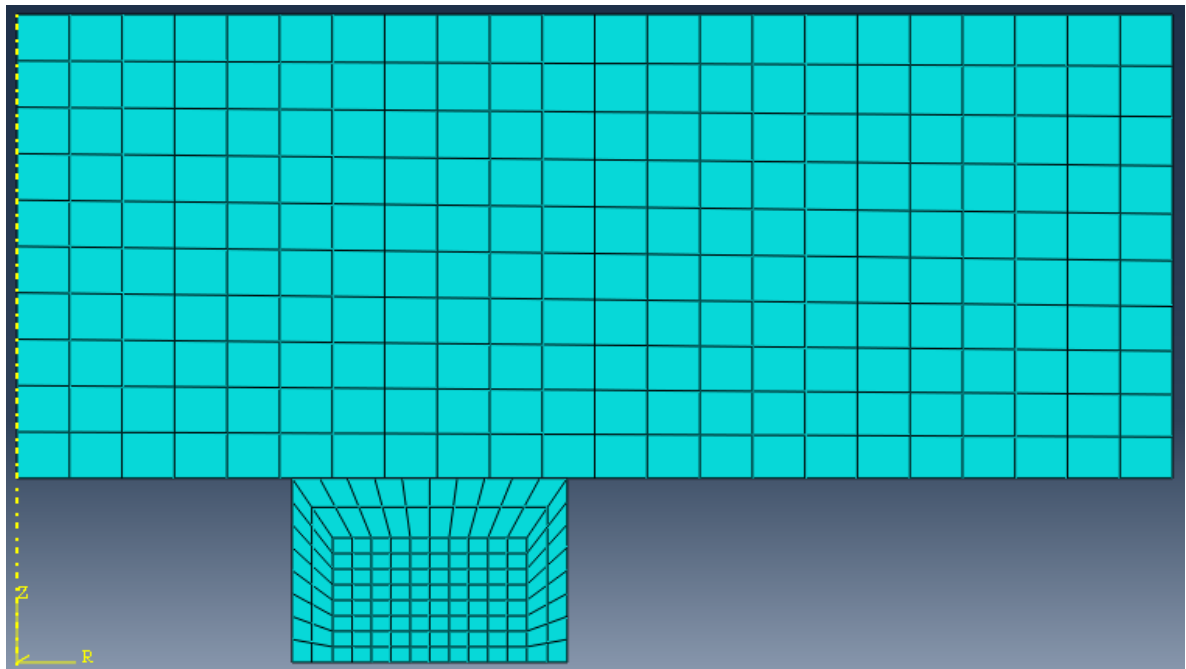


Figura 6.34 - Mallado final usado

6.2.11 Trabajo

Por último, se le dice al paquete que realice el trabajo de hacer los cálculos. En *Module: Job / Create Job*, se nombra y en *Job Manager* se presiona el botón *Submit*. El programa tardará unos segundos en hacer los cálculos. Al terminar los cálculos, el botón de *Results* se pondrá con letras negras, se presiona ese botón y se podrá ver la simulación.

6.2.12 Visualización

En esta pantalla se podrá ver la simulación de la compresión de anillos con el botón *Animate: Time History*. Aquí también podemos ver la distribución de esfuerzos, desplazamientos (temperaturas cuando se tengan), etc.

Lo importante para nuestro proyecto es fabricar las curvas de calibración, las cuales se obtienen midiendo los porcentajes de reducción de altura y del diámetro (o radio) interno. El paquete Abaqus puede proporcionar los valores de desplazamiento de cualquier nodo o punto. Para ver el desplazamiento horizontal se selecciona el nodo 1 de la figura, y el nodo 2 para el vertical.

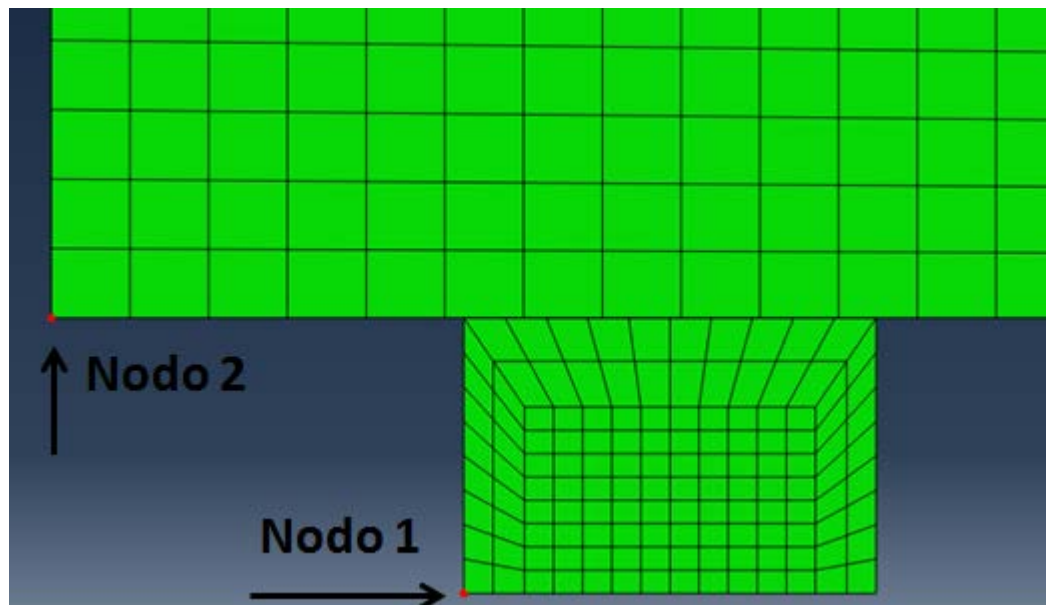


Figura 6.35 - Ubicación de los nodos a medir

Para obtener los datos necesarios, en *Create XY Data / ODB field output / Position: Unique Nodal*. De todas las opciones posibles, se busca *U: Spatial*

displacement, y se tacha la opción de *U1* (eje x). Después en *Elements/Nodes* se elige el nodo que queramos y se grafica su desplazamiento.

Una gráfica del desplazamiento contra el tiempo aparecerá en pantalla. En *XY Data Manager / Edit* se podrá ver una tabla con valores Tiempo-Desplazamiento.

6.3 Validación del modelo de compresión desarrollado vs resultados publicados

Antes de hacer un modelo de simulación para la compresión en caliente se debe validar el modelo ya creado y comparar los resultados con otros publicados anteriormente.

6.3.1 Obtención de datos

De acuerdo al modelo creado y descrito anteriormente se obtuvieron los siguientes datos:

Desplazamiento de nodos 1 y 2 ($\mu=0$)			
Horizontal		Vertical	
Tiempo	Desplazamiento	Tiempo	Desplazamiento
X	Y	X	Y
0.00	0.00	0.00	0.00
0.02	0.02	0.02	-0.03
0.03	0.04	0.03	-0.06
0.05	0.09	0.05	-0.12
0.09	0.15	0.09	-0.20
0.14	0.25	0.14	-0.32
0.22	0.41	0.22	-0.52
0.34	0.67	0.34	-0.80
0.52	1.12	0.52	-1.23
0.79	1.97	0.79	-1.88
1.00	2.88	1.00	-2.36

Tabla 6.18 - Desplazamientos de nodos en simulación

Los valores que interesan son los desplazamientos, los tiempos sirven sólo como referencia. Se puede notar que el paquete tomó el desplazamiento del nodo 1 hacia la izquierda como positivo y el del nodo 2 hacia abajo como negativo. Además, se recuerda que el desplazamiento esta en milímetros.

6.3.2 Obtención de Porcentajes de Deformación

Teniendo los valores de desplazamiento podemos calcular los porcentajes de deformación en la altura y en el diámetro interno.

El porcentaje del cambio del diámetro interno se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\% \Delta D = \frac{(Df - Di)}{Di} * 100$$

Podemos convertir los diámetros a radios, quedando:

$$\% \Delta D = \frac{2(Rf - Ri)}{2Ri} * 100$$

Los desplazamientos que nos arroja el paquete son, en sí, $(Rf - Ri)$, o también ΔR , y el radio interno es conocido (4.7625 mm). Por lo que usamos la ecuación final:

$$\% \Delta D = \frac{\Delta R}{4.7625} * 100$$

De la misma forma tenemos que el cambio en la altura se calcula así:

$$\% \Delta H = \frac{Hf - Hi}{Hi} * 100$$

El desplazamiento que nos da el ABAQUS es $(Hf - Hi)$, o bien ΔH . Y la altura inicial es 7.14375mm. Entonces:

$$\% \Delta H = \frac{\Delta H}{7.14375} * 100$$

Se advirtió anteriormente que teníamos desplazamientos hacia abajo negativos, y desplazamientos a la izquierda positivos. Para poder obtener las curvas de calibración es conveniente hacer un cambio de signo en ambos valores.

Aplicando las ecuaciones con los valores que se tenían se obtiene (nótese el cambio de signos en ambas columnas):

%H	%D	t
0.00	0.00	0.00
0.60	-0.24	0.02
1.34	-0.62	0.03
2.46	-1.19	0.05
4.18	-2.10	0.09
6.80	-3.50	0.14
10.82	-5.74	0.22
16.89	-9.39	0.34
25.74	-15.68	0.52
39.48	-27.52	0.79
49.60	-40.26	1.00

Tabla 6.19 - Porcentajes de deformación calculados

De igual forma, la columna del tiempo es sólo como referencia.

6.3.3 Gráfica

Se grafican dos columnas, siendo el cambio de altura el eje x, y el cambio en el diámetro interno el eje y. La columna del tiempo sólo nos sirve como marco de referencia. Con los valores calculados tenemos:

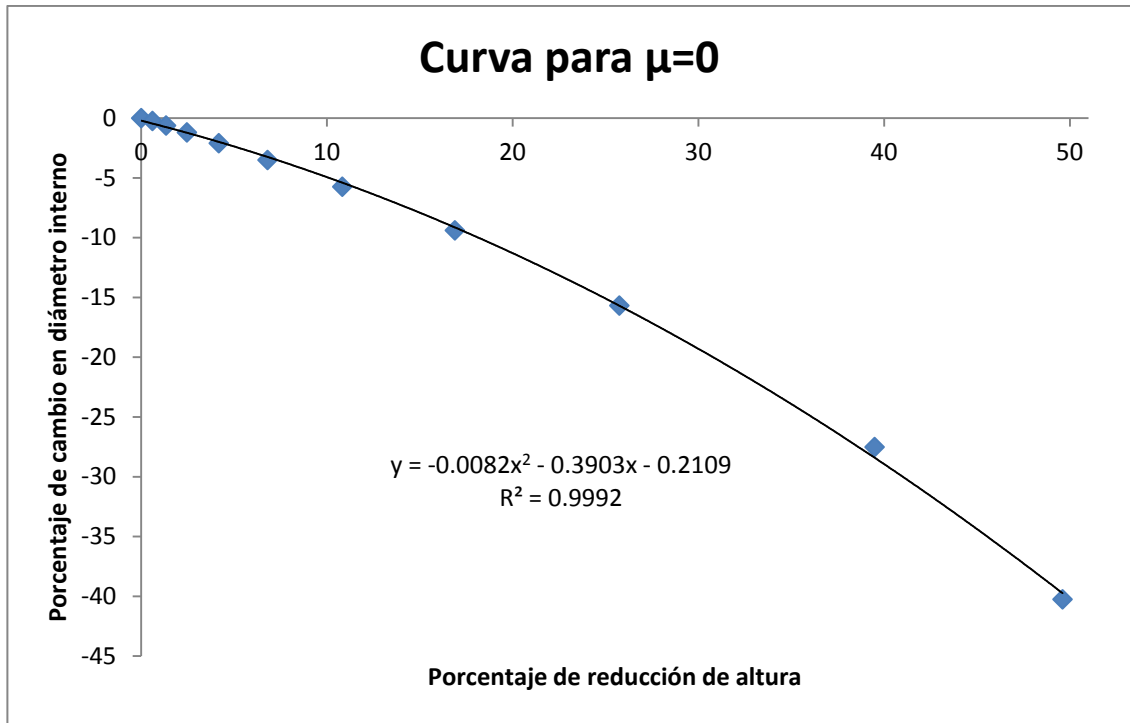


Figura 6.36 - Curva para fricción = 0

Esta línea sería parte de una curva de calibración, siendo la curva para $\mu=0$. Se agregó la ecuación polinómica como extra.

6.3.4 Obtención de más curvas

Para completar la curva de calibración se regresa a *Interaction* y en *Interaction Property Manager* se selecciona *Edit* y ahora se elige *Friction formulation: Penalty* y se escriben distintos valores para el coeficiente de fricción μ . Una vez hecho eso, sin cambiar nada más, se vuelve a correr de nuevo el *Job* y se vuelve a graficar.

6.3.5 Validación

La simulación que recién se creó tenía como propósito obtener los mismos resultados que se habían reportado anteriormente por ex-compañeros de la facultad (16) (17).

Se tomaron 3 valores del coeficiente de fricción μ para comparar resultados. Se obtuvieron los siguientes resultados:

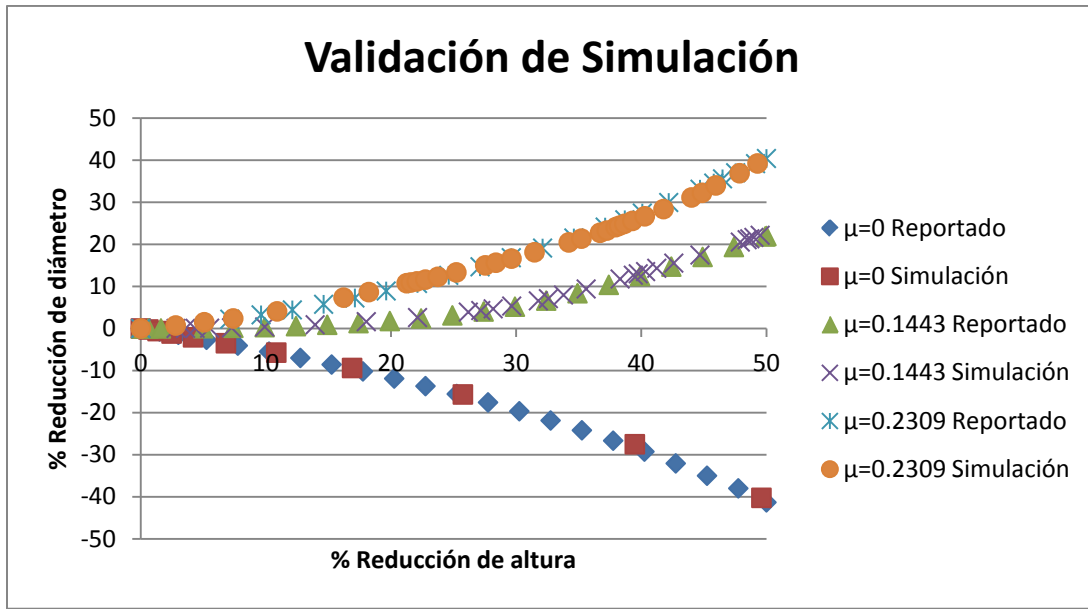


Figura 6.37 - Comparación de valores obtenidos con los reportados

Se puede apreciar que con la simulación creada se obtienen resultados bastante similares.

Los valores numéricos se encuentran en el anexo II.

6.4 Modelo de transferencia de calor

Antes de agregarle pasos al mismo modelo recién validado es conveniente hacer otro modelo donde sólo se lleven a cabo los procesos térmicos. Evidentemente se debe respaldar el modelo computacional con experimentos físicos.

Con el mismo dibujo de partes y propiedades se puede hacer este modelo.

6.4.1 Propiedades térmicas

El primer agregado que debe hacerse es cambiar las propiedades de los materiales. En la literatura, Leduc (32) reporta algunas fórmulas para calcular la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del acero al carbono dependiendo de la temperatura en la que se encuentre.

Las ecuaciones son:

$$k = 22 + 0.01091(T - 500)$$

$$\rho = 7800 - 0.5 (T - 500)$$

$$C = 622 + 0.0677 (T - 500)$$

La temperatura está en grados centígrados (°C). Entonces, las propiedades quedan:

T	k (W/mm-K)	ρ (ton/mm ³)	C (mJ/ton-K)
25	16.81775	8.04159E-09	589842500
75	17.36325	8.04132E-09	593227500
175	18.45425	8.04077E-09	599997500
250	19.2725	8.04036E-09	605075000
400	20.909	8.03955E-09	615230000
550	22.5455	8.03873E-09	625385000
700	24.182	8.03791E-09	635540000
850	25.8185	8.03709E-09	645695000
1000	27.455	8.03627E-09	655850000
1150	29.0915	8.03545E-09	666005000

Tabla 6.20 - Propiedades dependientes de la temperatura

Las unidades son las compatibles con el modelo ya hecho. Se pueden poner más datos a distintas temperaturas.

Para las placas, ya habíamos obtenido estas propiedades en el capítulo pasado, recordando:

	Acero Alta Velocidad	Alto cromo
Densidad (ton/mm ³)	7.850 (E-9)	7.850 (E-9)
Conductividad Térmica (W/mm-K)	17 - 18	16 - 20
Calor específico (mJ/Ton-K)	500 - 540 (E6)	460 - 480 (E6)

Tabla 6.21 - Propiedades de los porta - platos

6.4.2 Propiedades plásticas del acero al carbono

Para obtener las propiedades plásticas del acero a comprimir se usaron las ecuaciones que Leduc (32) reportó en su trabajo. Con estas ecuaciones pueden construirse las gráficas de esfuerzo – deformación para acero al carbono a alta temperatura (mayor a 550°C) cuando se le da una temperatura y una velocidad de deformación.

Estas ecuaciones pueden resumirse así:

$$\sigma = \sigma_e \text{ cuando } \varepsilon \leq a \varepsilon_p$$

$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \text{ cuando } \varepsilon > a \varepsilon_p$$

Donde

$$\sigma_e = \sigma_0 + B (1 - \exp(-C\varepsilon))^m$$

Y

$$\Delta\sigma = B' \left\{ 1 - \left[\exp(-k(\varepsilon - a\varepsilon_p)/\varepsilon_p) \right]^{m'} \right\}$$

Con estas constantes:

$$a = 0.7$$

$$k = 0.49$$

$$m = 0.5$$

$$m' = 1.4$$

Mientras que B, B' y C son funciones del parámetro Z de Zener-Hollomon:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_{HW}}{RT}\right)$$

Dichos parámetros se obtienen de:

$$B = \sigma_{ss(e)} - \sigma_0$$

$$B' = \sigma_{ss(e)} - \sigma_{ss}$$

$$C = -10 \ln \left[1 - \left[\frac{\sigma_{0.1} - \sigma_0}{B} \right]^{\frac{1}{m}} \right]$$

Los esfuerzos se calculan de:

$$\sigma_0 = 103.84 \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z}{492e11} \right)^{0.13}$$

$$\sigma_{0.1} = 89.29 \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z}{255e9} \right)^{0.182}$$

$$\sigma_{ss} = 106.72 \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z}{388e10} \right)^{0.146}$$

$$\sigma_{ss(e)} = 103.41 \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z}{177e9} \right)^{0.217}$$

Para aceros al carbono:

$$\varepsilon_p = 0.000697 d_0^{0.3} Z^{0.17}$$

Usando un tamaño de grano d_0 :

$$d_0 = 92.1$$

Y una energía de activación:

$$Q_{HW} = 300,000 \text{ J/mol}$$

Con estas ecuaciones se obtuvieron los datos que se alimentaron al paquete en la opción *Property Material*. Estos datos se encuentran en los anexos.

6.4.3 Nuevas condiciones iniciales

En este modelo el anillo estará a una temperatura alta y la herramienta estará a temperatura ambiente. Así que el primer cambio obvio es poner el anillo a dicha temperatura.

En *Module/Load / Create Predefined Field* se le puede asignar temperaturas iniciales a ambos cuerpos. Dependiendo de la simulación que se quiera realizar se asignan dichas temperaturas.

6.4.4 Nuevos pasos

A este nuevo modelo se le incluirán dos nuevos pasos (*steps*). Estos nuevos pasos simularán el enfriamiento en aire que tendrá el anillo a alta temperatura cuando salga del horno, así como la conducción de calor del anillo caliente a la herramienta fría antes y durante la compresión.

Con la inclusión de estos nuevos pasos se busca tener un mejor modelo computacional del fenómeno que se tendrá en la vida real.

6.4.4.1 Paso de enfriamiento al aire

Para simular el enfriamiento al que se somete un anillo caliente cuando se saca del horno y se encuentra con una atmósfera a temperatura ambiente se crea un nuevo paso después del *paso inicial*. Este nuevo paso podrá durar el tiempo que se crea pertinente. En *Module/Interaction / Create Interaction* se van a definir los tipos de enfriamientos a los que estará sometida la pieza caliente.

La primera será una *Surface film condition* donde se le asignará un coeficiente de convección y una temperatura al medio ambiente. Este coeficiente de convección se puede obtener de la literatura o experimentalmente. En el capítulo 7 se tienen las mediciones para obtener este coeficiente.

La segunda interacción será *Surface radiation* donde se le aplicará un enfriamiento por radiación, asignando un coeficiente de emisividad. El coeficiente de emisividad se encuentra en la literatura (33) como 0.7, mientras que el coeficiente de convección será medido experimentalmente.

6.4.4.2 Paso de enfriamiento por conducción

En este paso se busca calcular el enfriamiento que tiene la pieza al pasarle la energía térmica a la herramienta fría. Este paso se llevará a cabo después del enfriamiento al aire.

La interacción aquí representada será el mismo *Surface-to-surface Contact* que se había presentado en la fricción, sólo que ahora se agregará la *Thermal Conductance* y el *Heat Generation*. Para la generación de calor debido a la compresión sólo se activa la opción del paquete. Por su parte el valor de la conductancia es medido experimentalmente en el capítulo 7.

6.4.4.3 Pasos consecutivos

Es importante señalar que a pesar que cada paso tiene su tiempo y se llevan a cabo en serie, las interacciones se llevan a cabo durante todos los pasos una vez que son activados. Es decir, el enfriamiento al aire empieza a ocurrir desde que empieza ese paso hasta el final de la simulación y la conducción de calor del anillo a la herramienta ocurre desde su paso hasta el fin de la simulación.

6.4.5 Nuevas propiedades

También el paquete pedirá una temperatura del cero absoluto, así como la constante de Stefan-Boltzmann. Se le da click derecho a *Model* y en *Edit Attributes* se ponen dichos datos. Si se usan grados centígrados, la temperatura será de -273°C y la constante $5.67\text{E}-011$ para usar unidades compatibles.

6.4.6 Mallado

Al ser un modelo cien por ciento térmico se debe seleccionar en el mallado un *Element Type / Heat Transfer*.

6.5 Modelo acoplado de transferencia de calor y deformación

Toda vez que se tenga también un modelo térmico que funcione se podrá acoplar en un solo modelo térmico-mecánico. Para esto sólo se deben seguir los mismos pasos con unas pequeñas diferencias.

6.5.1 Mallado

Los elementos del mallado en este modelo acoplado deben ser *Element Type / Coupled Temperature – Displacement*. Todo lo demás se realiza de la misma manera.

Con todos estos pasos llevados a cabo se podrán realizar muchas simulaciones variando las temperaturas, tiempos de enfriamiento, conductividades térmicas, tipos de material, entre otras.

Capítulo 7

Resultados

7.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de todos los procedimientos experimentales presentados en el capítulo anterior.

7.2 Resultados experimentales

De acuerdo a la metodología propuesta se midieron las rugosidades, se tomaron fotografías y micrografías de las superficies y se midieron los coeficientes de enfriamiento.

Después se realizaron las pruebas de compresión y se obtuvieron las deformaciones en altura y diámetro interno. Con esos datos y las simulaciones presentadas más adelante en este capítulo se pudo calcular el coeficiente de fricción.

7.2.1 Microscopio estereoscópico

Con este microscopio se obtuvieron las siguientes fotografías.

7.2.1.1 Acero alta velocidad

Este material prácticamente no se afectó por el uso en los ensayos de compresión de anillos.



Figura 7.38 - Imagen de estereoscopio del acero de alta velocidad

7.2.1.2 Hierro blanco alto cromo

Este material presentó una porosidad en la zona del centro, la cual pudo afectar los resultados de los ensayos.



Figura 7.39 - Imagen de estereoscopio del hierro blanco alto en cromo plato inferior

El otro plato de este material también tenía porosidad en la parte central.

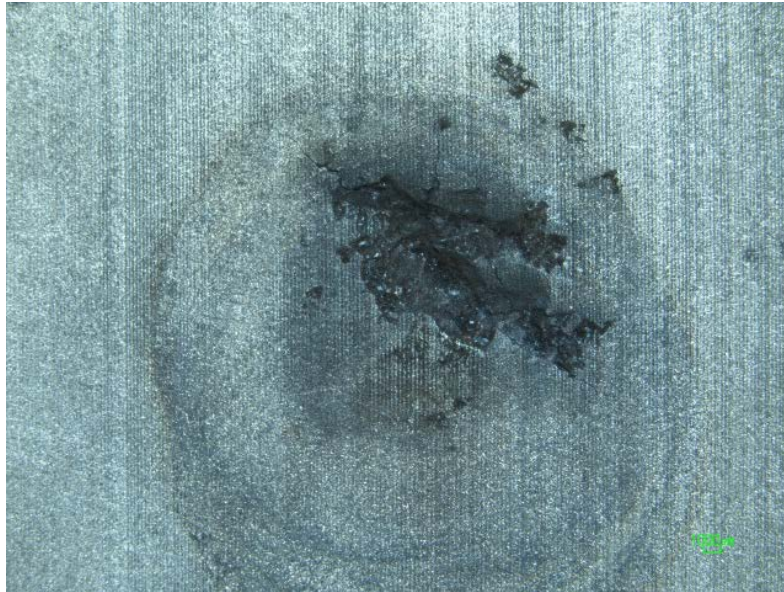


Figura 7.40 - Imagen de estereoscopio del hierro blanco alto en cromo plato superior

7.2.1.3 Anillos comprimidos

Los anillos comprimidos por los platos del hierro blanco presentan las huellas de la porosidad del material.



Figura 7.41 - Anillo comprimido por hierro blanco

En cambio, los anillos comprimidos por el acero de alta velocidad presentaron una superficie más uniforme.

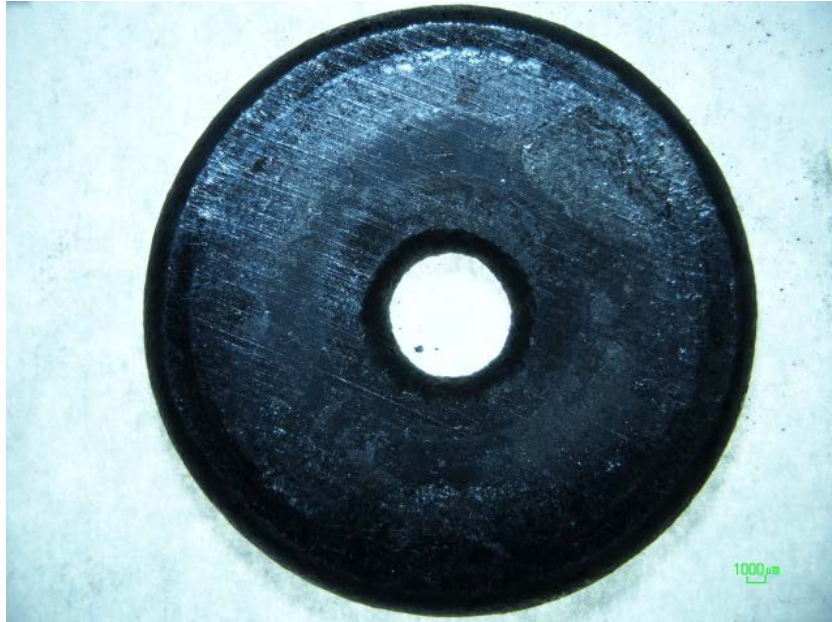


Figura 7.42 - Anillo comprimido por acero de alta velocidad

7.3 Medición de coeficientes de transferencia térmica

Siguiendo la metodología establecida en el capítulo 5, se obtuvieron los siguientes resultados.

7.3.1 Curvas de enfriamiento al aire

Los termopares conectados a la tarjeta adquisitor de datos y al paquete computacional LabView otorgaron 3 datos por segundo.

Con el fin de eliminar el ruido en los datos que se obtuvieron, se utilizó el promedio aritmético de las temperaturas. Debido a la gran cantidad de información estos datos se encuentran en el anexo III.

Las gráficas 7.6 y 7.7 muestran las temperaturas registradas por los dos termopares en cada experimento. En el primero se calentó un anillo sin recubrimiento, y en el segundo se usó un anillo recubierto de cobre.



Figura 7.43 - Enfriamiento de anillo sin recubrimiento

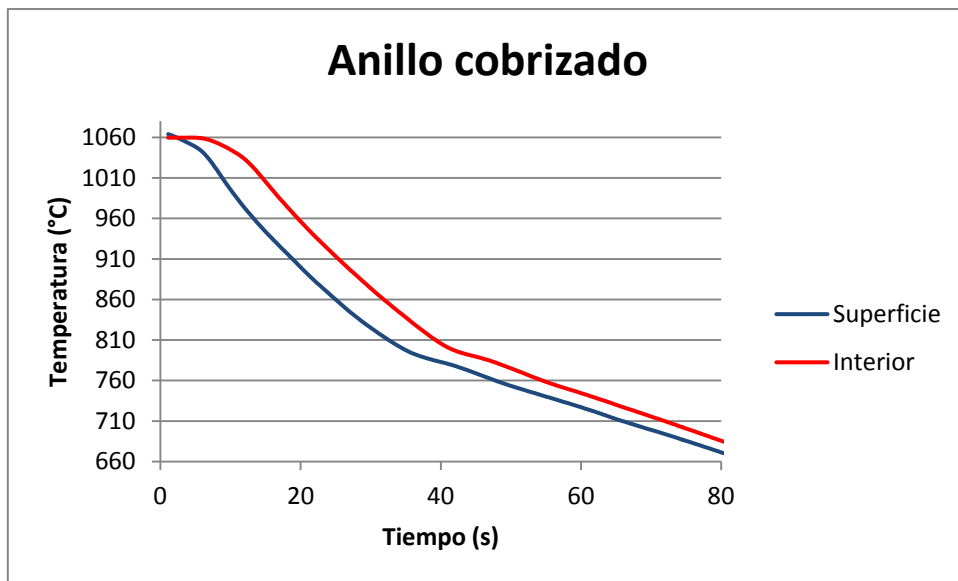


Figura 7.44 - Enfriamiento de anillo cobrizado

7.3.2 Enfriamiento de anillo en contacto con herramienta fría

En este ensayo se colocaron dos termopares como se estableció en el apartado 5.5.1, sin embargo el termopar que se encontraba en el centro fue roto debido a la compresión del anillo, por lo que sólo fue posible obtener datos del termopar restante. De igual forma, los datos están en el anexo IV.

La siguiente gráfica muestra la temperatura registrada por el único termopar que funcionó durante todo el ensayo.

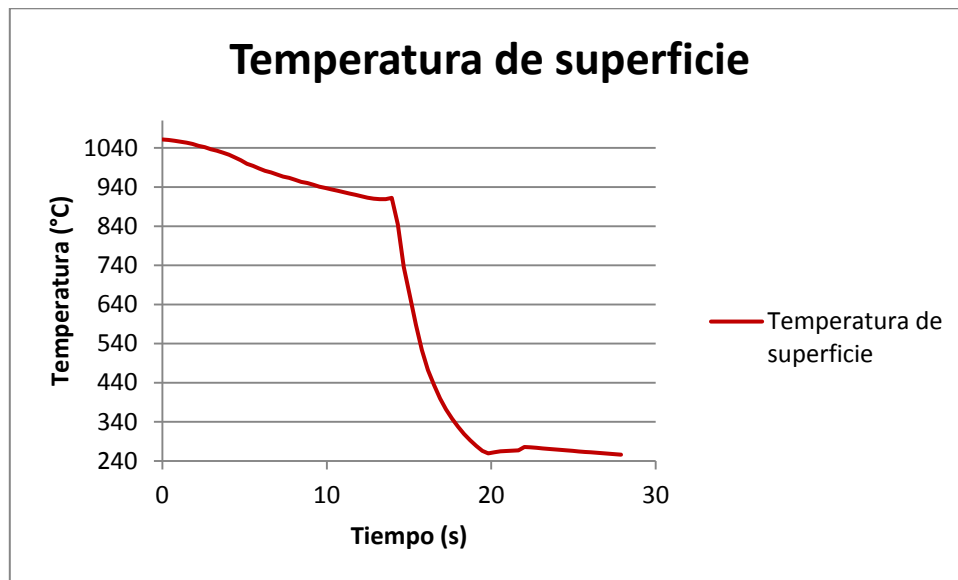


Figura 7.45 - Enfriamiento de anillo en contacto con herramienta fría y en compresión

7.4 Ensayos de compresión

Se realizaron los ensayos de compresión a distintas deformaciones. En la máquina universal se elegían distintos desplazamientos del pistón para cada anillo ensayado.

Se presentan imágenes de los anillos ensayados a distintos porcentajes de deformación.



Figura 7.46 - Anillos ensayados a distintos desplazamientos del pistón, de izquierda a derecha: a) 0mm, b) 1mm, c) 2mm, d) 3mm, e) 4mm y f) 5mm



Figura 7.47 - Anillos ensayados al mismo desplazamiento del pistón (5mm) con diferentes recubrimientos. Izquierda sin recubrimiento, derecha con grafito

7.4.1 Ensayos de anillos a 1050°C

Se midieron los anillos antes y después de los ensayos y con las ecuaciones V se pudieron calcular los porcentajes de deformación.

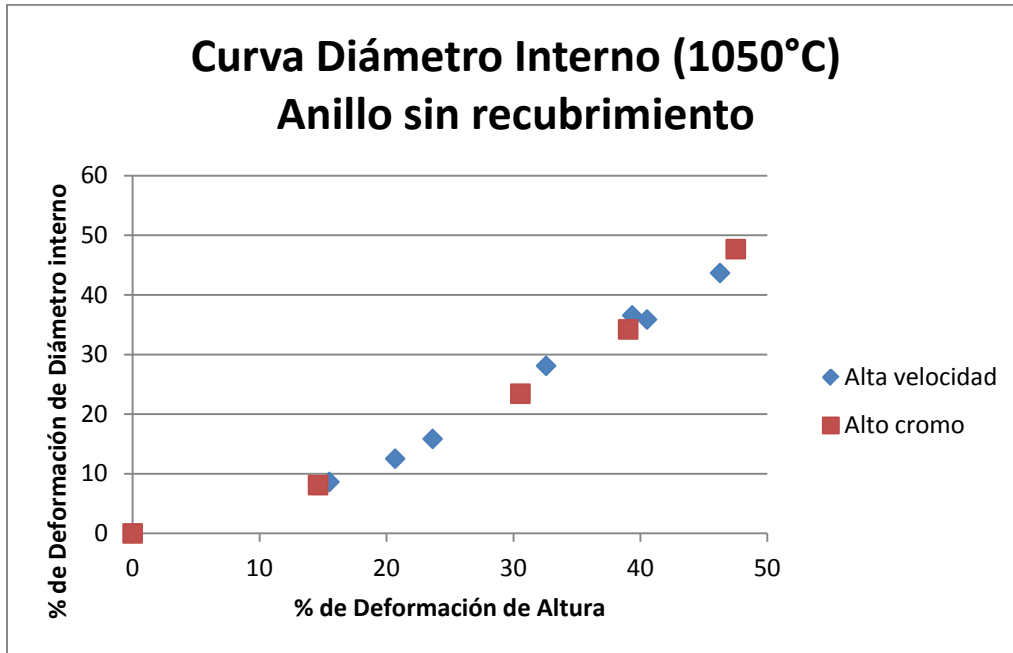


Figura 7.48 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro interno para anillo a 1050°C sin recubrimiento

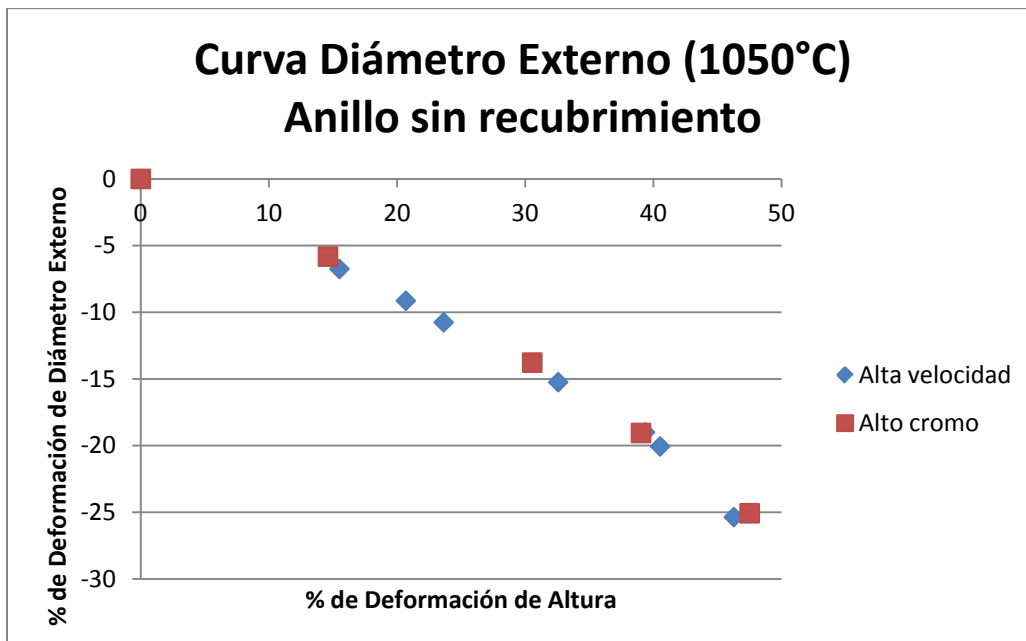


Figura 7.49 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro externo para anillo a 1050°C sin recubrimiento

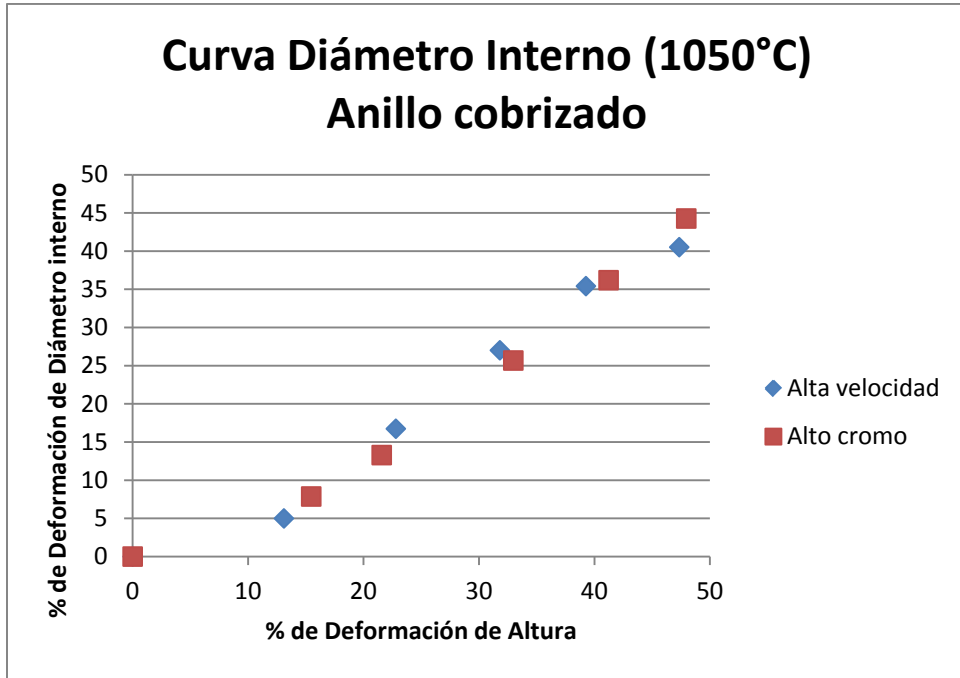


Figura 7.50 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro interno para anillo a 1050°C cobrizado

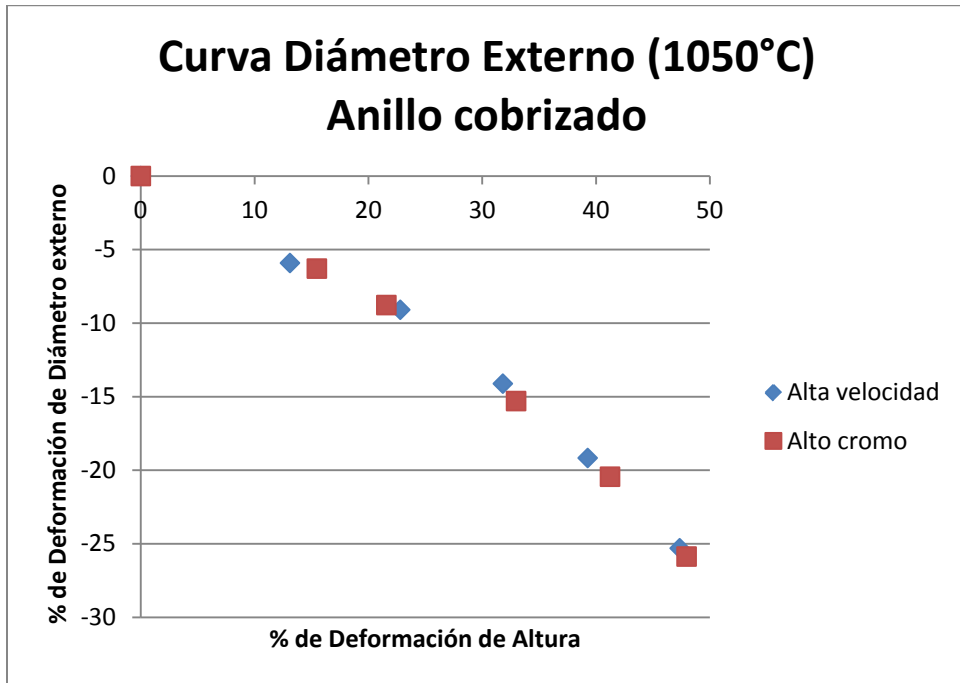


Figura 7.51 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro externo para anillo a 1050°C cobrizado

Debido a un problema con los termopares, los ensayos con recubrimiento de grafito a 1050°C no pudieron realizarse. En los ensayos a 800°C sí pudieron llevarse a cabo.

7.4.2 Ensayos a 800°C

Los anillos recubiertos con grafito mostraron este comportamiento en su diámetro interno y externo:

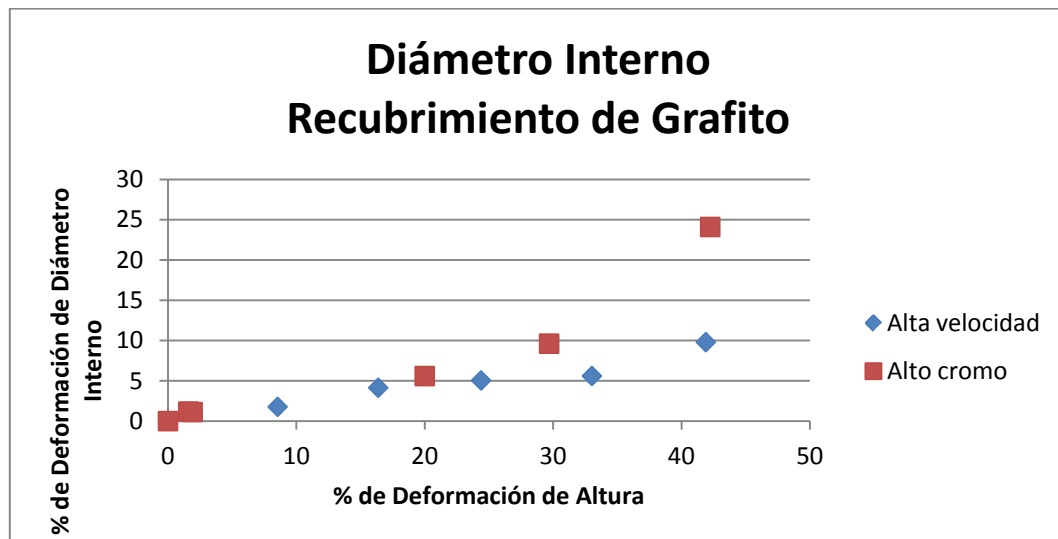


Figura 7.52 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro interno para anillo a 800°C con grafito

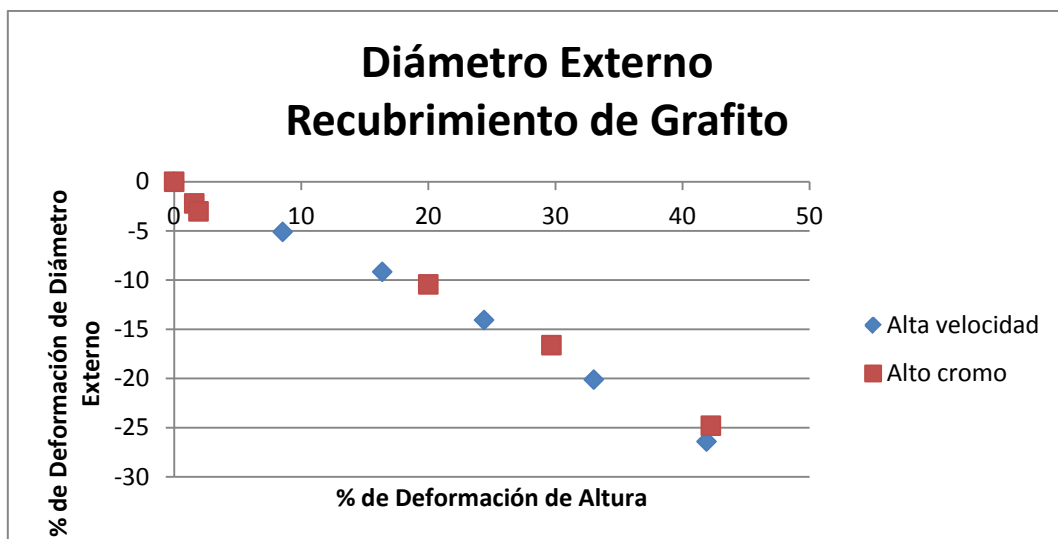


Figura 7.53 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro externo para anillo a 800°C con grafito

Los anillos cobrizados presentaron los siguientes resultados:

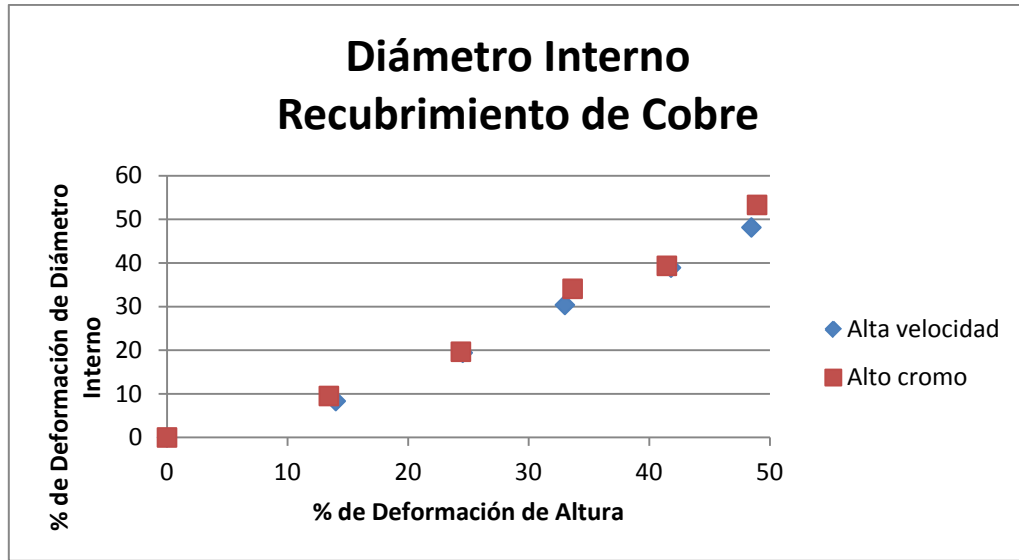


Figura 7.54 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro interno para anillo a 800°C cobrizado

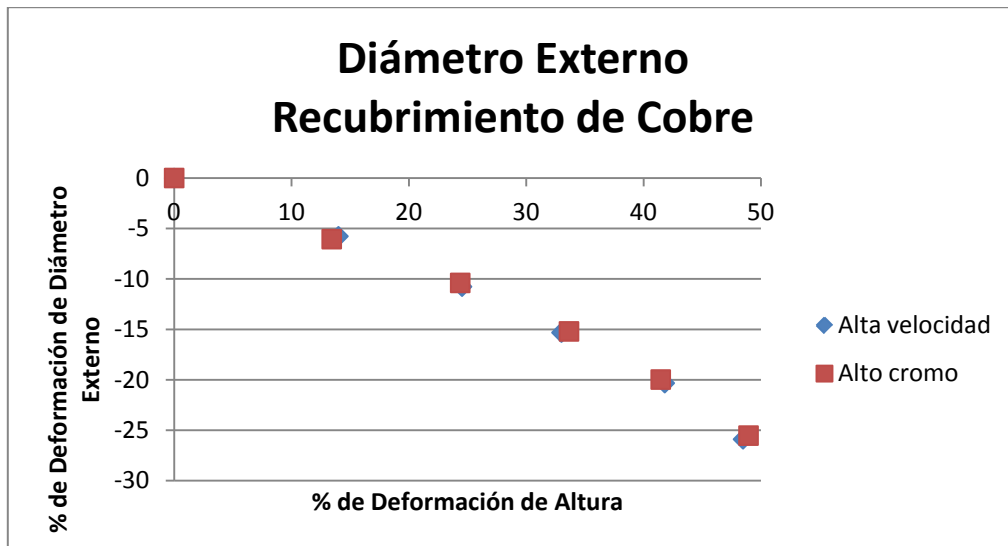


Figura 7.55 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro externo para anillo a 800°C cobrizado

Por último, los anillos sin recubrimiento a 800°C se comportaron de la siguiente manera:

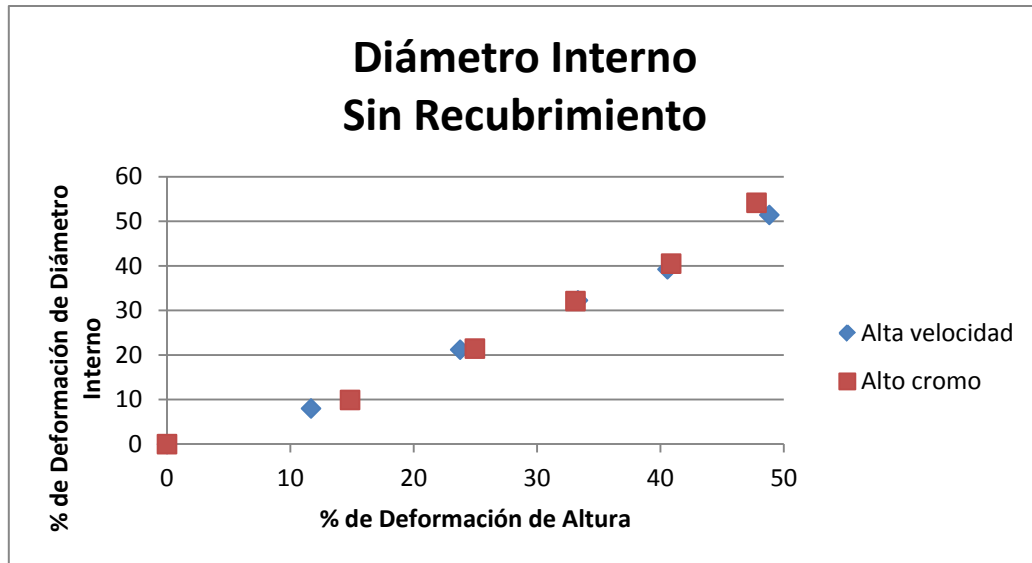


Figura 7.56 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro interno para anillo a 800°C sin recubrimiento

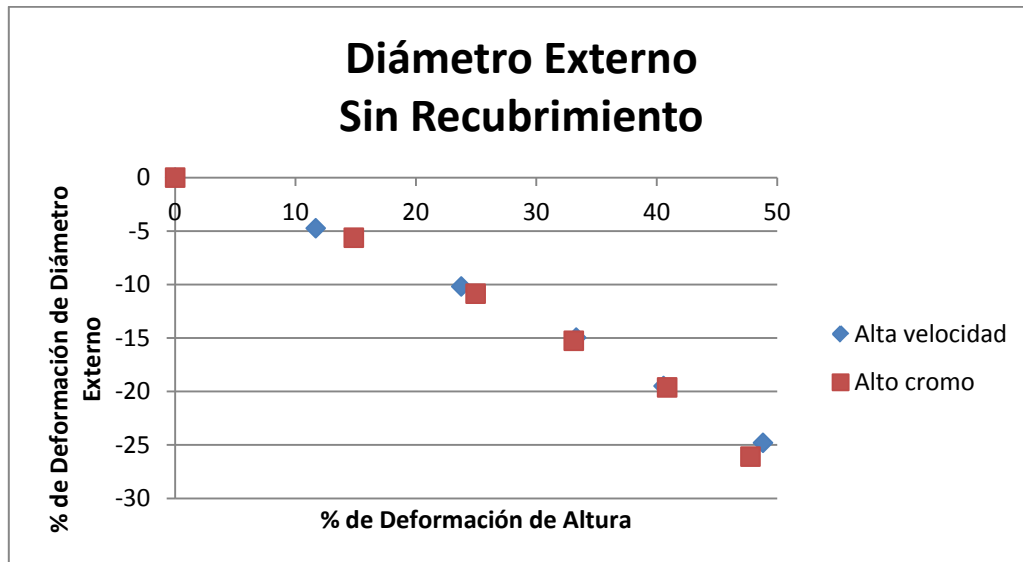


Figura 7.57 - Porcentaje de deformación de altura contra porcentaje de deformación de diámetro externo para anillo a 800°C sin recubrimiento

7.5 Fuerzas medidas durante la compresión de anillos

El software con el que opera la máquina universal otorga el dato de la fuerza máxima que registra la celda de carga así como el desplazamiento del pistón en cada ensayo.

Ensayos a 1050°C - Sin recubrimiento					
Alta velocidad			Alto cromo		
% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)	% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)
15.50	53456.9	1.32753	14.60	49178.1	1.32753
23.63	76370.2	2.32063	30.54	109687	3.32054
20.68	75008.4	2.21817	39.03	153587	4.3273
32.57	91878.7	3.32751	47.51	188347	5.3272
39.35	131430	4.32734			
40.52	135240	4.32739			
46.27	166758	5.32563			

Tabla 7.1 - Fuerzas medidas en anillos sin recubrimiento a 1050°C

Ensayos a 1050°C - Cobrizado					
Alto cromo			Alta velocidad		
% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)	% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)
13.10	59549.1	1.3275	15.47	57821.9	1.3275
22.80	90785.5	2.24378	21.57	78693.7	2.32764
31.81	124217	3.32744	32.97	97975	3.32756
39.26	154100	4.3275	41.23	140959	4.32731
47.34	204928	5.32741	47.95	160378	5.32736

Tabla 7.2 - Fuerzas medidas en anillos cobrizados a 1050°C

Ensayos a 800°C - Grafito					
Alto cromo			Alta velocidad		
% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)	% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)
1.58	6770.04	1.3047	8.54	49704.7	1.32734
1.92	18307.1	1.32757	16.37	80934.2	2.32749
19.99	98865.3	3.32743	24.38	99809.7	3.32746
29.68	129807	4.32741	33.02	129589	4.32764
42.23	160182	5.32307	41.89	159675	5.32739

Tabla 7.3 - Fuerzas medidas en anillos con grafito a 800°C

Ensayos a 800°C - Cobrizado					
Alta velocidad			Alto cromo		
% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)	% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)
14.00	92246.4	1.32759	13.42	78399.8	1.29796
24.53	131931	2.32742	24.37	108208	2.32743
33.00	161702	3.32749	33.64	139554	3.32742
41.80	200924	4.32741	41.46	168805	4.32723
48.47	252944	5.3271	48.94	233631	5.32705

Tabla 7.4 - Fuerzas medidas en anillos cobrizados a 800°C

Ensayos a 800°C - Sin recubrimiento					
Alto cromo			Alta velocidad		
% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)	% H	Máxima Fuerza (N)	Desplazamiento pistón (mm)
14.84	77328.9	1.32757	11.67	82123.2	1.32756
24.95	116679	2.32744	23.76	122448	2.24414
33.11	143431	3.32741	33.31	157294	3.32748
40.86	180564	4.3273	40.56	217330	4.32742
47.78	250927	5.32722	48.82	265409	5.32709

Tabla 7.5 - Fuerzas medidas en anillos sin recubrimiento a 800°C

7.6 Simulación del modelo físico mediante el método de elementos finitos

Con la simulación del paquete Abaqus se obtuvieron los siguientes resultados.

7.6.1 Coeficiente de enfriamiento al aire

En el paquete Abaqus se buscó un coeficiente de convección que mejor simulara el enfriamiento medido experimentalmente en el apartado 7.3.1. El coeficiente de convección de **0.005 W/m²-K** simuló bien el proceso de enfriamiento desde 1050°C hasta 750°C. Este coeficiente se alimenta al paquete desde la opción *Surface Film Condition*.

Las gráficas 7.21 y 7.22 comparan las temperaturas medidas experimentalmente y las obtenidas por la simulación con el coeficiente mencionado. Los datos se encuentran en el anexo VI.

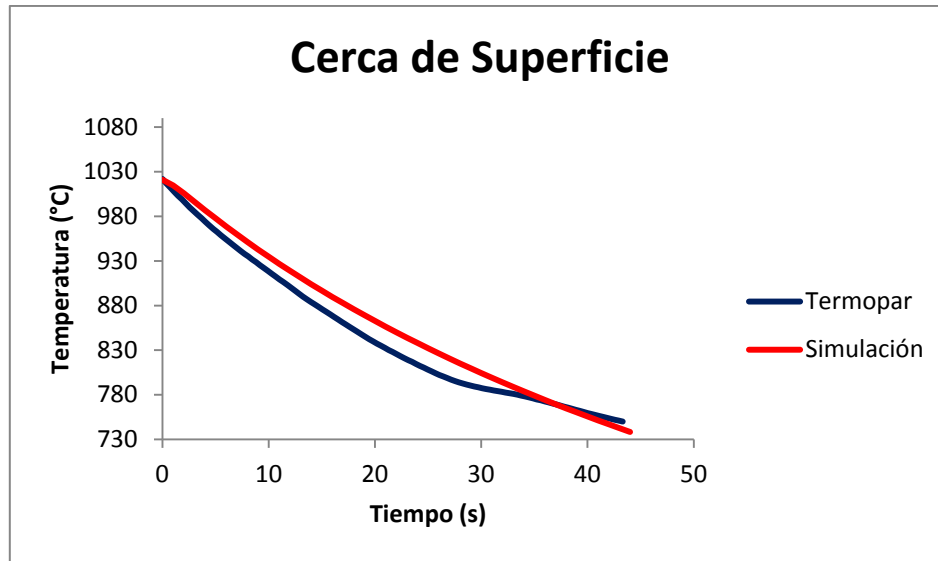


Figura 7.58 - Comparación del experimento físico y simulación de enfriamiento en la superficie

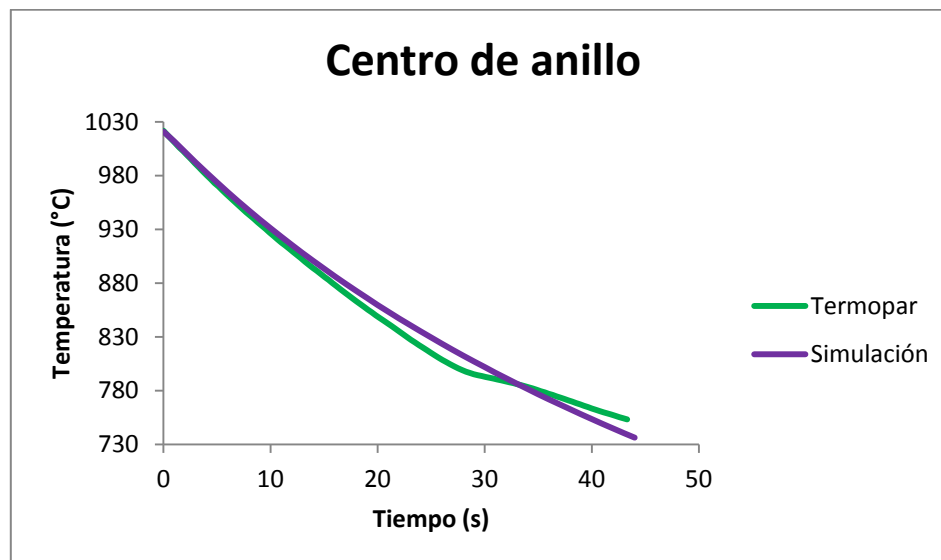


Figura 7.59 - Comparación del experimento físico y simulación de enfriamiento en el interior del anillo

7.6.2 Coeficiente de transferencia térmica a herramientas

El calor que absorbe la herramienta fría de un anillo caliente también fue calculado mediante la simulación. Se encontró que el valor del coeficiente (en el paquete llamado *Thermal Conductance*) que mejor representó el fenómeno de enfriamiento presentado en 7.3.2 fue de **15 W/m²-K**.

La grafica 7.23 compara las temperaturas medidas experimentalmente y las obtenidas por la simulación con el coeficiente mencionado.

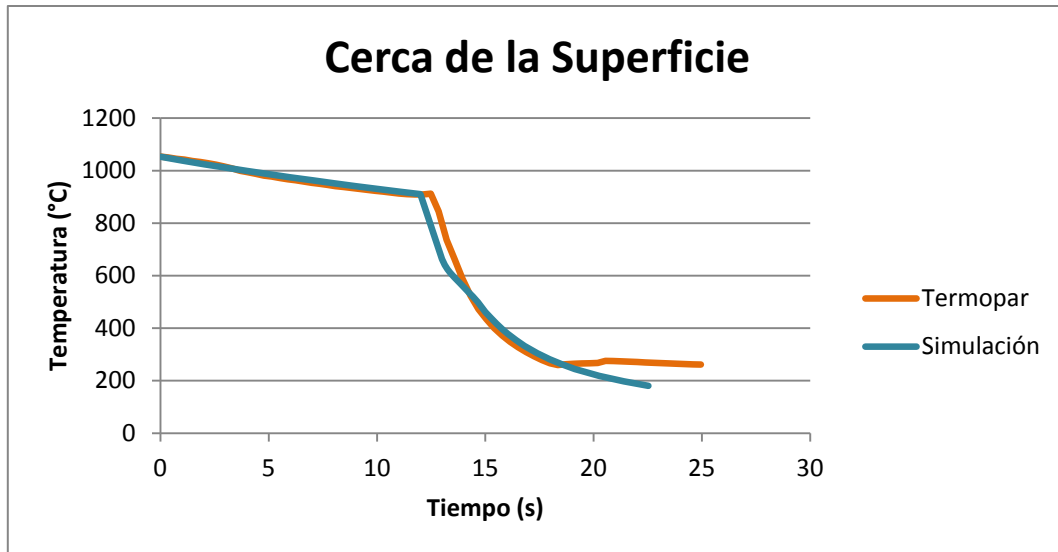


Figura 7.60 - Comparación del experimento físico y simulación de enfriamiento en la superficie

Capítulo 8

Discusión

8.1 Introducción

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos de la experimentación realizada. En el apartado 8.2 se muestra el procedimiento para elegir los coeficientes de transferencia de calor al aire y al contacto metal - metal. Después se construyen las curvas de calibración finales en el apartado 8.3. Con dichas curvas se obtuvieron los coeficientes de fricción para los sistemas estudiados en la sección 8.4. Por último, en el apartado 8.5 se presenta el estudio de la sensibilidad del ensayo a distintas variables.

8.2 Simulación de coeficiente de transferencia térmica

Los enfriamientos medidos experimentalmente fueron simulados por medio del paquete Abaqus con distintos coeficientes de transferencia de calor hasta encontrar el que más representó el experimento físico.

8.2.1 Simulación de coeficiente de convección

En las figuras 7.21 y 7.22 se presenta la gráfica del enfriamiento del anillo en los dos puntos seleccionados, así como el enfriamiento simulado a distintos coeficientes de convección. Es posible observar que los datos experimentales y los del modelo tienen una buena aproximación en el intervalo de enfriamiento desde 1020°C hasta 740°C.

El coeficiente de convección usado en la simulación se obtuvo mediante prueba y error, por lo que este valor se debe de considerar solo como una aproximación. Además, es necesario recordar que la medición del cambio de temperatura en una pieza depende de factores como la temperatura ambiente, humedad y flujo del aire, por lo que, para lo fines de esta investigación, obtener una aproximación es suficiente.

Las gráficas 8.1 y 8.2 muestran la simulación del enfriamiento en dos puntos de la pieza a distintos coeficientes de convección así como la medición experimental. Se eligió el coeficiente de $0.005 \text{ mW/mm}^2\text{-K}$ por ser el que mejor se aproxima en los primeros 40 segundos. El coeficiente de $0.015 \text{ mW/mm}^2\text{-K}$ podría ser también una buena aproximación pero sólo hasta valores antes de los 30 segundos.

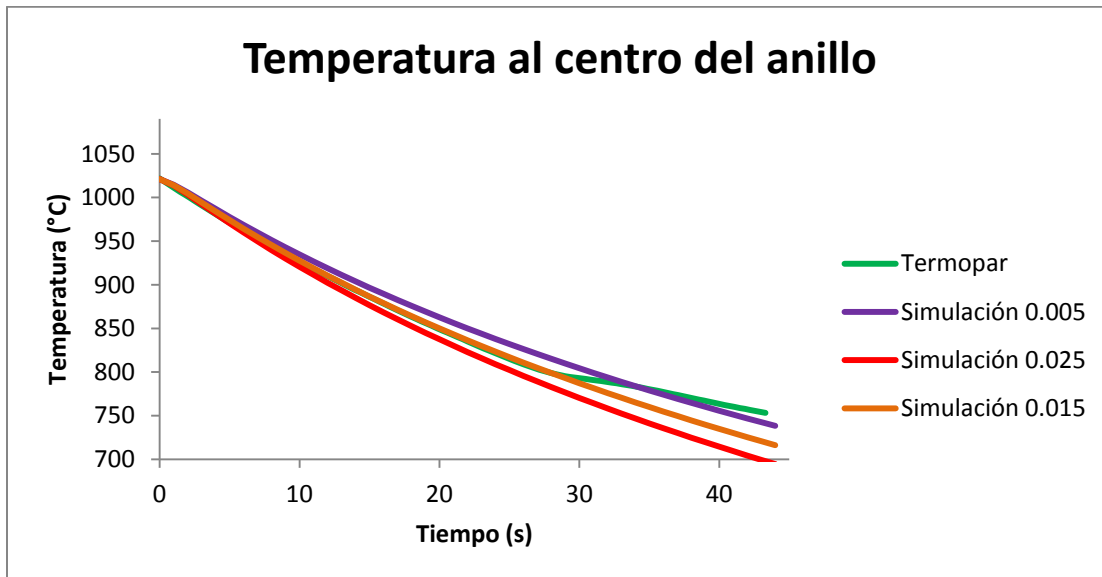


Figura 8.1 - Comparación de enfriamiento a distintos coeficientes de convección con medición experimental. Temperatura al centro del anillo.

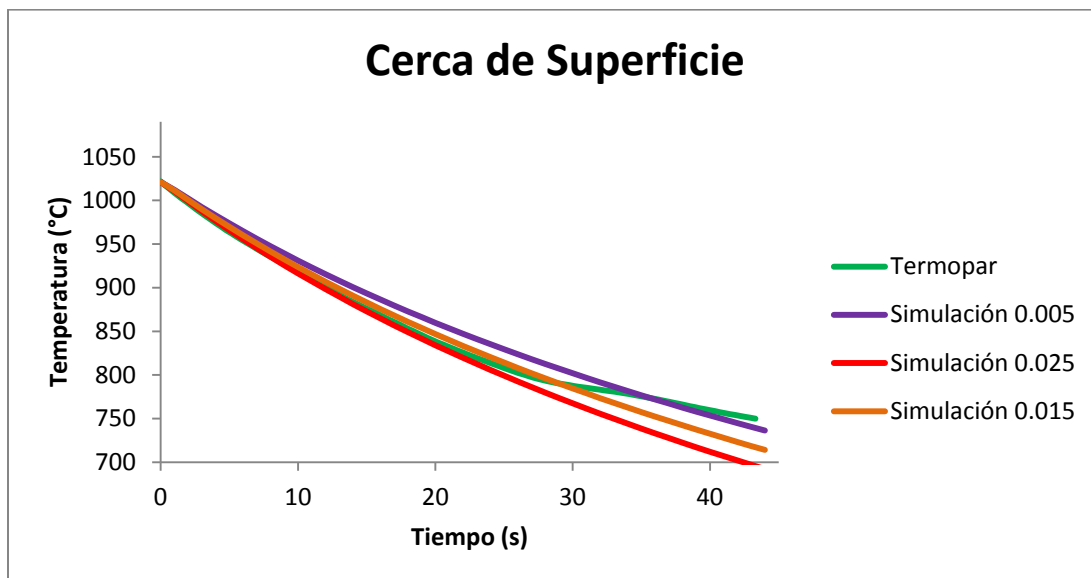


Figura 8.2 - Comparación de enfriamiento a distintos coeficientes de convección con medición experimental. Temperatura cerca de la superficie del anillo.

Es importante notar que el coeficiente obtenido sólo funciona para el rango de temperaturas graficado. Por debajo de los 740°C comienza a tener una desviación importante respecto a los resultados obtenidos experimentalmente, por lo que parece ser que 740°C es la temperatura de transformación para este acero y a esta velocidad de enfriamiento.

8.2.2 Simulación de coeficiente de transferencia térmica entre anillo y herramienta

En la figura 7.23 se muestra el proceso de enfriamiento de los especímenes medido experimentalmente contra el simulado con el paquete Abaqus usando varios coeficientes de transferencia térmica. Igual que en la sección anterior, ese coeficiente fue encontrado realizando varias simulaciones con distintos coeficientes hasta encontrar el que más se aproxime.

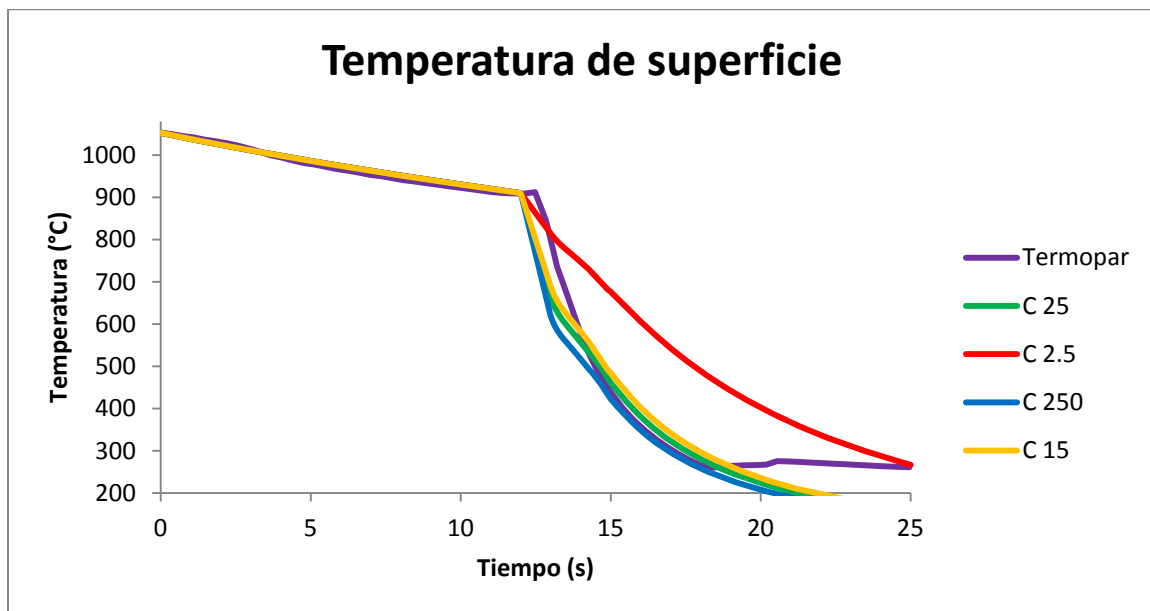


Figura 8.3 - Comparación de enfriamiento a distintos coeficientes de transferencia térmica con medición experimental. Temperatura cerca de la superficie del anillo.

En la figura 8.3 se observan los distintos comportamientos del enfriamiento a distintos valores de conductividad térmica entre la pieza y la herramienta. Se observa que los coeficientes de transferencia térmica altos (mayores de 15

mW/mm-K) casi siguen el mismo comportamiento, por lo que se eligió el de 15 mW/mm-K.

La desviación de resultados que se presenta al final del gráfico no representa un problema experimental, ya que el ensayo de compresión dura poco tiempo (entre 2 y 4 segundos) desde que se coloca la probeta hasta que ésta se comprime.

8.3 Obtención de las curvas de calibración

Con los coeficientes de transferencia de calor que fueron obtenidos se completaron todos los datos necesarios para realizar una simulación más real del ensayo de compresión de anillos. A manera de resumen, en la tabla 8.1 se enlistan los valores de las propiedades que se alimentaron al paquete Abaqus.

	Anillo	Acero Alta Velocidad	Hierro Blanco
Conductividad	Sección 6.4.1	17.5 mW/mm-K	18 mW/mm-K
Densidad	Sección 6.4.1	7.85E-09 ton/mm ³	7.85E-09 ton/mm ³
Módulo de Young	1.95E+05 MPa	2.05E+05 MPa	2.15E+05 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.3
Propiedades plásticas	Anexo x		
Calor específico	Sección 6.4.1	5.20E+8 mJ/ton-K	4.70E+8 mJ/ton-K
Coefficiente de convección	0.005 mW/mm ² -K		
Coefficiente de emisividad	0.8		
Conductancia	15 mW/mm-K		
Temperatura	800 °C	23 °C	23 °C

Tabla 8.1 - Resumen de propiedades usadas en la simulación

Con cada paso (*step*) teniendo una duración de (tabla 8.2):

Tiempo (s)	
Enfriamiento al aire	5
Conducción de calor a la herramienta	2
Compresión	1

Tabla 8.2 - Tiempo de duración de cada paso

Se crearon curvas de calibración para cada uno de los materiales con los cuales se fabrican las herramientas usadas para deformar el acero (acero de alta velocidad y hierro blanco alto en cromo). Las curvas de calibración para ambos materiales parecen ser idénticas pero no lo son. Existen diferencias mínimas debido a las distintas propiedades elásticas del material de compresión.

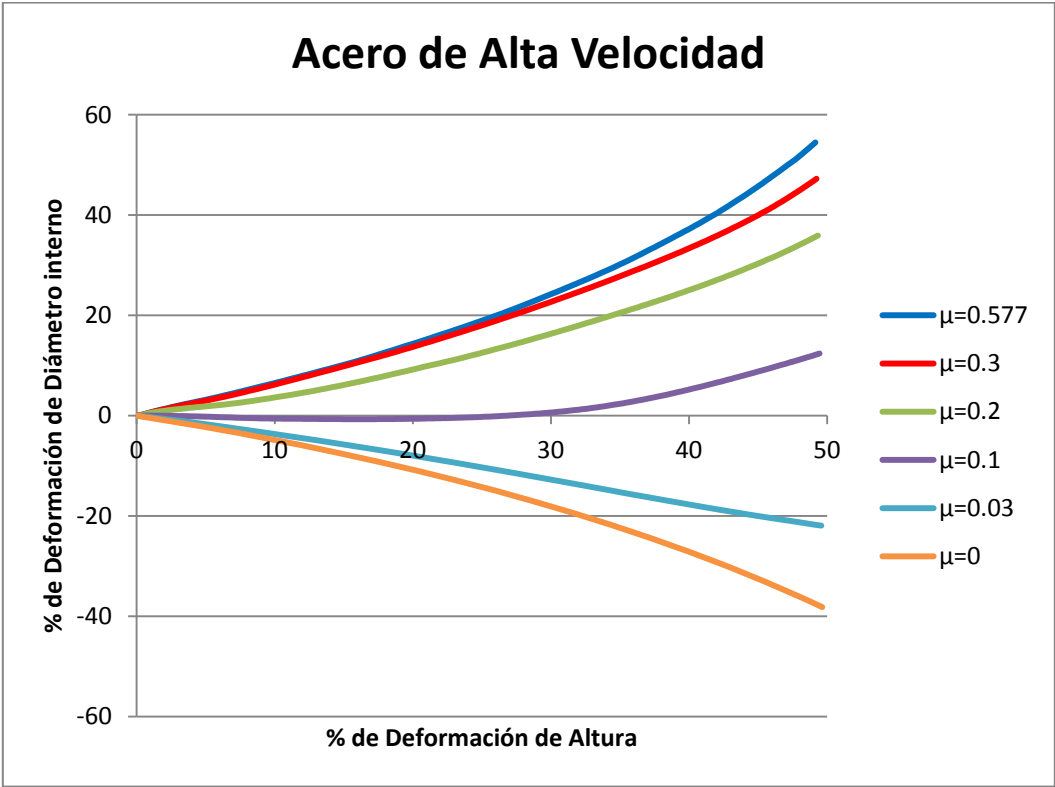


Figura 8.4 - Curva de Calibración del Acero de Alta Velocidad

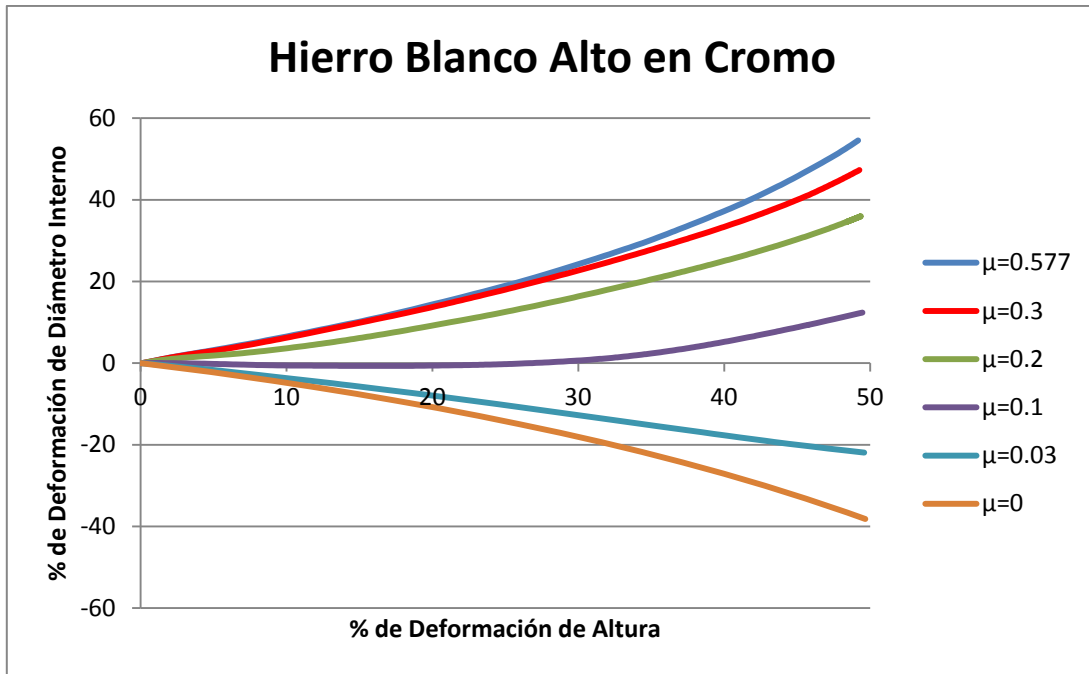


Figura 8.5 - Curva de Calibración del Hierro Blanco Alto en Cromo

Aún con estas diferencias en las propiedades de los materiales de compresión, parece que se podría usar una misma curva de calibración para los dos materiales.

8.4 Obtención de coeficiente de fricción

Se graficaron las mediciones obtenidas experimentalmente en los ensayos de compresión de anillos dentro de las curvas de calibración para obtener el coeficiente de fricción de cada sistema.

8.4.1 Coeficiente de fricción del sistema Anillo-Acero de Alta Velocidad

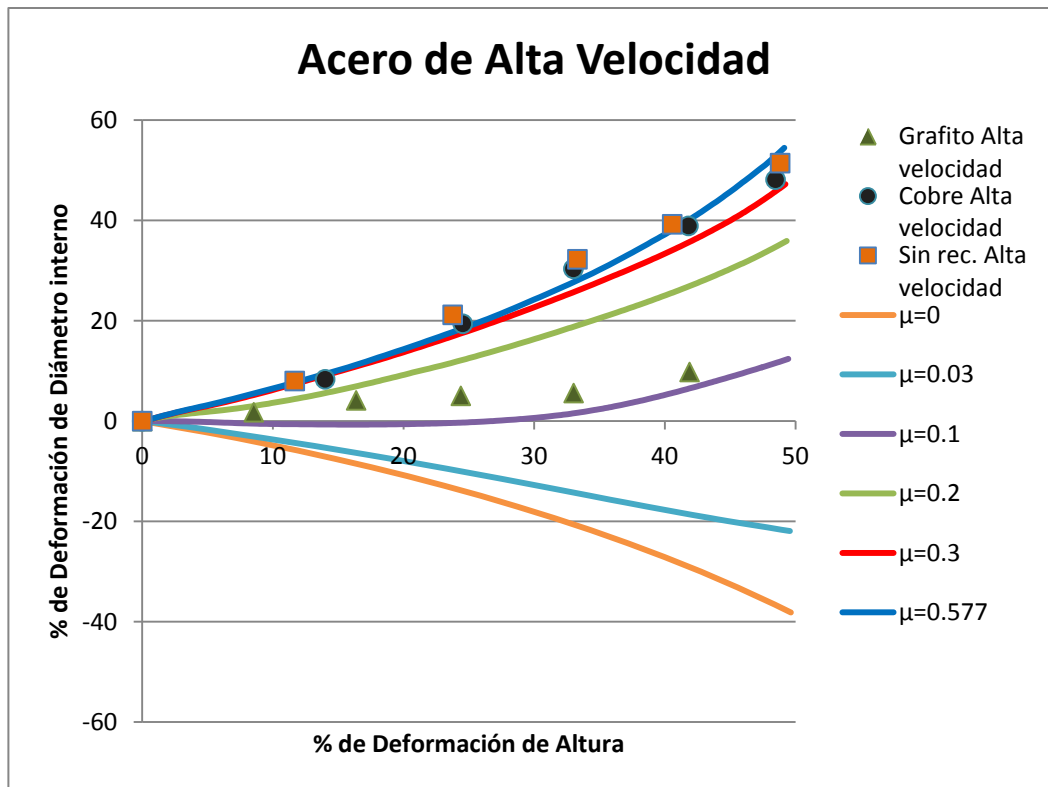


Figura 8.6 - Coeficientes de fricción del sistema anillo - acero de alta velocidad

De la figura 8.6 se puede notar que el anillo recubierto de grafito obtuvo un coeficiente de fricción menor que los anillos sin recubrimiento y los anillos cobrizados. De ahí se puede inferir que el grafito actuó como lubricante por lo que no puede ser usado como medio para prevenir la oxidación del material pues interfiere con la medición del coeficiente de fricción, contrario a lo que sucede con el recubrimiento de cobre que no altera el resultado de la medición de la fricción, por lo que sí puede ser usado para tal fin.

También se observa que los anillos sin recubrimiento tuvieron un coeficiente de fricción ligeramente mayor a los anillos recubiertos con cobre. Aún así, éstos dos estuvieron bajo fricción adherente al ser comprimidos.

Entonces, de acuerdo a la curva de calibración, los coeficientes de fricción para cada sistema quedan así:

Acero de Alta Velocidad	
Grafito	$\mu=0.12$
Cobre	$\mu=0.40$
Sin recubrimiento	$\mu=0.41$

Tabla 8.3 - Coeficientes de fricción medidos del acero de alta velocidad

8.4.2 Coeficiente de fricción del sistema Anillo-Hierro Blanco Alto en Cromo

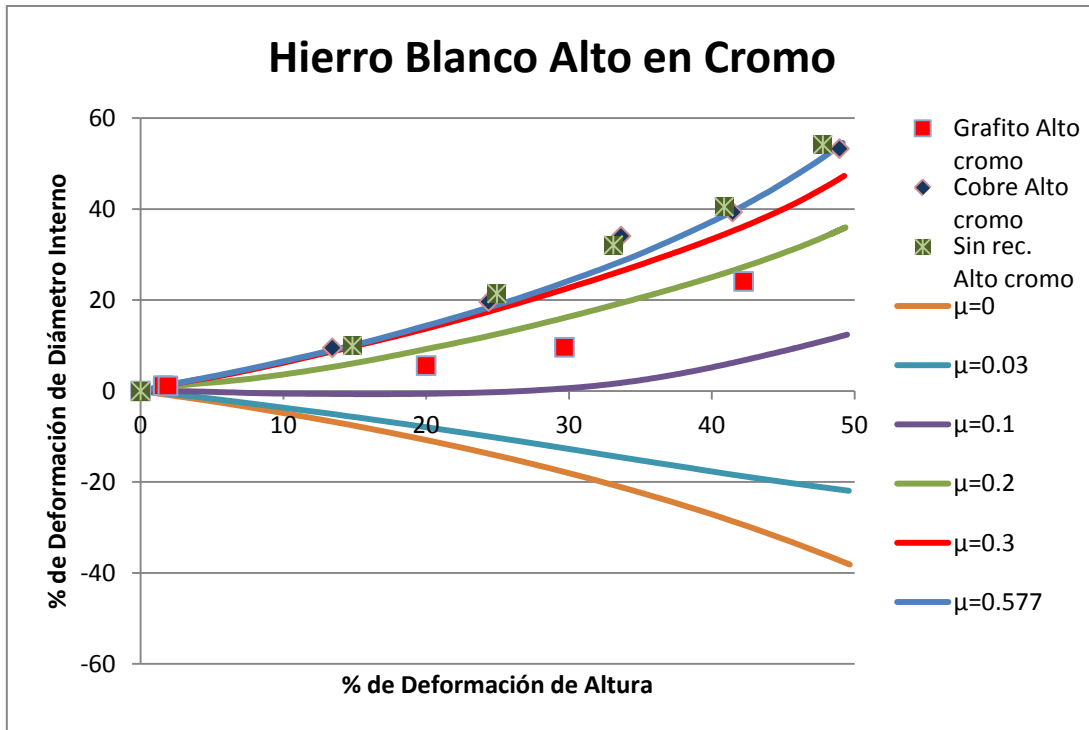


Figura 8.7 - Coeficientes de fricción del sistema anillo - hierro blanco alto en cromo

El comportamiento del sistema anillo-hierro blanco alto en cromo es muy similar al obtenido con el acero de alta velocidad. El grafito lubricó el sistema, y el anillo sin recubrimiento es el que posee el coeficiente de fricción mayor.

Según la curva de calibración construida, se midieron los coeficientes de fricción (tabla 8.4).

Hierro Blanco Alto en Cromo	
Grafito	$\mu=0.18$
Cobre	$\mu=0.55$
Sin recubrimiento	$\mu=0.57$

Tabla 8.4 - Coeficientes de fricción medidos del hierro blanco alto en cromo

8.4.3 Discusión sobre resultados del coeficiente de fricción

Sobre los dos recubrimientos usados para proteger de la oxidación se concluye que el grafito no es buena opción ya que interfiere en la compresión de anillos lubricando el sistema. En cuanto que el cobre ayuda en evitar la formación de óxidos de alta temperatura.

De acuerdo a la experiencia de la industria de laminación en caliente, se sabe que los rodillos hechos con el hierro blanco alto en cromo presentan menos problemas de fricción alta que los rodillos fabricados con acero de alta velocidad. Sin embargo, los resultados obtenidos indican lo contrario.

Una de las razones por la cual se obtuvo un coeficiente de fricción mayor en el hierro blanco puede ser debida a la porosidad que presentaban las superficies de los platos de compresión. La porosidad afectó el flujo del metal al ser comprimido, por lo que las mediciones de diámetro interno y altura probablemente son erróneas. Otra razón, quizá más importante, es que al estar cerca los dos materiales de la fricción adherente se hace muy difícil ver una diferencia.

Por último, la diferencia en el coeficiente de fricción en los rodillos de laminación en caliente de cada material se ve conforme pasa el tiempo de trabajo de los mismos mientras que el ensayo que se realizó en este trabajo fue con materiales “nuevos”. Se infiere que el crecimiento de óxidos de alta temperatura conforme el material está en operación disminuye el coeficiente de fricción, es decir, el óxido actuaría como lubricante. Mediciones del coeficiente de fricción con diferentes grados de oxidación en la superficie de las placas de compresión podrían demostrar este fenómeno y después podría explicarse el por qué de las diferencias de coeficiente de fricción entre los dos materiales.

8.5 Sensibilidad del ensayo de compresión de anillos en caliente

Se realizaron múltiples simulaciones del ensayo con distintas variaciones en las variables para conocer cuáles de ellas son más críticas e influyentes en la construcción de curvas de calibración y, por tanto, también en el desarrollo del ensayo.

En todas las siguientes curvas de calibración se usan los datos mencionados en la tabla 8.1 con excepción de la variable que se menciona en cada apartado.

8.5.1 Variación de tiempo de enfriamiento en aire

En la gráfica 8.8 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de compresión de anillos al variar el tiempo de duración del enfriamiento en aire. Se observa que este tiempo de enfriamiento influye poco en la construcción de curvas de calibración. Este fenómeno se debe a que la conductividad térmica del acero es muy alta y el anillo se enfría casi homogéneamente, con solo unos grados de diferencia entre la superficie y el interior del mismo. La figura 8.9 muestra la distribución de temperaturas en el anillo al finalizar el enfriamiento en aire de 5 segundos.

En la figura 8.10 se observa la distribución de temperaturas después de un enfriamiento de 60 segundos. La diferencia máxima de temperaturas es de sólo 5°C. Entonces, para este acero el tiempo que se tarda en sacar una probeta caliente del horno para ensayarla en la máquina de compresión no es relevante en la medición del coeficiente de fricción. Evidentemente si la pieza se enfría más, la fuerza usada para comprimirla será mayor, pero eso no influye en el ensayo de compresión de anillos.

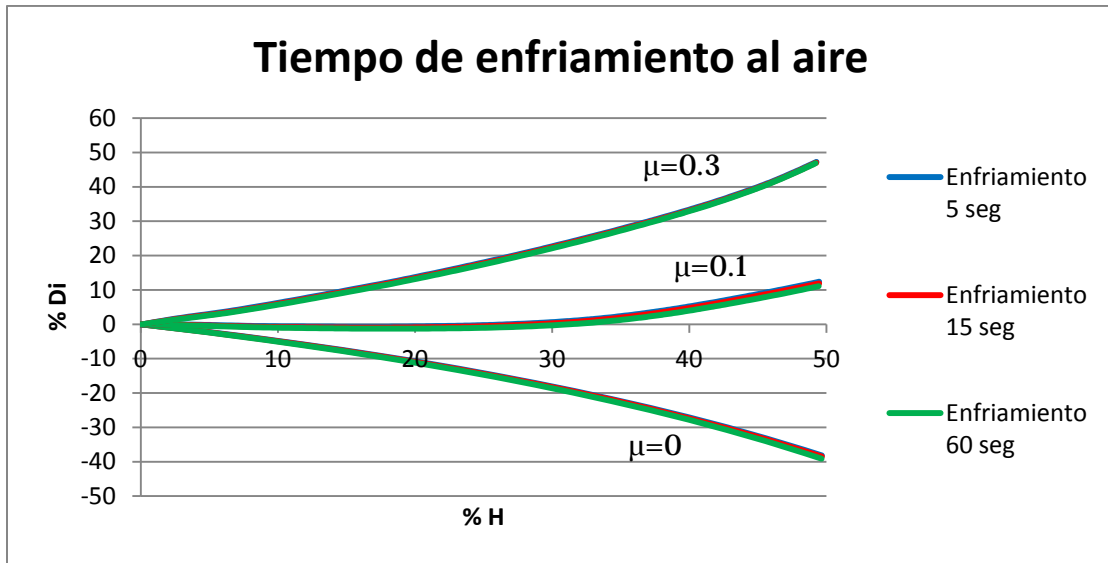


Figura 8.8 - Sensibilidad a tiempo de enfriamiento en aire

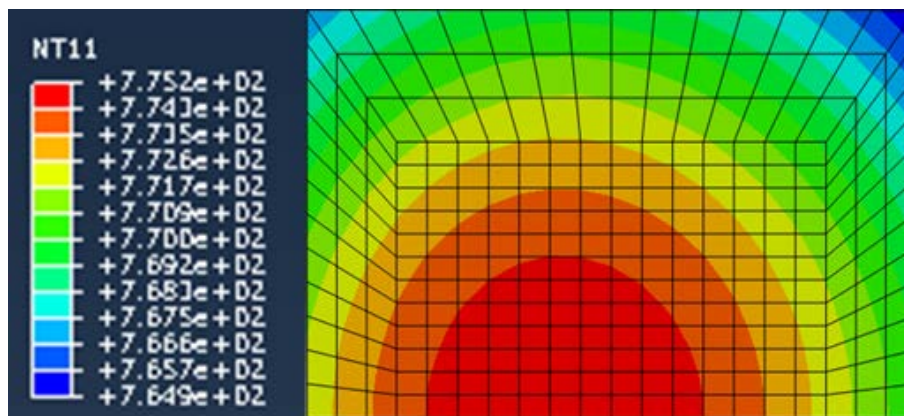


Figura 8.9 – Distribución de temperaturas en anillo después de 5 segundos de enfriamiento

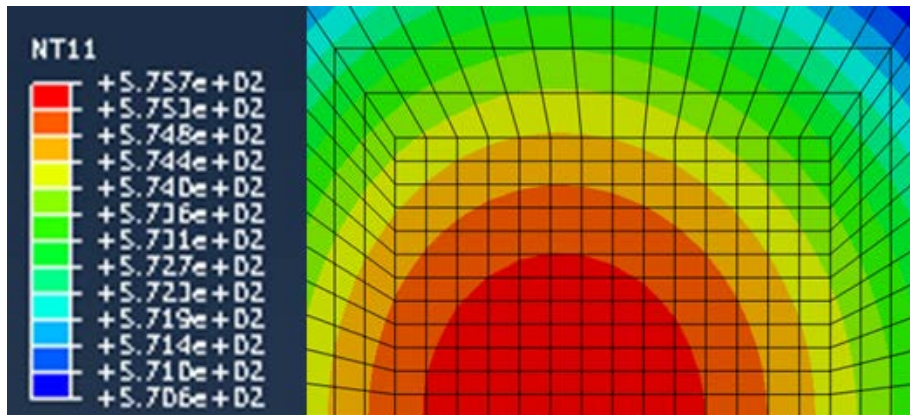


Figura 8.10 - Distribución de temperaturas en anillo después de 60 segundos de enfriamiento

8.5.2 Variación de tiempo de conducción de transferencia térmica

Cuando se varía la duración del paso (*step*) durante el cual se realiza la transferencia de calor del anillo caliente a la herramienta fría, se obtiene la gráfica de la figura 8.11.

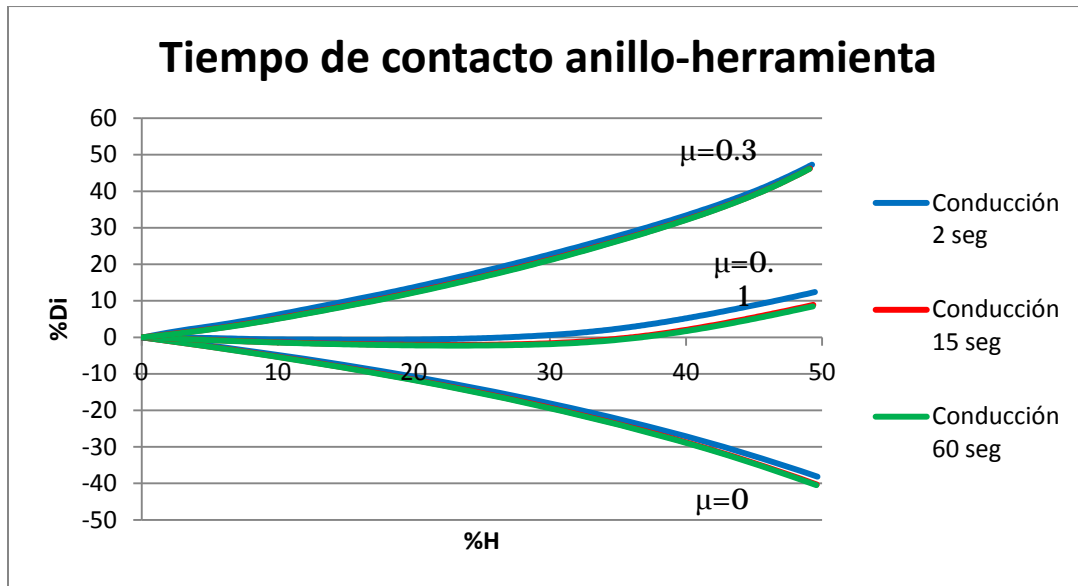


Figura 8.11 - Sensibilidad a tiempo de transferencia térmica

Se observa que en los tiempos de 15 y 60 segundos se obtienen resultados muy similares, mientras que para la duración de transferencia de calor de dos segundos se tiene un desplazamiento en la curva hacia arriba.

Cuando hay poco tiempo para que el calor se transfiera a la herramienta fría se presenta una diferencia de temperaturas entre la parte del anillo en contacto con la superficie y el centro que no está en contacto. De esa manera, al momento de comprimir, se tendrá un gradiente de temperatura dentro del anillo que hará que el metal fluya diferente dependiendo de la temperatura, obteniendo diferentes deformaciones en el diámetro interno y externo.

Cuando el tiempo de transferencia térmica es más largo, las temperaturas se estabilizan por lo que el material fluye casi uniformemente.

8.5.3 Variación de tiempo de compresión

También se estudió la sensibilidad al tiempo que tardaba la compresión del anillo. Este tiempo es importante porque durante la compresión también se lleva a cabo transferencia de calor, por lo que las temperaturas varían dependiendo del tiempo que tarde el paso de compresión.

En la figura 8.12 se nota que este tiempo tiene una influencia en la construcción de las curvas de calibración. La curva usando el tiempo de un segundo se parece a la de 0.5s, mientras que la de 10s se desplaza hacia abajo.

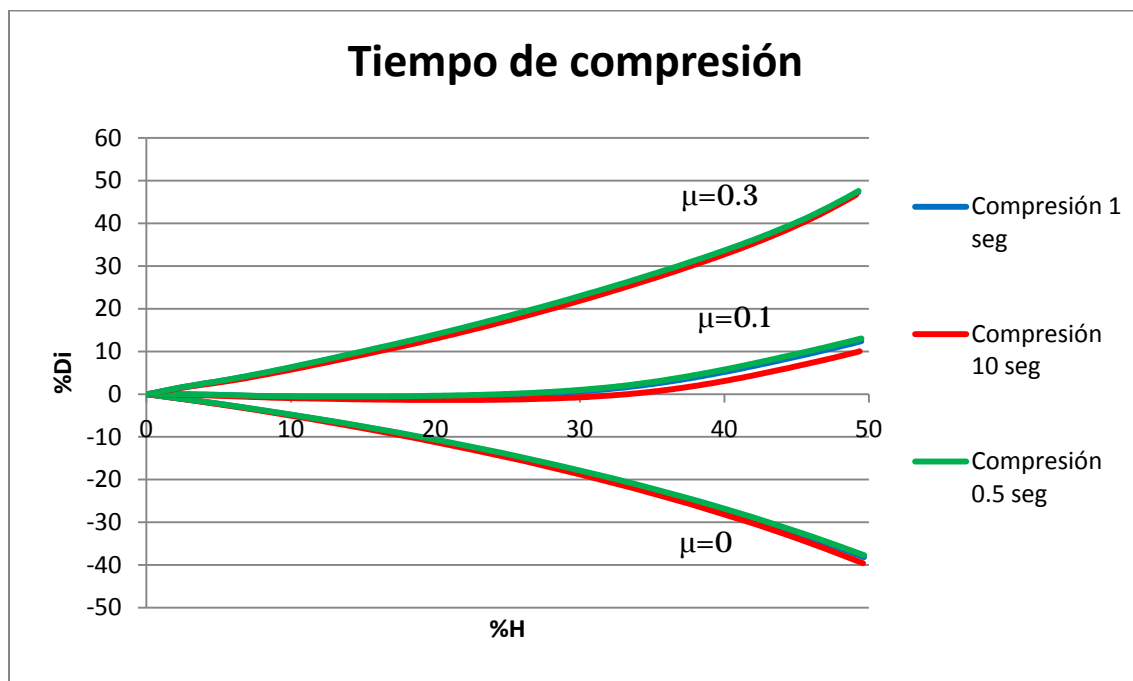


Figura 8.12 - Sensibilidad a tiempo de compresión

En la figura 8.13 se muestra la distribución de temperaturas al final de un ensayo de compresión con un segundo de duración. Se observa que la diferencia de temperaturas máxima en el anillo es de más de 200°C.

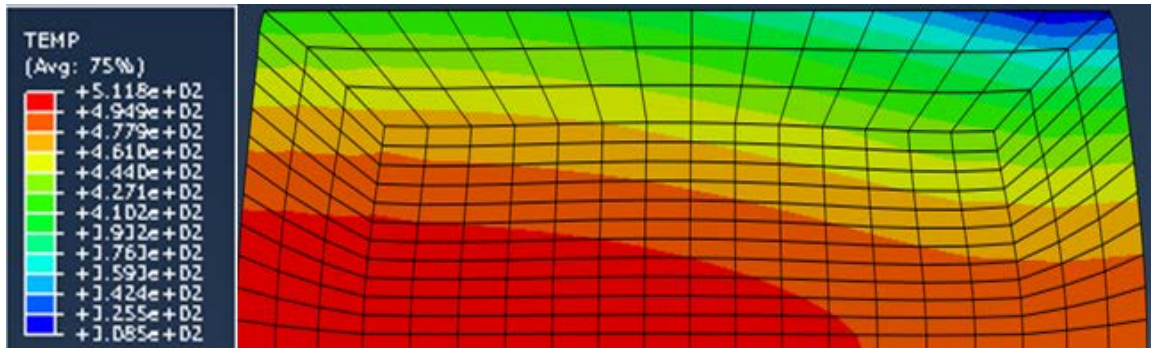


Figura 8.13 - Distribución de temperaturas después de una compresión de 1 segundo y fricción nula

En cambio, al finalizar la compresión con una duración de 10 segundos, se tiene una diferencia máxima de temperaturas de casi 60°C. Como se dijo anteriormente, la diferencia de temperatura en las distintas partes del anillo hacen que el material fluya distinto cuando se realiza la compresión.

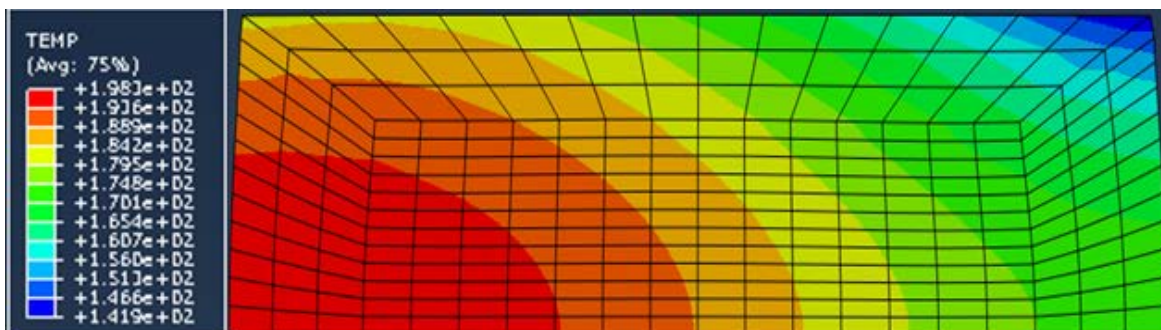


Figura 8.14 - Distribución de temperaturas después de una compresión de 10 segundos y fricción nula

8.5.4 Variación de la temperatura inicial del anillo

La temperatura inicial del anillo tiene gran influencia en la construcción de las curvas. Se nota que conforme la temperatura aumenta la curva se desplaza hacia arriba.

Se infiere que, al igual que en los casos pasados, la diferencia de temperaturas dentro del material hace que el material fluya diferente dependiendo de la temperatura, sabiendo que a mayor temperatura hay más flujo de metal.

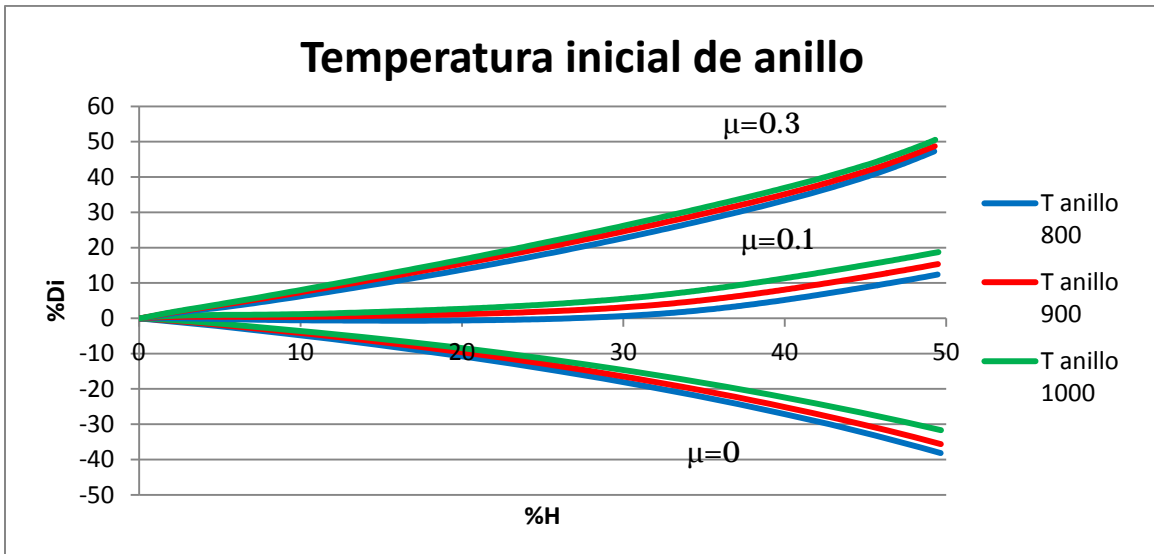


Figura 8.15 - Sensibilidad a la temperatura inicial del anillo

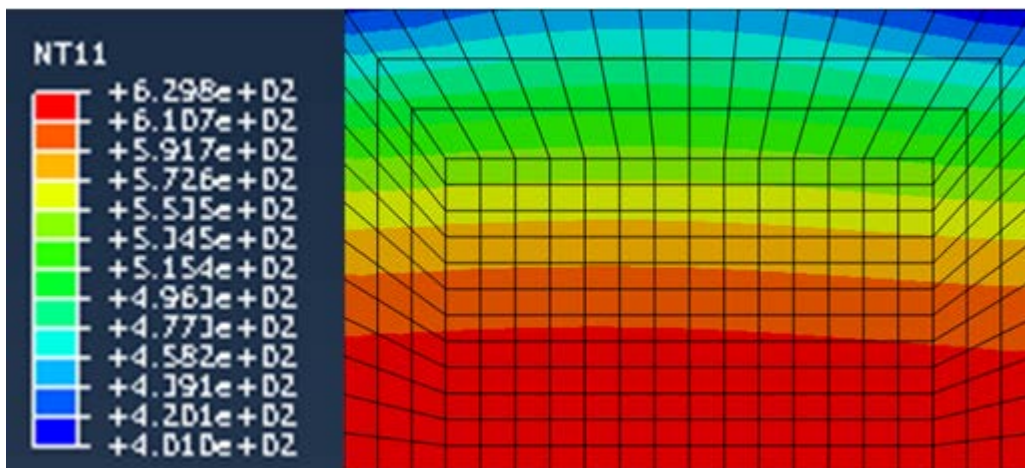


Figura 8.16 - Distribución de temperaturas antes de comenzar compresión, con temperatura inicial de 800°C

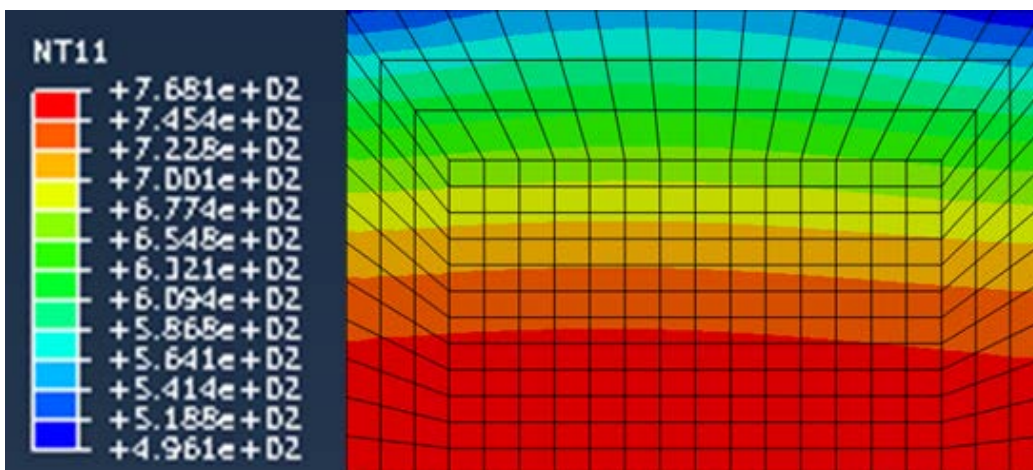


Figura 8.17 - Distribución de temperaturas antes de comenzar compresión, con temperatura inicial de 1000°C

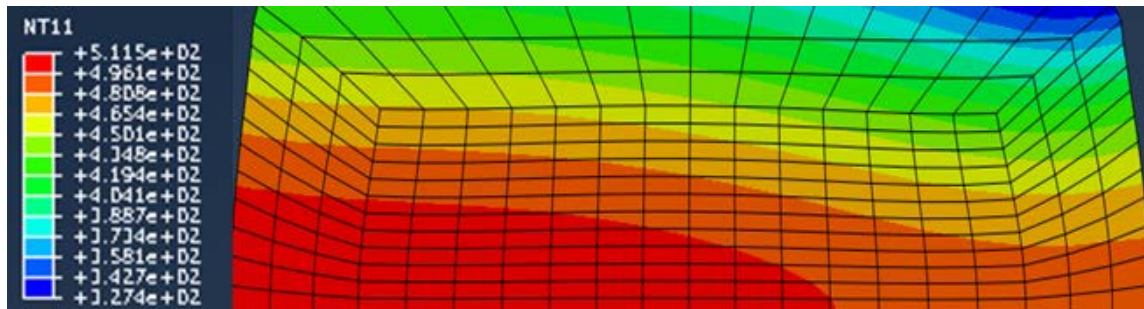


Figura 8.18 - Distribución de temperaturas después de compresión, con temperatura inicial de 800°C, y fricción nula

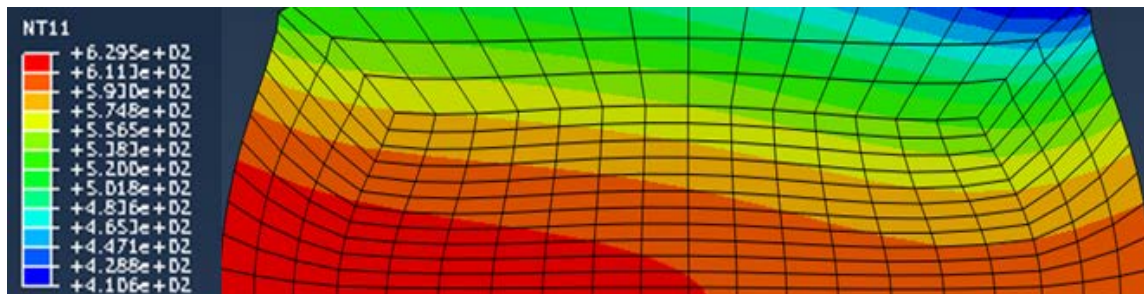


Figura 8.19 - Distribución de temperaturas después de compresión, con temperatura inicial de 1000°C, y fricción nula

Las imágenes 8.16 a 8.19 muestran la distribución de temperaturas de los anillos antes y después de ser comprimidos a diferentes temperaturas iniciales del anillo. Se aprecia en la imagen 8.19 que la zona más caliente (de rojo) ha tenido mayor flujo de metal debido a la baja resistencia mecánica a esa temperatura.

Estos gráficos comprueban que un mismo material con el mismo coeficiente de fricción, en este caso igual a cero, tendrán geometrías distintas al ser comprimidas a temperaturas distintas y, como las curvas de calibración se construyen midiendo las deformaciones en el diámetro interno y la altura, por lo tanto también tendrán curvas de calibración específicas para cada temperatura. Lo anterior también se puede ver comparando los diámetros internos (esquina izquierda inferior) de las dos simulaciones, observando que el diámetro interno en el ensayo a 1000°C disminuye más que el de 800°C.

8.5.5 Variación de la temperatura inicial de la herramienta

La temperatura inicial de la herramienta de compresión no parece afectar la construcción de las curvas de calibración, según la figura 8.20. Las simulaciones

realizadas con la temperatura de la placa de compresión desde la temperatura ambiente hasta 400°C mostraron el mismo comportamiento.

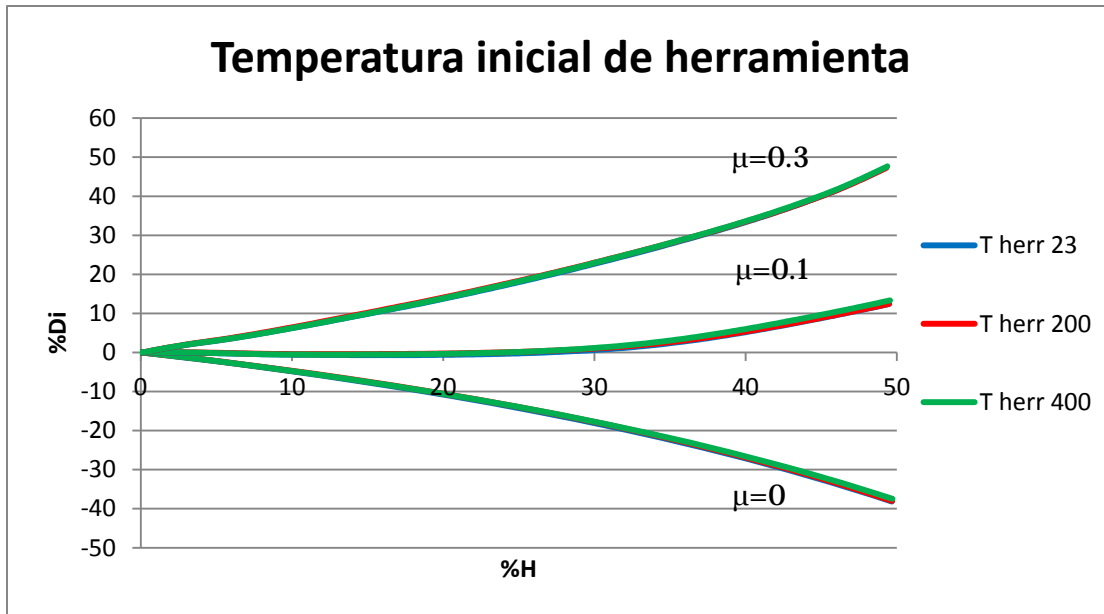


Figura 8.20 - Sensibilidad a la temperatura inicial de la herramienta de compresión

8.5.6 Variación de coeficiente de convección

De acuerdo a la figura 8.21 tampoco influye el coeficiente de convección a la construcción de las curvas de calibración. Este efecto es similar al del tiempo de enfriamiento al aire, mientras se tenga una conductividad térmica alta, la temperatura será casi homogénea en todo el cuerpo de la probeta.

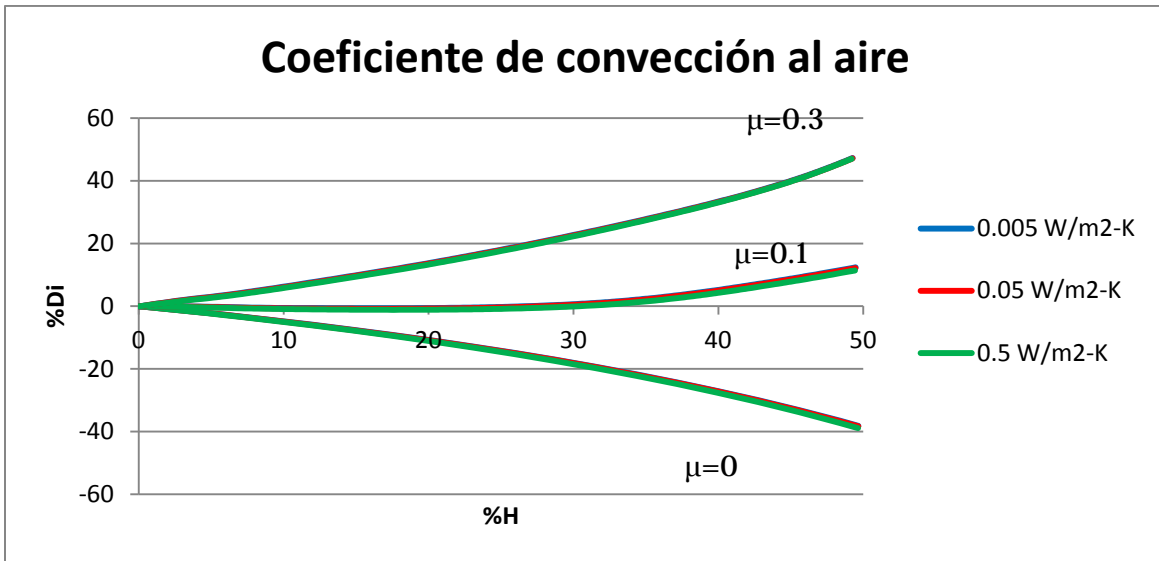


Figura 8.21 - Sensibilidad al coeficiente de convección

8.5.7 Variación del coeficiente de transferencia de calor entre herramienta-anillo

El efecto del coeficiente de transferencia de calor entre la herramienta y el anillo es también importante en la obtención de las curvas de calibración. Un coeficiente de transferencia muy bajo desplaza la curva hacia abajo, según la figura 8.22.

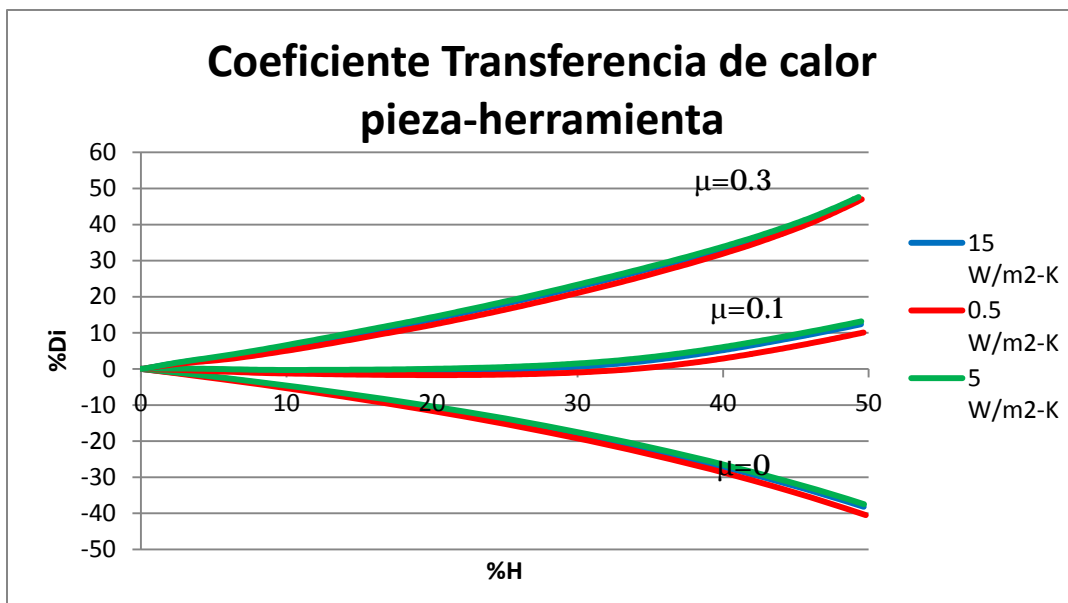


Figura 8.22 - Sensibilidad al coeficiente de transferencia de calor

8.5.8 Variación de la conductividad térmica

En el caso de un material distinto del acero o un acero con diferente conductividad del aquí estudiado se obtienen las curvas de la figura 8.23. Es evidente la influencia de la conductividad térmica en la elaboración de las curvas de calibración.

Para la construcción de curvas de calibración a altas temperaturas en materiales como las superaleaciones de titanio o acero inoxidable es importante tomar en cuenta la conductividad térmica, ya que dependen fuertemente de ella. Además, una baja conductividad térmica del material, hará que las otras variables, como el coeficiente de convección y de transferencia de calor con la herramienta, también influyan en la construcción de las curvas de calibración.

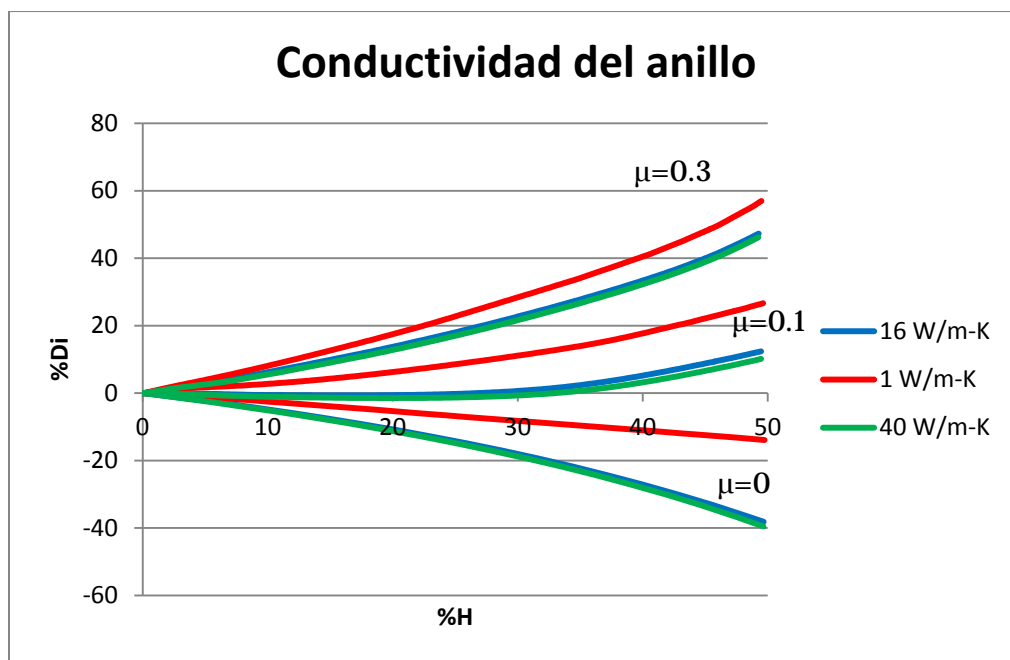


Figura 8.23 - Sensibilidad a la conductividad térmica

8.6 Influencia de variables en el ensayo de compresión de anillos en caliente

De acuerdo a las pruebas de sensibilidad que se realizaron en el paquete Abaqus se puede decir que las variables más importantes a cuidar durante el ensayo de compresión de anillos en caliente son la temperatura inicial del anillo y

la conductividad del material (en el caso de que no sea un material con alta conductividad). En menor medida también influye el coeficiente de transferencia térmica entre el anillo y la herramienta.

Como regla general se establece que el cambio en la geometría de los anillos al ser comprimidos va directamente relacionado con la distribución de temperaturas dentro del anillo, siendo que las partes a mayor temperatura fluirán con mayor facilidad a las que se encuentran a una temperatura menor.

Como el cambio en la geometría de los anillos comprimidos es la base para la construcción de curvas de calibración es importante, entonces, se debe tomar en cuenta la distribución de temperaturas en el interior del anillo por lo que debe considerarse principalmente, en el caso de este tipo de acero, la temperatura inicial del anillo y en menor medida el coeficiente de transferencia térmica entre el anillo y la herramienta.

Sin embargo, para un material con menor conductividad, como las superaleaciones de titanio o aceros inoxidable, se tendrán que considerar la mayoría de las variables, ya que la baja conductividad térmica hará que la pieza tenga una distribución de temperaturas más variada.

Capítulo 9

Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Introducción

Durante la realización del presente trabajo se obtuvieron resultados satisfactorios en la creación de la simulación en el paquete Abaqus de la prueba de compresión de anillos en caliente para la construcción de curvas de calibración de fricción.

Sin embargo, también se detectaron algunos problemas y áreas de oportunidad para mejorar el trabajo. En este capítulo se mencionan las posibles soluciones y mejoras para dichas áreas de oportunidad.

9.2 Conclusiones

En este trabajo se realizó una simulación robusta del ensayo de compresión de anillos en caliente. Del mismo trabajo se concluye que:

- No se deben usar las mismas curvas de calibración para ensayos a temperatura ambiente y a altas temperaturas.
- Las curvas de calibración para el acero al carbono cambian cuando el material se calienta inicialmente a diferentes temperaturas, por lo tanto es necesario generar un juego de curvas de calibración para cada temperatura.
- La conductividad térmica del material es una propiedad crucial en la construcción de curvas de calibración cuando ésta es muy baja.
- Es posible construir curvas de calibración para cualquier material desde el paquete Abaqus alimentándolo con las propiedades necesarias.
- De acuerdo al análisis de sensibilidad efectuado, el ensayo de compresión de anillos en caliente es insensible a ciertas variaciones

experimentales como el tiempo de enfriamiento al aire, al tiempo en contacto de anillo-herramienta, al coeficiente de convección, etc. Esto es para el acero al carbono estudiado.

9.3 Recomendaciones en áreas de oportunidad

Se presentaron varios problemas durante la realización de este trabajo que pudieron evitarse, como la porosidad que se tenía en los platos del hierro blanco alto en cromo.

También se detectó que el ensayo de compresión de anillos y la simulación en Abaqus podían optimizarse para ahorrar tiempo, material y dinero.

9.3.1 Homogeneidad en platos de compresión

Como se mencionó en el apartado 7.2.1.2, los platos de compresión de hierro blanco alto en cromo presentaron una porosidad al centro del mismo, lo cual provocó posibles resultados falsos en la obtención del coeficiente de fricción con ese material. Además la rugosidad de los platos (tablas 5.6 y 5.7) tampoco era similar, lo cual hace difícil comparar la fricción para cada par de platos.

Se recomienda maquinar platos de compresión homogéneos sin defectos en la superficie o en su interior. También deben realizarse rectificaciones en la superficie de los mismos para tener superficies similares. En caso de que se vayan a comparar dos o más materiales, se recomienda que las rugosidades sean similares.

9.3.2 Mejorar compresión de anillos

En este trabajo se comprimieron alrededor de 90 anillos de acero al carbono para obtener el coeficiente de fricción de seis sistemas. Se recomienda optimizar el proceso de obtención de los porcentajes de deformación para ahorrar material y tiempo.

Marcon y compañía (34) muestran métodos para medir las deformaciones en altura y en el diámetro externo (pudiendo calcular el diámetro interno después) con la sola compresión de un anillo. Su método aplica para ensayos de compresión en frío no apto para ensayos en caliente pero se puede desarrollar un método para tal fin.

9.3.3 Optimización de simulación

Para la obtención de las curvas de calibración se realizaron decenas o cientos de simulaciones. El cálculo de cada simulación lleva un tiempo desde un minuto hasta 10 minutos. Es posible automatizar los trabajos para que el código realice todos los cálculos por él mismo y al final sólo recabar todos los datos obtenidos.

9.4 Trabajo futuro

Siguiendo la misma línea de investigación se recomienda:

- Realizar ensayos de compresión en materiales con los cuales se fabrican los rodillos de laminación (como los aquí estudiados) con distintos grados de oxidación. Con esto se podrá conocer la evolución del coeficiente de fricción con el paso del tiempo de trabajo.
- Realizar el ensayo con distintos lubricantes líquidos y sólidos.

Bibliografía

1. *World Steel Association World Crude Steel Production*. 2007.
2. *Control of machines with friction*. **Armstrong-Hélouvy, Brian**. s.l. : Springer, 1991, pág. 10.
3. **Dowson, Duncan**. *History of Tribology*. s.l. : Professional Engineering Publishing, 1997.
4. **van Beek, Anton**. History of Science Friction. [En línea] tribology-abc.com.
5. *A new method of cold extrusion*. **M., Kunogi**. 50, Tokyo : s.n., 1956, J. Sci. Research Inst., págs. 215-246.
6. *A method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals Under Condition of Bulk Plastic Deformation*. **Male A.T., Cockcroft M.G.** 93, 1964-65, J. Inst. Met., págs. 38-46.
7. *Forging of Hollow Disks*. **Avitzur, B.** 9, 1964, Isr. J. Technol, págs. 295 - 304.
8. **C.H., Lee, Altan T.** 1972, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, pág. 775.
9. **Sofuoglu H, Gedikli H.** 35, 2002, Tribology International, pág. 27.
10. **Robinson T, Ou H, and Armstrong, C. G.** 2004, J. Mater. Process. Technol., pág. 153.
11. *Sensitivity of Ring-Compression Test*. **Bhattacharyya D., Brown R.H.** Nueva York : The American Society of Mechanical Engineers, 1980, pág. 23.
12. **Li L.X., Peng D.S., Liu J.A., Liu Z.Q. and Jiang Y.** 102, 2000, Journal of Materials Processing, págs. 138-142.
13. **Pradeep L. Menezesa, Kishore, Satish V. Kailas.** 208, 2008, Journal of Materials Processing, pág. 372.
14. *An Analysis of the Changes in Geometry of Short Hollow Cylinder During Axial Compression*. **Hawkyard, J. B., and Johnson, W.** 9, 1967, Int. J. Mech. Sci, págs. 163–182.
15. *Variations in Friction Coefficients of Metals during Compressive Deformation*. **Male, A. T.** 1966, J. Inst. Met., Vol. 94, págs. 121–125.
16. **Domínguez Gámez, Eduardo**. *Obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas TESIS*. San Nicolás : s.n., 2003.
17. **Rodríguez, Paloma**. *Determinación de las Curvas de Calibración mediante Simulación Numérica de Compresión de Anillos TESIS*. 2004.
18. *Single-test Determination of the Friction Coefficient and Stress-strain Curve for Application in Metalforming Analyses*. **A. F. Marcon, E. Bittencourt and G. J. Creus.** 40, 2000, págs. 124-128.

19. *Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM.* **Yanchun Zhu, Weidong Zeng, Xiong Ma, Qingan Tai, Zhihua Li, Xiaoguang Li.** 44, 2011, Tribology International, págs. 2074-2080.
20. *Upper bound solutions to axisymmetric extrusion problem.* **Chen, P.C.T., Ling, F.F.** 10, 1968, Int. J. Mech. Sci., págs. 863-879.
21. *A Method for Determination of Constant and Varying Friction Factors During Ring Compression Tests.* **V. DePierre, F. Gurney.** s.l. : ASME, 1974.
22. *Analysis of metal forming process based on meshless method.* **Chen JS., Lima Roque C. , Pan C, Button S.** 80-81, 1998, Journal of Materials Processing Technology, págs. 642-646.
23. *Study on Hot Ring Compression Test of Nimonic 115 Superalloy Using Experimental Observations and 3D FEM Simulation.* **D. Shahriari, A. Amiri, and M.H. Sadeghi.** 2010, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 19, págs. 633-642.
24. *Diseño asistido por computador.* **Rojas O., Rojas L.** 2006, Diseño y tecnología.
25. *The Finite Element Method for Engineers.* **K.H. Huebner, E.A. Thornton, Ted G. Byrom.** Wiley Interscience, págs. 1-80.
26. Abaqus Theory Manual 6.11.
27. Electrodeposición de Cobre. [En línea] <http://es.scribd.com/doc/17700409/electrodeposicion-de-cobre>.
28. KOSMOS - High Speed steel. [En línea] www.mkb.be/MK-kosmos.pdf.
29. COMET - High Chromium iron. [En línea] <http://www.mkb.be/MK-comet.pdf>.
30. **Berrocal, L. Ortiz.** *Elasticidad.* Madrid : McGraw Hill, 1998.
31. **Schackelford, J. F.** *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros.* 2008.
32. **L.A., Leduc.** *Computer Simulation and Experimental Verification of Temperatures, Microstructure and Loads During Hot Rolling.* s.l. : PhD. Thesis Sheffield, 1980.
33. Emissivity Coefficients of some common Materials. [En línea] http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html.
34. *Single-test Determination of the Friction Coefficient and Stress-strain Curve for Application in Metalforming Analyses.* **A. F. Marcon, E. Bittencourt and G. J. Creus.**

Anexo I

Aproximación de Abaqus del Método del Elemento Finito

1. Introducción

En este anexo se presenta el método que usa el paquete Abaqus para resolver los sistemas de ecuaciones mediante el método del elemento finito. Se detalla desde las ecuaciones básicas del método finito, así como las ecuaciones para medir la transferencia de calor.

Este texto es una lectura más profunda del capítulo 3 del presente trabajo. Si se desea conocer más a fondo cómo Abaqus resuelve un sistema de ecuaciones por el método de elementos finitos se recomienda leer el manual de usuario de dicho paquete.

2. Notación

La notación usada en las siguientes ecuaciones se encuentra a continuación.

A^T = matriz transpuesta de la matriz A

$a \cdot b$ = producto punto de vectores o multiplicación de matrices

$a : b$ = producto escalar de dos matrices

3. Ecuaciones básicas de elemento finito

En esta sección se describen las ecuaciones básicas del análisis de desplazamiento basado en el elemento finito. La primera ecuación es la de equilibrio, escrita como el principio de trabajo virtual:

$$\int_V \sigma : \delta D \, dV = \int_S t^T \cdot \delta v \, dS + \int_V f^T \cdot \delta v \, dV$$

La parte izquierda de la ecuación (el término de trabajo virtual interno) es reemplazada por la integral sobre el volumen de referencia de la razón del trabajo virtual por el volumen de referencia definido por cualquier par conjugado de esfuerzo y deformación:

$$\int_{V^0} \tau^c : \delta \varepsilon dV^0 = \int_S t^T \cdot \delta v dS + \int_V f^T \cdot \delta v dV \quad (1)$$

Donde τ^c y ε son cualquier par conjugado del esfuerzo y deformación de un material.

El interpolador de elementos finitos se escribe de manera general como:

$$u = N_N u^N$$

Donde N_N son las funciones de interpolación que dependen del sistema de coordenadas del material y u^N son las variables de nodos.

El campo virtual δv debe ser compatible con todas las restricciones cinemáticas. Al introducir la interpolación anterior se restringe el desplazamiento para que tenga una cierta variación espacial, entonces δv también debe tener la misma forma espacial:

$$\delta v = N_N \delta v^N$$

La ecuación de los medio continuos es, entonces, aproximada por la variación del punto finito δv^N .

Se tiene que $\delta \varepsilon$ es la razón virtual de la deformación del material asociado a δv , y como es una razón, debe ser lineal en δv . Entonces, la interpolación da:

$$\delta \varepsilon = \beta_N \delta v^N$$

Donde β_N es una matriz que depende, en general, en la posición actual x del punto del material considerado. Esta matriz que define la variación de la

deformación desde las variaciones de las variables cinemáticas es derivable inmediatamente desde las funciones de interpolación una vez que la medida de la deformación particular para ser usada es definida.

Sin perder la generalidad se puede escribir $\beta_N = \beta_N(x, N_N)$, y con estas ecuaciones la ecuación de equilibrio se aproxima a:

$$\delta v^N \int_{V^0} \beta_N : \tau^c dV^0 = \delta v^N \left[\int_S N_N^T \cdot t dS + \int_V N_N^T \cdot f dV \right]$$

Y como δv^N son variables independientes, podemos elegir cada uno que sea un número distinto de cero y las demás cero, para llegar a un sistema de ecuaciones de equilibrio no lineares:

$$\int_{V^0} \beta_N : \tau^c dV^0 = \int_S N_N^T \cdot t dS + \int_V N_N^T \cdot f dV \quad (2)$$

Este sistema de ecuaciones forma la base del análisis de elemento finito para el desplazamiento y está en esta forma:

$$F^N(u^M) = 0$$

Las ecuaciones mostradas arriba son válidas para análisis estáticos y dinámicos si se asume que la fuerza sobre el cuerpo contiene la contribución de la inercia. En análisis dinámicos, sin embargo, la contribución de la inercia es comúnmente considerada aparte, llegando a las ecuaciones:

$$M^{NM} \ddot{u}^M + F^N(u^M) = 0$$

Para el algoritmo de Newton (procedimiento de perturbación lineal) se necesita el Jacobiano de las ecuaciones de equilibrio del elemento finito. Para desarrollar este Jacobiano, se toma la ecuación (1), teniendo:

$$\begin{aligned}
& \int_{V^0} (d\tau^c: \delta\varepsilon + \tau^c: d\delta\varepsilon) dV^0 \\
& - \int_S dt^T \cdot \delta v dS \\
& - \int_S t^T \cdot \delta v dA_r \frac{1}{A_r} dS - \int_V df^T \cdot \delta v dV \\
& - \int_V f^T \cdot \delta v dJ \frac{1}{J} dV = 0 \quad (3)
\end{aligned}$$

Donde $d(\)$ representa la variación lineal de la cantidad $(\)$ con respecto a las variables básicas (los grados de libertad del modelo del elemento finito). En la expresión anterior $J = |dV/dV^0|$ es el cambio de volumen entre el volumen de referencia y el actual ocupado por la pieza. De la misma forma, $A_r = |dS/dS^0|$ es la razón del área superficial entre la referencia y la actual. La matriz Jacobiana es obtenida restringiendo dicha variación, permitiendo sólo variaciones las variables de los nodos u^N . Esta variación restringida está indicada por $\partial_N = \partial/\partial u^N$.

Examinando la ecuación (3) vemos que el primer término contiene $d\tau^c$. Asumimos que la teoría constitutiva nos permite escribir:

$$d\tau^c = H: d\varepsilon + g$$

Donde H y g están definidas en términos del estado actual, dirección de la deformación, etc., y por las suposiciones cinemáticas usadas para formar las deformaciones generalizadas.

De la medida de deformaciones generalizada y de la función de interpolación:

$$\partial_N \varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial u^N} = \beta_N$$

De esta suposición:

$$\partial_N \tau^c = H : \beta_N$$

Ahora, como $\delta \varepsilon$ es la primera variación de ε con respecto a las variables de nodo,

$$\delta \varepsilon = \partial_M \varepsilon \delta u^M = \beta_M \delta u^M$$

Entonces, el primer término de la matriz Jacobiana es

$$\int_{V^0} \beta_M : H : \beta_N dV^0$$

El cual es la “matriz de rigidez de pequeño desplazamiento”, excepto que, como la deformación ε será siempre un desplazamiento no linear, el β_N en este término será una función del desplazamiento.

El segundo término en la ecuación (3) es:

$$\int_{V^0} \tau^c : d\delta \varepsilon dV^0$$

Se reescribe como:

$$\int_{V^0} \tau^c : \partial_N \delta \varepsilon dV^0$$

Que es:

$$\int_{V^0} \tau^c : \partial_N \beta_M dV^0$$

Este término contribuye al Jacobiano y es la “matriz del esfuerzo inicial”.

Los términos de carga externa en la ecuación (3) se consideran ahora. En general, estos vectores de carga se pueden escribir como:

$$t = t(\lambda, x) \text{ y } f = f(\lambda, x)$$

Donde λ representa los parámetros de carga prescritos externamente. Si la carga depende de la posición o no depende del tipo de carga particular, pero las comunes (presión, carga puntual) dependen de la posición. Por ejemplo, si t es causada por presión en la superficie, t depende de la magnitud de la presión en la dirección normal a la superficie y en la superficie de área actual; éstas dos serán funciones de la posición actual de los puntos en la superficie. La variación del vector de carga con variables de nodo puede escribirse simbólicamente:

$$\partial_N t + t \frac{1}{A_r} \partial_N A_r = Q_N^S$$

$$\partial_N f + f \frac{1}{J} \partial_N J = Q_N^V$$

Y después:

$$\delta v = N_M \delta v^M$$

Donde N_M se obtiene directamente de la interpolación de funciones.

Entonces podemos escribir los términos Jacobianos de los últimos 4 términos de la ecuación (3) como:

$$- \int_S N_M^T \cdot Q_N^S dS - \int_V N_M^T \cdot Q_N^V dV$$

Estas son comúnmente conocidas como la “matriz de rigidez de carga”. La forma verdadera de la rigidez de carga depende en gran medida en el tipo de carga considerado.

La matriz Jacobiana completa queda entonces:

$$K_{MN} = \int_{V^0} \beta_M : H : \beta_N dV^0 + \int_{V^0} \tau^c : \partial_N \beta_M dV^0 - \int_S N_M^T \cdot Q_N^S dS - \int_V N_M^T \cdot Q_N^V dV \quad (4)$$

Por tanto, las ecuaciones (2) y (4) proveen la base de la solución incremental de Newton dada una especificación de la función de interpolación y de las teorías constitutivas.

4. Ecuaciones de Deformación

En cualquier problema asociado con la deformación de sólidos, normalmente el objetivo principal es el de analizar la manera en la que la deformación ocurre a lo largo de la historia de la carga. La partícula del material inicialmente localizada en alguna posición X en el espacio del sólido o continuo se moverá a una nueva posición x : como se asume que el material no puede aparecer o desaparecer, habrá una correspondencia uno a uno entre x y X , por lo que siempre se puede escribir la historia de la locación de la partícula como:

$$x = x(X, t) \quad (5)$$

Esta relación puede invertirse, conocemos X cuando se conoce x y t . Ahora se consideran dos partículas vecinas, localizadas en X y en $X+dX$ en la configuración inicial. Usando el “mapeo” de la ecuación (5) se tendrá en la configuración actual:

$$dx = \frac{\partial x}{\partial X} \cdot dX \quad (6)$$

La matriz F , llamada “matriz gradiente” es:

$$F = \frac{\partial x}{\partial X} \quad (7)$$

La ecuación (6) es escrita:

$$dx = F \cdot dX \quad (8)$$

Como el comportamiento del material depende de la deformabilidad del material y no de su moción de cuerpo rígido, éstas partes de la moción en la vecindad del punto del material deben ser distinguidos. Viendo el cambio en la longitud infinitamente pequeño dX que se tiene desde la partícula que inicialmente estaba en X , se puede medir las longitudes inicial y actual como:

$$dL^2 = dX^T \cdot dX \quad \text{y} \quad dl^2 = dx^T \cdot dx$$

Así que la “razón de estrechamiento” de este cambio en la longitud es:

$$\lambda = \frac{dl}{dL} = \sqrt{\frac{dx^T \cdot dx}{dX^T \cdot dX}} \quad (9)$$

Si $\lambda = 1$, no hay deformación en esa longitud infinitesimal, sólo ha tenido moción de cuerpo rígido. Ahora usando la ecuación (8),

$$dx^T \cdot dx = dX^T \cdot F^T \cdot F \cdot dX$$

De forma, que desde la ecuación (9):

$$\lambda^2 = \frac{dX^T}{\sqrt{dX^T \cdot dX}} \cdot F^T \cdot F \cdot \frac{dX}{\sqrt{dX^T \cdot dX}} = N^T \cdot F^T \cdot F \cdot N \quad (10)$$

Donde N es un vector unidad en la dirección de la longitud dX .

La ecuación (10) demuestra cómo calcular la razón de estrechamiento asociada con cualquier dirección, N , a cualquier punto del material definido por X (o por x). Resultados útiles se obtienen cuando se varía la dirección definida por N a cualquier punto del material y se buscan valores estacionarios de la razón de estrechamiento λ . Como N es forzosamente un vector unidad, valores estacionarios de λ^2 se obtienen resolviendo la ecuación variacional restringida

$$\delta\{N^T \cdot F^T \cdot F \cdot N - p(N^T \cdot N - 1)\} = 0$$

Donde p es un multiplicador Lagrange, introducido para mantener la restricción

$$N^T \cdot N = 1$$

Al tomar esta variación se obtiene la restricción (conjugado de δp) y, conjugado con δN , da:

$$(F^T \cdot F - pI) \cdot N = 0 \quad (11)$$

Tomando el producto punto de la parte izquierda de la ecuación con N y comparando con la ecuación (10) se identifica $p = \lambda^2$, entonces (11) queda:

$$(F^T \cdot F - \lambda^2 I) \cdot N = 0 \quad (12)$$

Este problema es un valor eigen tal que puede ser resuelto para los tres valores extremos de λ^2 . Como λ es siempre real y positivo (y no es cero), $\lambda^2 > 0$, entonces $F^T \cdot F$ debe ser un positivo definido. La ecuación (8) da tres valores eigen reales, $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_{III}$, los “estrechamientos principales”, con tres vectores eigen correspondientes, N_I, N_{II}, N_{III} , los cuales serán ortogonales, por la ecuación (8), si los valores eigen correspondientes son diferentes y pueden ser ortogonalizados de otra forma. Los N_i son las direcciones principales de la deformación.

Ahora siendo n_I, n_{II}, n_{III} , los vectores unitarios correspondientes a N_I, N_{II}, N_{III} , pero en la configuración actual, entonces usando la ecuación (8):

$$n_I = \frac{1}{\lambda_I} F \cdot N_I, \text{ etc.}$$

Entonces:

$$n_I^T \cdot n_{II} = \frac{1}{\lambda_I \lambda_{II}} N_I^T \cdot F^T \cdot F \cdot N_{II} = \frac{1}{\lambda_I \lambda_{II}} \lambda_{II}^2 N_I^T \cdot N_{II} = 0$$

Esto es debido a los resultados de la ortogonalidad recién mencionada. Entonces, n_I , n_{II} y n_{III} serán también ortogonales. Como cada uno es un vector unidad:

$$n_I = R \cdot N_I$$

$$n_{II} = R \cdot N_{II}$$

$$n_{III} = R \cdot N_{III}$$

Donde R es la misma matriz de la rotación del cuerpo rígido en cada de las ecuaciones. Esta matriz tiene la propiedad que su inverso es su transpuesta: $R^T = R^{-1}$. Comparando las direcciones de los estrechamientos principales en la configuración actual y en la original, entonces, deja solos a la rotación del cuerpo rígido y el estrechamiento. Al encontrar las razones de los estrechamientos principales y sus direcciones se obtiene una solución al problema de despejar el movimiento restringido y el movimiento del cuerpo rígido en la vecindad de un punto del material.

Ahora se considera una longitud dX_I , a lo largo de N_I . La misma línea infinitesimal del material en la configuración actual estará a lo largo de n_I y será estirada por λ_I , de tal manera que

$$dx_I = \lambda_I R \cdot dX_I$$

De igual manera, a lo largo de las otras direcciones principales

$$dx_{II} = \lambda_{II} R \cdot dX_{II}$$

$$dx_{III} = \lambda_{III} R \cdot dX_{III}$$

Como $(N_I, N_{II}, \text{ y } N_{III})$ son una base de vectores ortonormales, cualquier cambio infinitesimal dX en X puede ser escrito en términos de sus componentes así

$$dX = dX_I + dX_{II} + dX_{III}$$

Donde

$$dX_I = N_I N_I^T \cdot dX \quad \text{etc}$$

Cada uno de los vectores dX_i se mueve y estira al dx_i correspondiente, como se definió antes. Entonces el cambio dx es

$$dx = dx_I + dx_{II} + dx_{III}$$

$$dx = \lambda_I R \cdot dX_I + \lambda_{II} R \cdot dX_{II} + \lambda_{III} R \cdot dX_{III}$$

$$dx = (\lambda_I R \cdot N_I N_I^T + \lambda_{II} R \cdot N_{II} N_{II}^T + \lambda_{III} R \cdot N_{III} N_{III}^T) \cdot dX$$

$$dx = (\lambda_I n_I n_I^T + \lambda_{II} n_{II} n_{II}^T + \lambda_{III} n_{III} n_{III}^T) \cdot dX$$

$$dx = (\lambda_I n_I n_I^T + \lambda_{II} n_{II} n_{II}^T + \lambda_{III} n_{III} n_{III}^T) \cdot R \cdot dX$$

Lo que se puede escribir como

$$dx = V \cdot R \cdot dX \quad (13)$$

Donde

$$V = (\lambda_I n_I n_I^T + \lambda_{II} n_{II} n_{II}^T + \lambda_{III} n_{III} n_{III}^T) \quad (14)$$

Comparando con la definición del gradiente de deformación, ecuación (12), se demuestra que

$$F = V \cdot R \quad (15)$$

La ecuación (15) es el teorema de descomposición polar, el cual dice que cualquier movimiento puede representarse como una rotación pura de un cuerpo rígido, seguido de un estiramiento puro de las tres direcciones ortogonales.

Para obtener V de F se usa

$$F \cdot F^T = V \cdot R \cdot R^T \cdot V^T = V \cdot V$$

ya que $R^T = R^{-1}$ y V son simétricos.

Como ya se había definido V en (11), entonces se tiene

$$F \cdot F^T = V \cdot V = \lambda_I^2 n_I n_I^T + \lambda_{II}^2 n_{II} n_{II}^T + \lambda_{III}^2 n_{III} n_{III}^T \quad (16)$$

Los valores eigen de $F \cdot F^T$ son λ_I^2 , λ_{II}^2 y λ_{III}^2 , y los vectores eigen correspondientes son n_I , n_{II} y n_{III} . Entonces se puede construir V. La deformación en cada punto se obtiene multiplicando la matriz de 3x3 con la transpuesta ($F \cdot F^T$) y resolviendo el problema real eigen para la matriz resultante. Entonces se obtiene R de

$$R = V^{-1} \cdot F$$

Como V se construye de valores y vectores eigen se puede obtener su inverso así

$$V^{-1} = \frac{1}{\lambda_I} n_I n_I^T + \frac{1}{\lambda_{II}} n_{II} n_{II}^T + \frac{1}{\lambda_{III}} n_{III} n_{III}^T$$

Estos resultados presentados son generales, no están referenciados a ningún sistema de coordenadas. Dependiendo del elemento que se esté estudiando y de sus características, el paquete Abaqus decide qué sistema de coordenadas usar.

5. Ecuaciones de Transferencia de calor

La teoría que usa el Abaqus para calcular la conducción de calor se discutirá en este segmento.

La ecuación básica de balance de energía de Green y Naghdi es:

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV$$

Donde V es el volumen del material sólido, con área de superficie S , ρ es la densidad, \dot{U} es la energía interna por tiempo, q es el flujo de calor por unidad de área fluyendo hacia el cuerpo y r es el calor por unidad de volumen suministrado externamente hacia el cuerpo.

La conducción de calor se asume que es gobernada por la ley de Fourier:

$$f = -k \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

Donde k es la matriz de conductividad, $k = k(\theta)$; f es el flujo de calor; y x es la posición. La conductividad k puede ser anisotrópica o isotrópica.

El flujo de calor por convección se calcula:

$$q_s = -n \cdot k \cdot \frac{\delta \theta}{\delta x}$$

Donde n es el área normal de la superficie y k es la conductividad del fluido.

6. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera pueden ser temperaturas iniciales, $\theta = \theta(x, t)$, flujos de calor iniciales, $q = q(x, t)$, flujos volumétricos iniciales, $q = r(x, t)$, convección inicial, $q = h(\theta - \theta^0)$, con $h = h(x, t)$, donde h es el coeficiente del fluido y $\theta^0 = \theta^0(x, t)$ es la temperatura del "pozo"; y de radiación $q = A((\theta - \theta^Z)^4 - (\theta^0 - \theta^Z)^4)$, donde A es la constante de radiación (emisividad por la constante de Stefan-Boltzmann) y θ^Z es el valor del cero absoluto en la escala de temperatura usada.

Anexo II

Valores de la Figura 6.6

$\mu=0$			
Reportado		Simulación	
% Δ H	% Δ D	% Δ H	% Δ D
0	0	0	0
1.5	-0.72	0.60	-0.24
3	-1.49	1.34	-0.62
5.25	-2.69	2.46	-1.19
7.75	-4.07	4.18	-2.10
10.25	-5.5	6.80	-3.50
12.75	-7	10.82	-5.74
15.25	-8.57	16.89	-9.39
17.75	-10.2	25.74	-15.68
20.25	-11.9	39.48	-27.52
22.75	-13.7	49.60	-40.26
25.25	-15.57		
27.75	-17.57		
30.25	-19.67		
32.75	-21.87		
35.25	-24.2		
37.75	-26.67		
40.25	-29.27		
42.75	-32.07		
45.25	-35		
47.75	-38		
50	-41.33		

$\mu=0.1443$			
Reportado		Simulación	
% Δ H	% Δ D	% Δ H	% Δ D
0	0	0	0
0.61	0.03	2.82	0.02
1.61	0.01	3.57	0.03
4.99	0.06	4.34	0.04
7.40	0.16	5.50	0.08
9.90	0.32	7.25	0.17
12.40	0.56	9.90	0.38
14.90	0.88	13.93	0.89
17.40	1.28	18.02	1.62
19.90	1.77	22.12	2.60
22.40	2.38	26.17	3.90
24.90	3.12	27.17	4.27
27.40	4.04	28.16	4.67
29.90	5.19	29.64	5.34
32.40	6.63	31.77	6.57
34.90	8.38	32.57	7.09
37.40	10.38	33.78	7.96
39.90	12.49	35.59	9.40
42.40	14.71	38.30	11.76
44.90	17.01	39.36	12.66
47.40	19.37	39.75	13.01
49.90	21.88	40.34	13.52
50.00	21.99	41.24	14.32
		42.60	15.55
		44.69	17.46
		47.91	20.54
		48.46	21.10
		48.67	21.32
		49.00	21.65
		49.50	22.16
		50.22	22.92

$\mu=0.2309$			
Reportado		Simulación	
% Δ H	% Δ D	% Δ H	% Δ D
0	0	0	0
7.11	2.21	2.79	0.71
9.61	3.24	5.07	1.48
12.11	4.42	7.39	2.38
14.61	5.75	10.89	4.06
17.11	7.25	16.21	7.33
19.61	8.91	18.22	8.65
22.11	10.7	21.25	10.76
24.61	12.63	21.58	10.93
27.11	14.67	22.07	11.20
29.61	16.83	22.74	11.61
32.11	19.12	23.74	12.28
34.61	21.52	25.22	13.33
37.11	24.11	27.53	15.00
38.68	25.84	28.38	15.63
40.08	27.44	29.62	16.61
42.19	29.95	31.46	18.11
44.69	33.11	34.20	20.45
45.79	34.57	35.21	21.36
46.49	35.57	36.70	22.75
47.54	37.02	37.25	23.28
49.13	39.18	37.95	24.09
50	40.41	38.22	24.40
		38.65	24.86
		39.29	25.57
		40.28	26.67
		41.78	28.38
		44.01	31.14
		44.86	32.25
		45.95	34.00
		47.85	36.90
		49.29	39.23

Anexo III

Datos de la Figura 7.6

Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)
0.00	1074.14	1083.40	41.84	764.11	791.31
1.10	1066.57	1079.12	42.94	760.82	788.16
2.20	1058.41	1074.34	44.04	757.63	785.10
3.30	1047.51	1067.12	45.14	754.78	782.32
4.40	1036.12	1059.40	46.24	751.97	779.56
5.51	1023.32	1049.62	47.34	749.33	776.87
6.61	1010.29	1039.51	48.44	746.71	774.17
7.71	997.04	1028.46	49.55	744.12	771.45
8.81	984.14	1017.36	50.65	741.55	768.73
9.91	972.68	1006.35	51.75	738.97	766.08
11.01	961.40	995.42	52.85	736.37	763.43
12.11	950.90	984.87	53.95	733.82	760.88
13.21	940.61	974.46	55.05	731.28	758.35
14.31	930.89	964.51	56.15	728.77	755.88
15.41	921.32	954.66	57.25	726.27	753.42
16.52	912.29	945.27	58.35	723.81	750.97
17.62	903.36	935.99	59.45	721.35	748.51
18.72	894.78	927.13	60.56	718.87	746.01
19.82	886.26	918.35	61.66	716.39	743.49
20.92	878.10	909.94	62.76	713.83	740.94
22.02	869.97	901.56	63.86	711.26	738.38
23.12	862.22	893.57	64.96	708.71	735.77
24.22	854.55	885.65	66.06	706.14	733.15
25.32	847.21	878.03	67.16	703.52	730.53
26.42	839.96	870.46	68.26	700.88	727.89
27.53	833.01	863.16	69.36	698.24	725.23
28.63	826.16	855.94	70.46	695.62	722.56
29.73	819.68	849.09	71.57	693.07	719.85
30.83	813.28	842.31	72.67	690.53	717.14
31.93	807.25	835.90	73.77	687.93	714.42
33.03	801.30	829.58	74.87	685.32	711.71
34.13	795.80	823.69	75.97	682.66	708.99
35.23	790.36	817.90	77.07	680.00	706.26
36.33	785.35	812.66	78.17	677.31	703.51
37.43	780.41	807.50	79.27	674.61	700.75
38.54	775.95	803.01			

Datos de la figura 7.7

Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)
0.00	-	-	14.31	950.02	1012.26
0.37	-	-	14.68	946.59	1008.49
0.73	-	-	15.05	943.21	1004.72
1.10	1063.98	1059.62	15.41	939.89	1000.97
1.47	1062.93	1059.63	15.78	936.59	997.23
1.84	1061.69	1059.64	16.15	933.33	993.51
2.20	1060.32	1059.65	16.52	930.10	989.82
2.57	1058.86	1059.65	16.88	926.89	986.09
2.94	1057.37	1059.66	17.25	923.70	982.45
3.30	1055.86	1059.67	17.62	920.49	978.82
3.67	1054.34	1059.70	17.98	917.33	975.24
4.04	1052.80	1059.72	18.35	914.15	971.70
4.40	1051.23	1059.73	18.72	910.98	968.20
4.77	1049.57	1059.70	19.08	907.79	964.73
5.14	1047.67	1059.58	19.45	904.60	961.30
5.51	1045.54	1059.33	19.82	901.40	957.91
5.87	1042.99	1058.95	20.19	898.23	954.55
6.24	1040.01	1058.42	20.55	895.08	951.23
6.61	1036.59	1057.72	20.92	891.96	947.96
6.97	1032.76	1056.84	21.29	888.89	944.69
7.34	1028.58	1055.77	21.65	885.87	941.48
7.71	1024.13	1054.54	22.02	882.91	938.29
8.07	1019.51	1053.19	22.39	880.00	935.11
8.44	1014.83	1051.75	22.75	877.15	931.97
8.81	1010.16	1050.22	23.12	874.32	928.82
9.18	1005.55	1048.62	23.49	871.49	925.72
9.54	1001.05	1046.92	23.86	868.68	922.63
9.91	996.68	1045.18	24.22	865.87	919.59
10.28	992.39	1043.42	24.59	863.06	916.55
10.64	988.19	1041.55	24.96	860.26	913.54
11.01	984.05	1039.61	25.32	857.46	910.55
11.38	979.92	1037.46	25.69	854.69	907.58
11.74	975.93	1035.10	26.06	851.94	904.62
12.11	972.02	1032.49	26.42	849.23	901.69
12.48	968.18	1029.64	26.79	846.52	898.77
12.85	964.40	1026.54	27.16	843.89	895.87
13.21	960.70	1023.20	27.53	841.31	892.98
13.58	957.07	1019.66	27.89	838.77	890.11
13.95	953.50	1015.99	28.26	836.29	887.27

Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)
28.63	833.86	884.43	42.94	775.40	794.20
28.99	831.48	881.60	43.31	774.30	793.28
29.36	829.13	878.77	43.67	773.17	792.44
29.73	826.83	875.95	44.04	772.03	791.62
30.09	824.57	873.15	44.41	770.87	790.82
30.46	822.32	870.37	44.77	769.71	790.00
30.83	820.11	867.62	45.14	768.52	789.17
31.20	817.92	864.89	45.51	767.33	788.32
31.56	815.76	862.19	45.88	766.13	787.43
31.93	813.62	859.53	46.24	764.93	786.52
32.30	811.51	856.86	46.61	763.74	785.56
32.66	809.44	854.25	46.98	762.56	784.57
33.03	807.39	851.67	47.34	761.39	783.53
33.40	805.40	849.09	47.71	760.22	782.45
33.76	803.46	846.53	48.08	759.08	781.33
34.13	801.58	843.97	48.44	757.95	780.19
34.50	799.79	841.42	48.81	756.85	779.01
34.87	798.10	838.87	49.18	755.76	777.82
35.23	796.50	836.33	49.55	754.69	776.62
35.60	795.01	833.78	49.91	753.64	775.41
35.97	793.61	831.24	50.28	752.61	774.19
36.33	792.31	828.73	50.65	751.60	772.94
36.70	791.12	826.24	51.01	750.61	771.70
37.07	790.00	823.79	51.38	749.63	770.45
37.43	788.96	821.36	51.75	748.67	769.19
37.80	787.99	818.97	52.11	747.72	767.93
38.17	787.07	816.63	52.48	746.78	766.67
38.54	786.18	814.33	52.85	745.84	765.42
38.90	785.33	812.10	53.22	744.91	764.18
39.27	784.50	809.92	53.58	743.96	762.97
39.64	783.70	807.81	53.95	743.02	761.77
40.00	782.90	805.79	54.32	742.06	760.60
40.37	782.08	803.88	54.68	741.12	759.44
40.74	781.24	802.09	55.05	740.14	758.30
41.10	780.36	800.43	55.42	739.17	757.18
41.47	779.45	798.90	55.78	738.21	756.08
41.84	778.49	797.53	56.15	737.25	755.00
42.21	777.50	796.30	56.52	736.29	753.95
42.57	776.47	795.20	56.89	735.33	752.90

Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)	Tiempo (s)	Temperatura en superficie (°C)	Temperatura interior (°C)
57.25	734.38	751.90	71.57	695.10	711.05
57.62	733.42	750.92	71.93	694.11	709.97
57.99	732.48	749.96	72.30	693.12	708.89
58.35	731.52	749.00	72.67	692.12	707.80
58.72	730.54	748.05	73.03	691.10	706.71
59.09	729.57	747.08	73.40	690.08	705.62
59.45	728.58	746.09	73.77	689.06	704.53
59.82	727.57	745.08	74.13	688.03	703.43
60.19	726.56	744.06	74.50	687.01	702.33
60.56	725.53	743.00	74.87	685.98	701.23
60.92	724.52	741.95	75.24	684.95	700.13
61.29	723.50	740.90	75.60	683.92	699.02
61.66	722.48	739.85	75.97	682.88	697.91
62.02	721.42	738.80	76.34	681.84	696.80
62.39	720.36	737.77	76.70	680.81	695.68
62.76	719.27	736.73	77.07	679.78	694.57
63.12	718.17	735.68	77.44	678.75	693.45
63.49	717.06	734.64	77.80	677.71	692.34
63.86	715.92	733.57	78.17	676.66	691.22
64.23	714.82	732.47	78.54	675.62	690.10
64.59	713.72	731.37	78.91	674.58	688.99
64.96	712.65	730.28	79.27	673.53	687.89
65.33	711.62	729.17	79.64	672.48	686.79
65.69	710.61	728.07	80.01	671.43	685.70
66.06	709.62	726.99			
66.43	708.64	725.93			
66.79	707.65	724.87			
67.16	706.65	723.84			
67.53	705.65	722.79			
67.90	704.67	721.74			
68.26	703.68	720.69			
68.63	702.70	719.64			
69.00	701.74	718.57			
69.36	700.79	717.49			
69.73	699.85	716.42			
70.10	698.91	715.34			
70.46	697.98	714.27			
70.83	697.03	713.20			
71.20	696.07	712.13			

Anexo IV

Datos de figura 7.8

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0	1053.531694	14.313	524.067271
0.367	1050.10431	14.68	472.397735
0.734	1045.373008	15.047	434.576333
1.101	1042.061015	15.414	399.86062
1.468	1036.587829	15.781	371.765262
1.835	1033.074747	16.148	348.019125
2.202	1028.257429	16.515	327.245513
2.569	1022.640494	16.882	308.990682
2.936	1016.059714	17.249	292.93477
3.303	1008.365516	17.616	278.722099
3.67	999.543164	17.983	266.105583
4.037	994.144211	18.35	259.635868
4.404	987.597537	18.717	262.436573
4.771	981.345816	19.084	264.586686
5.138	977.467545	19.451	265.746578
5.505	972.15872	19.818	266.415486
5.872	966.97683	20.185	267.308027
6.239	963.343345	20.552	275.668501
6.606	958.769049	20.919	274.946639
6.973	953.508026	21.286	273.75183
7.34	950.27042	21.653	272.315587
7.707	945.852516	22.02	271.033011
8.074	940.961081	22.387	269.642009
8.441	937.963695	22.754	268.351561
8.808	933.971106	23.121	267.056045
9.175	930.711607	23.488	265.824036
9.542	927.050611	23.855	264.459262
9.909	923.501024	24.222	263.197386
10.276	920.041833	24.589	262.262798
10.643	916.541393	24.956	261.156978
11.01	913.026921		
11.377	910.546761		
11.744	909.281856		
12.111	909.246942		
12.478	912.423557		
12.845	844.647952		
13.212	735.934951		

Anexo V

Datos de figuras 7.11 y 7.12

Alta velocidad			Alto cromo		
%H	%Di	%De	%H	%Di	%De
0	0	0	0	0	0
15.50	8.63	-6.75	14.60	8.10	-5.82
23.63	15.85	-10.75	30.54	23.43	-13.77
20.68	12.53	-9.14	39.03	34.21	-19.05
32.57	28.10	-15.24	47.51	47.68	-25.07
39.35	36.56	-19.00			
40.52	35.88	-20.06			
46.27	43.68	-25.36			

Datos de figuras 7.13 y 7.14

Alta velocidad			Alto cromo		
%H	%Di	%De	%H	%Di	%De
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.10	4.99	-5.91	15.47	7.87	-6.29
22.80	16.74	-9.09	21.57	13.29	-8.77
31.81	27.01	-14.11	32.97	25.67	-15.30
39.26	35.41	-19.17	41.23	36.19	-20.44
47.34	40.52	-25.30	47.95	44.27	-25.87

Datos de figuras 7.15 y 7.16

Alta velocidad			Alto cromo		
%H	%Di	%De	%H	%Di	%De
0	0	0	0	0	0
8.54	1.77	-5.10	1.58	1.18	-2.20
16.37	4.14	-9.16	1.92	1.12	-3.01
24.38	5.04	-14.06	19.99	5.59	-10.43
33.02	5.60	-20.11	29.68	9.61	-16.61
41.89	9.80	-26.41	42.23	24.10	-24.80

Datos de figuras 7.17 y 7.18

Alta velocidad			Alto cromo		
%H	%Di	%De	%H	%Di	%De
0	0	0	0	0	0
14.00	8.34	-5.77	13.42	9.51	-6.06
24.53	19.41	-10.77	24.37	19.65	-10.40
33.00	30.37	-15.32	33.64	34.08	-15.20
41.80	38.92	-20.33	41.46	39.34	-19.97
48.47	48.14	-25.89	48.94	53.30	-25.53

Datos de figuras 7.19 y 7.20

Alta velocidad			Alto cromo		
%H	%Di	%De	%H	%Di	%De
0	0	0	0	0	0
11.67	8.00	-4.73	14.84	9.91	-5.62
23.76	21.19	-10.18	24.95	21.44	-10.85
33.31	32.27	-14.96	33.11	32.10	-15.26
40.56	39.24	-19.49	40.86	40.51	-19.62
48.82	51.44	-24.80	47.78	54.16	-26.09

Anexo VI

Datos de figura 7.21

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0	1021	16	886.442	32	791.6
1	1012	17	879.569	33	786.568
2	1002.1	18	872.844	34	781.623
3	992.356	19	866.261	35	776.761
4	982.889	20	859.815	36	771.981
5	973.685	21	853.501	37	767.279
6	964.727	22	847.315	38	762.655
7	956.003	23	841.252	39	758.105
8	947.501	24	835.308	40	753.628
9	939.211	25	829.479	41	749.221
10	931.125	26	823.762	42	744.883
11	923.234	27	818.152	43	740.612
12	915.531	28	812.646	44	736.406
13	908.007	29	807.241		
14	900.655	30	801.934		
15	893.469	31	796.721		

Datos de figura 7.22

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0	1021	16	889.564	32	793.943
1	1014.7	17	882.629	33	788.874
2	1005.83	18	875.844	34	783.893
3	996.37	19	869.203	35	778.996
4	986.919	20	862.702	36	774.182
5	977.653	21	856.334	37	769.448
6	968.611	22	850.096	38	764.791
7	959.799	23	843.983	39	760.21
8	951.21	24	837.99	40	755.702
9	942.837	25	832.115	41	751.265
10	934.67	26	826.351	42	746.898
11	926.702	27	820.697	43	742.599
12	918.924	28	815.148	44	738.365
13	911.328	29	809.702		
14	903.907	30	804.354		

Datos de figura 7.23

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0	1053	14.4238	520.525
1	1038.3	14.6611	498.326
2	1024.47	15	461.07
3	1011.34	15.2589	438.728
4	998.723	15.5177	417.069
5	986.517	15.7766	396.89
6	974.682	16.0354	378.35
7	963.19	16.4237	353.863
8	952.021	16.812	332.225
9	941.16	17.391	304.996
10	930.59	17.97	281.79
11	920.299	18.549	261.838
12	910.274	19.128	244.564
12	910.274	20.2629	218.119
13	663.282	21.3978	197.193
13	663.282	22.5327	180.447
13.125	641.102	24.8024	157.572
13.25	624.661	25	155.66
13.375	611.428		
13.5625	594.398		
13.8438	570.544		
14.2656	533.241		

Anexo VII

Resultados de Microscopio Confocal

1. Introducción

Con el microscopio confocal se pudo medir la rugosidad de las herramientas y se tomaron micrografías de la superficie para ver su topografía. Los resultados de la rugosidad con el microscopio confocal y con el perfilómetro fueron distintos, por eso se decidió ponerlos en anexos.

2. Acero de alta velocidad

La primera medición que se obtuvo es del acero de alta velocidad antes de que sea trabajada, es decir, su superficie original.

Desde el software se seleccionó una línea para que se haga la medición de la rugosidad (línea amarilla).

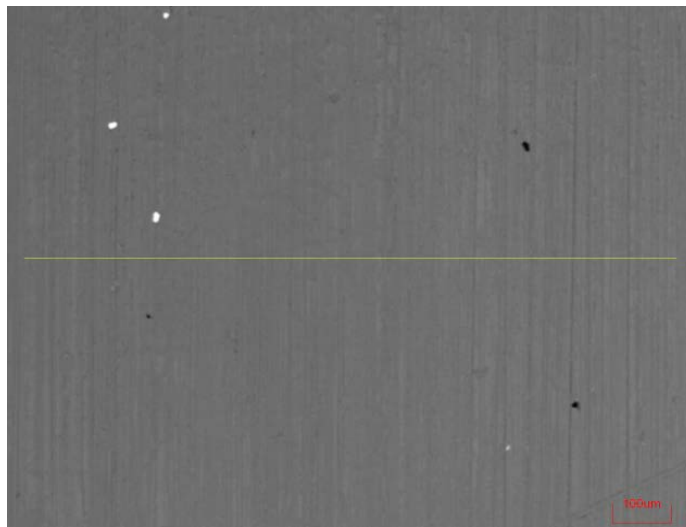


Ilustración 1 - Micrografía de acero de alta velocidad (la línea amarilla es la medición)

El software del microscopio arroja estos resultados de rugosidad:

Surface roughness		
Ra =	0.730	um
Rp =	2.586	um
Rv =	2.573	um
Rz =	5.159	um
Rc =	2.549	um
Rt =	6.244	um
Rq =	0.927	um
Rsk =	0.141	
Rku =	3.800	
RSm =	18.091	um

Ilustración 2 - Resultados obtenidos por el paquete

También proporciona la siguiente gráfica:

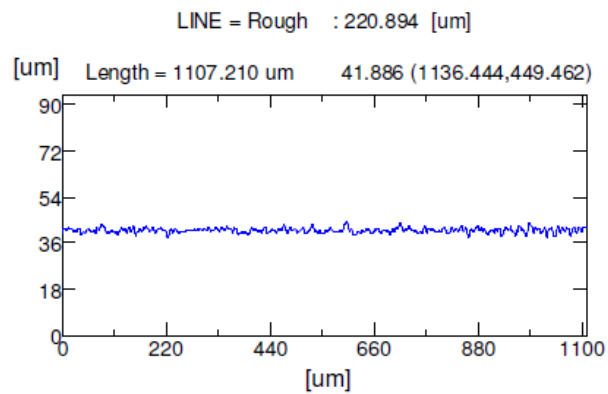


Ilustración 3 - Perfil de rugosidad de acero de alta velocidad, superficie original

Así como la estadística:

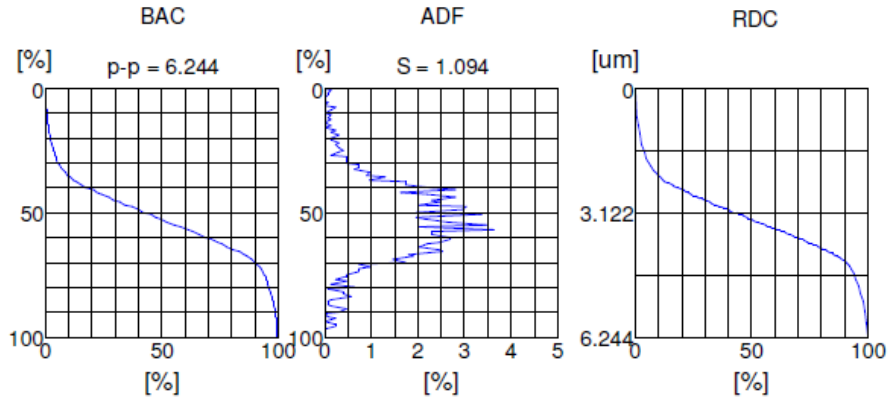


Ilustración 4 - Estadística del perfil de rugosidad

Después se realizó la medición de rugosidad pero usando una superficie o área (no sólo una línea).

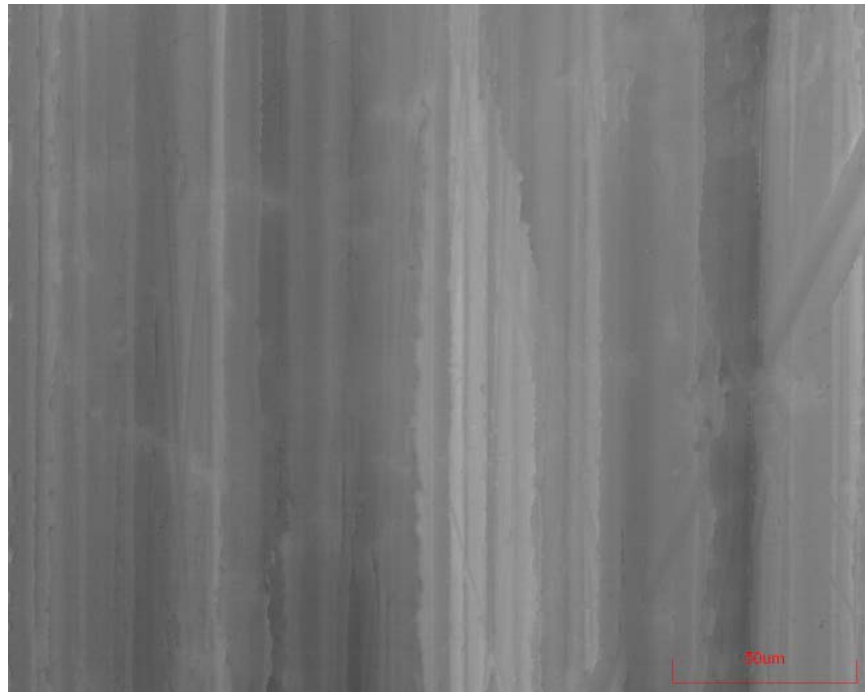


Ilustración 5 - Rugosidad superficial acero de alta velocidad

Obteniendo estos datos:

	Sa(um)	Sq(um)	Sz(um)	Ssk	Sku	Sp	Sv	Start:X(um)	Start:Y(um)	End:X(um)	End:Y(um)
F_Image17_(X50)_C R3DA-1	0.387	0.467	3.518	0.307	2.462	2.025	-1.493	0.000	188.426	0.000	235.533

Una imagen 3D de la superficie:

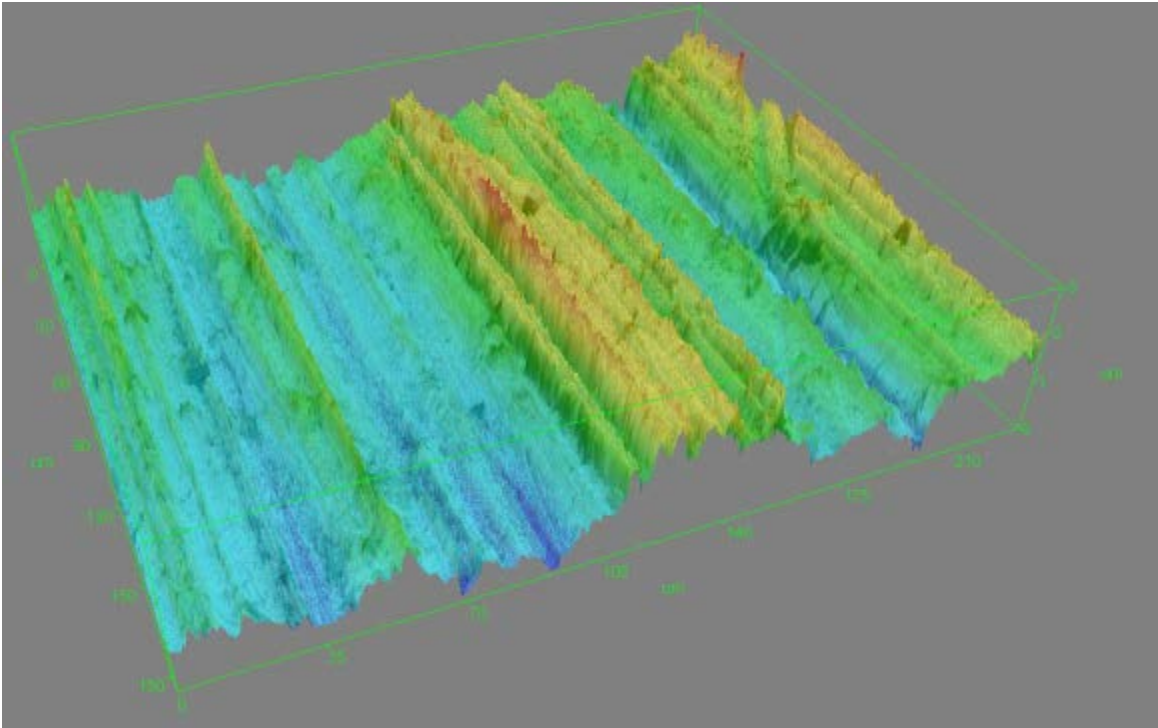


Ilustración 6 - Imagen 3D acero de alta velocidad

3. Hierro alto cromo

Se compararon las superficies de un plato de hierro alto en cromo antes y después del trabajo.

Superficie original:

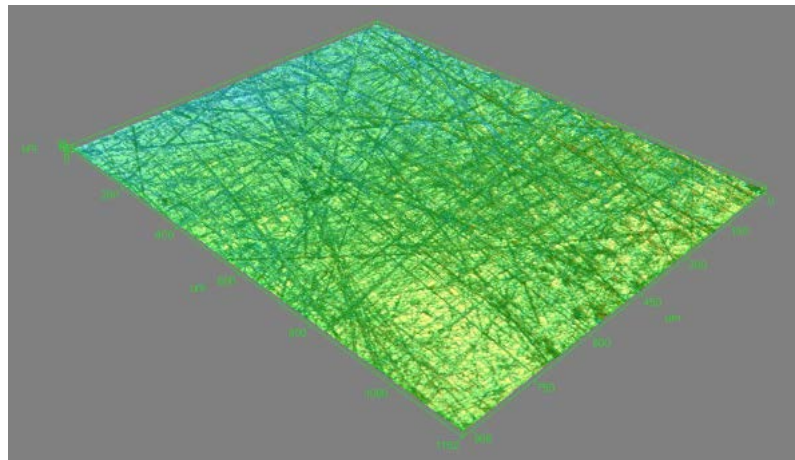


Ilustración 7 - Imagen 3D hierro alto en cromo. Superficie original

Superficie después del trabajo:

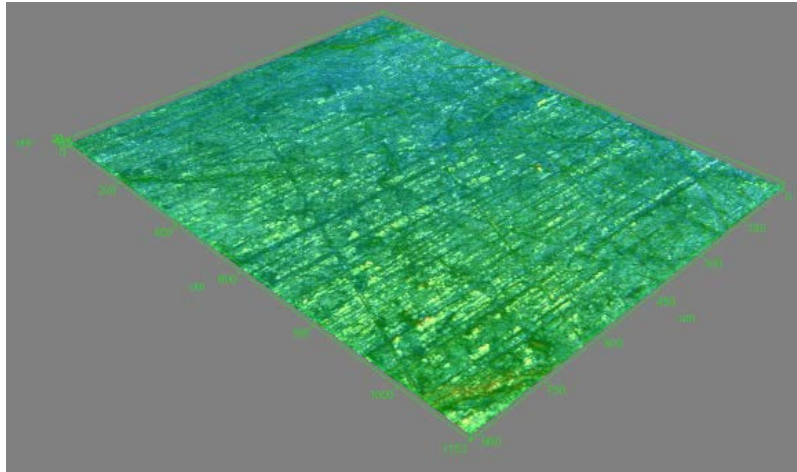


Ilustración 8 - Imagen 3D hierro alto en cromo. Superficie trabajada

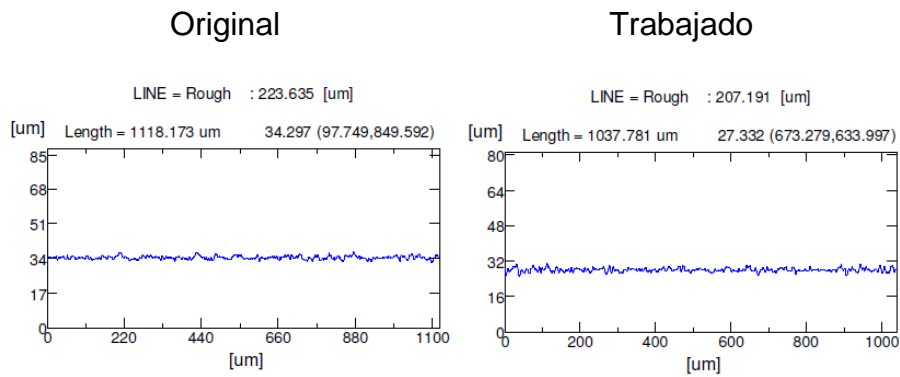


Ilustración 9 – Comparación de perfiles de rugosidad hierro alto en cromo (izq. Original, der. Trabajado)

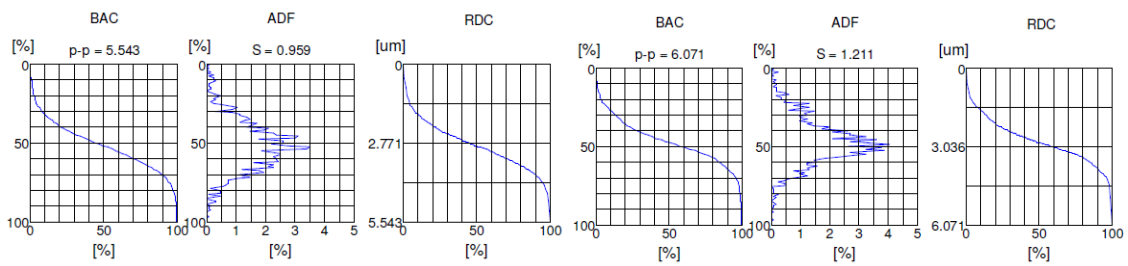


Ilustración 10 – Comparación de estadísticas de rugosidad hierro alto en cromo (izq. Original, der. Trabajado)

Surface roughness			Surface roughness		
Ra =	0.673	um	Ra =	0.668	um
Rp =	2.428	um	Rp =	2.255	um
Rv =	2.061	um	Rv =	2.367	um
Rz =	4.489	um	Rz =	4.623	um
Rc =	2.545	um	Rc =	2.560	um
Rt =	5.543	um	Rt =	6.071	um
Rq =	0.851	um	Rq =	0.857	um
Rsk =	0.236		Rsk =	0.129	
Rku =	3.334		Rku =	3.610	
RSm =	22.216	um	RSm =	17.089	um

Ilustración 11 Comparación de rugosidades calculadas por el paquete en el hierro alto en cromo (izq. Original, der. Trabajado)

3.1 Comparación entre rugosidades perpendiculares

Se midieron también las rugosidades perpendiculares en el plato de hierro en alto cromo.

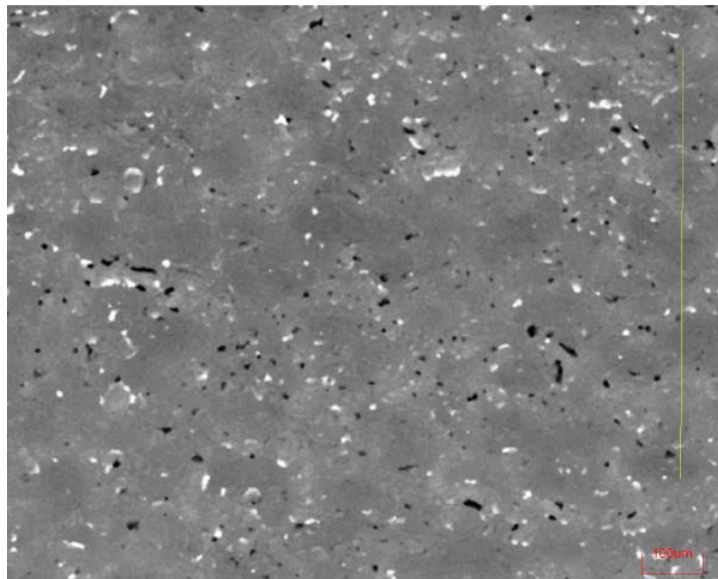


Ilustración 12 – Medición “vertical”

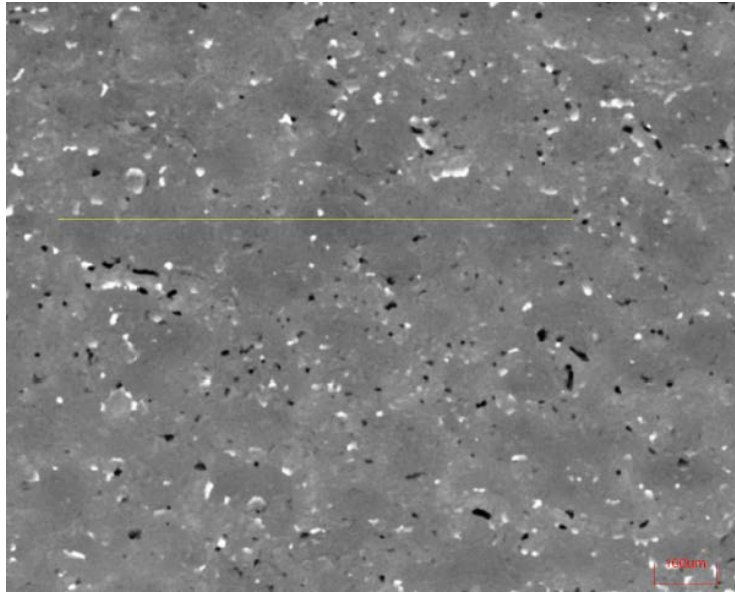


Ilustración 13 – Medición “horizontal”

“Vertical”

“Horizontal”

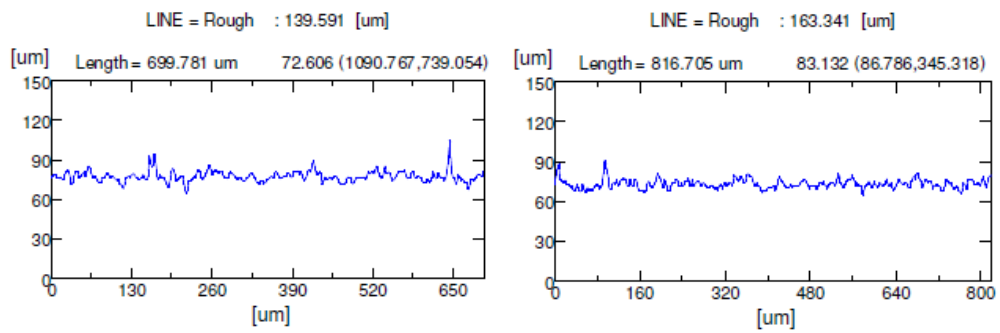


Ilustración 14 - Comparación de perfiles de rugosidad hierro alto en cromo (izq. vertical, der. horizontal)

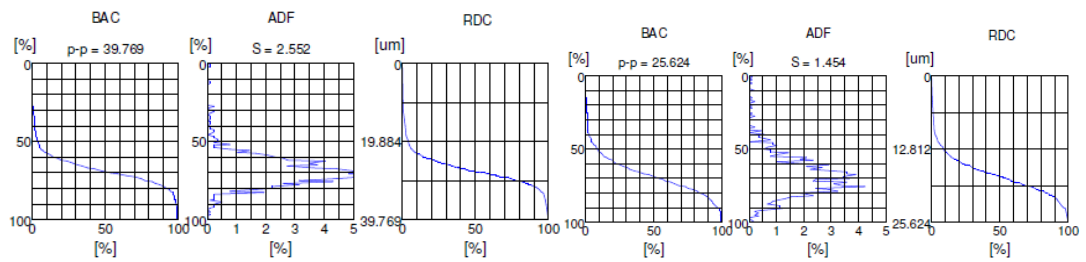


Ilustración 615 - Comparación de estadísticas de rugosidad hierro alto en cromo (izq. vertical, der. horizontal)

Surface roughness			Surface roughness		
Ra =	2.914	um	Ra =	2.600	um
Rp =	13.883	um	Rp =	9.566	um
Rv =	8.654	um	Rv =	7.214	um
Rz =	22.537	um	Rz =	16.780	um
Rc =	15.484	um	Rc =	9.685	um
Rt =	39.769	um	Rt =	25.624	um
Rq =	4.009	um	Rq =	3.377	um
Rsk =	1.756		Rsk =	1.168	
Rku =	11.989		Rku =	6.607	
RSm =	26.971	um	RSm =	27.948	um

Ilustración 16 - Comparación de mediciones de rugosidad hierro alto en cromo (izq. vertical, der. horizontal)

4. Anillo comprimido sin recubrimiento

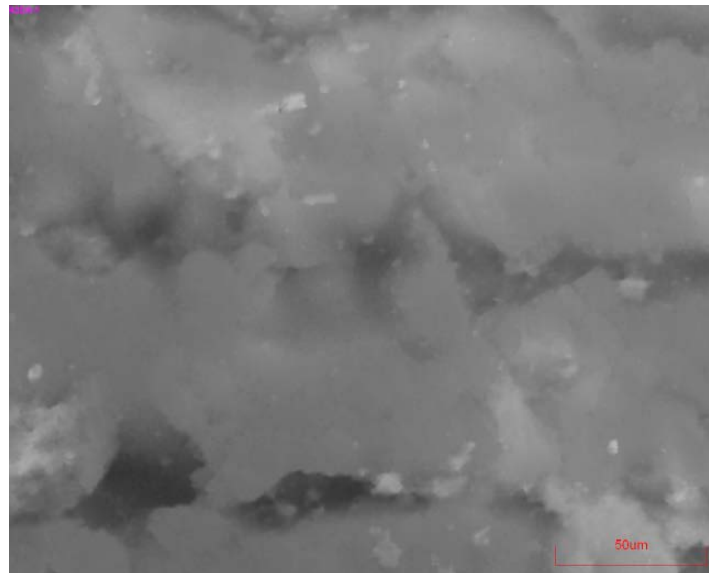


Ilustración 17 – Rugosidad superficial de anillo comprimido sin recubrimiento

	Sa(um)	Sq(um)	Sz(um)	Ssk	Sku	Sp	Sv	Start:X(um)	Start:Y(um)	End:X(um)	End:Y(um)
F_ZImage25_(X50)_C R3DA-1	1.876	2.438	17.672	-0.631	4.281	8.111	-9.561	0.000	188.426	0.000	235.533

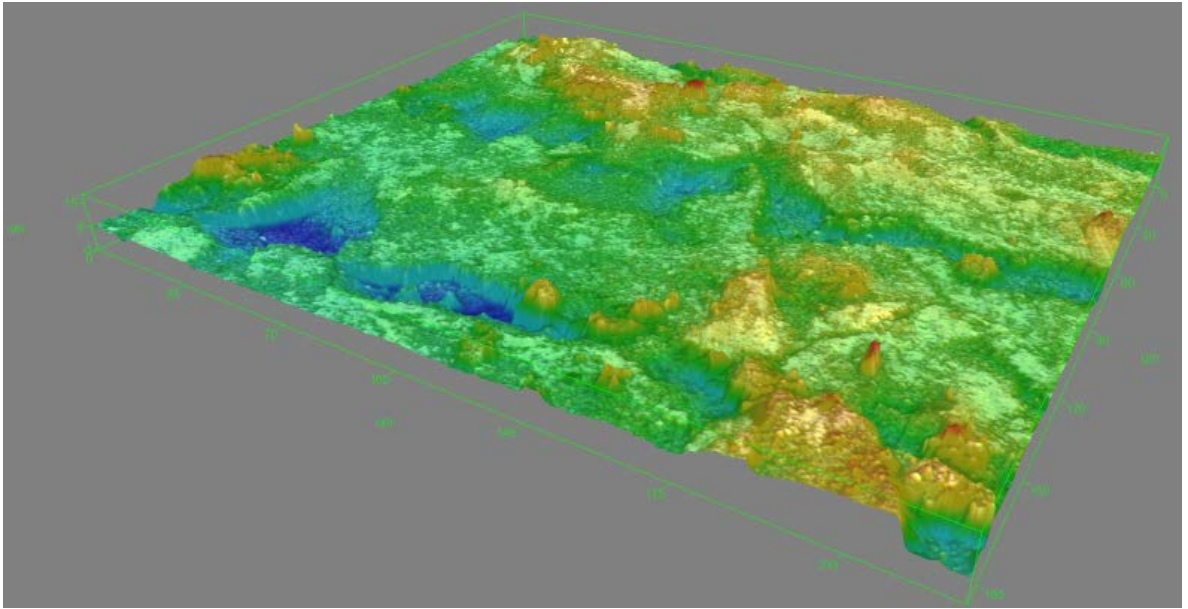


Ilustración 18 - Imagen 3D de anillo comprimido sin recubrimiento

Anexo VIII

Rugosidad

1 Rugosidad medida con el perfilómetro de las herramientas de compresión

Los resultados de la rugosidad medida en las herramientas de compresión brindaron información sobre las características de las superficies.

1.1 Rugosidad de hierro blanco alto en cromo

En las herramientas de hierro blanco alto en cromo se midieron las rugosidades de cada plato por los dos lados, ya que se usaron ambos lados en los ensayos. Esto ocurrió porque este material presentó una porosidad en el centro, como se reportó en la sección 7.2.1.2. La porosidad del material tuvo repercusiones en el flujo del material al comprimirse, por lo que los datos obtenidos en los experimentos realizados con estas herramientas no son muy confiables. El problema de la porosidad pudo haberse evitado maquinando las piezas no de su sección transversal, sino cortando pedazos longitudinales, aunque hubiera sido más costoso.

En la tabla 5.6 se observan las rugosidades medidas y se aprecia que la misma no era regular en las cuatro superficies medidas. El plato superior lado A presentaba una superficie muy lisa, mientras que las tres restantes tenían una superficie más rugosa. Esto se debió a que esas tres caras no fueron rectificadas después de ser cortadas por electroerosión. Esta diferencia de rugosidades es bastante importante y debió haberse evitado. Una rectificación en las superficies hubiera ayudado a tener rugosidades similares en las 4 superficies.

En la superficie del plato superior lado A se puede notar que la rugosidad aumentó después de haber sido usado para realizar las compresiones. En cambio, las superficies más rugosas tuvieron una disminución de la rugosidad. Se puede inferir que las zonas rugosas se comprimieron por la gran fuerza de la máquina universal, reduciendo la altura de los “picos” en la superficie, lo cual conlleva a una

menor rugosidad. La superficie más lisa al ser sometida a los ensayos pudo deformarse, aumentando la rugosidad.

1.2 Rugosidad en acero de alta velocidad

Estas herramientas se midieron sólo por el lado donde se trabajó. El apartado 7.2.1.1 muestra la imagen del microscopio estereoscópico de esta herramienta. Este par de platos no se afectó gran cosa por los ensayos realizados.

En la tabla 5.7 se observa que, en general, la rugosidad de estas superficies se incrementó después de realizar los ensayos. Este incremento en la rugosidad se puede explicar debido a que la superficie original era relativamente lisa, y los ensayos de compresión pudieron haber deformado la superficie, causando un aumento en su rugosidad.

1.3 Rugosidad en anillos antes de compresión

Los anillos antes de comprimirse fueron medidos, los resultados se encuentran en la tabla 5.8.

Se aprecia que el recubrimiento de cobre hace que la rugosidad aumente entre dos y tres veces de la medida cuando no se tiene ningún recubrimiento.

El recubrimiento de grafito no se midió ya que no debería de cambiar la rugosidad de la superficie.

1.4 Rugosidad en anillos después de compresión

En la tabla 5.9 se encuentran las rugosidades en dos direcciones perpendiculares medidas de los anillos después de haber sido ensayados.

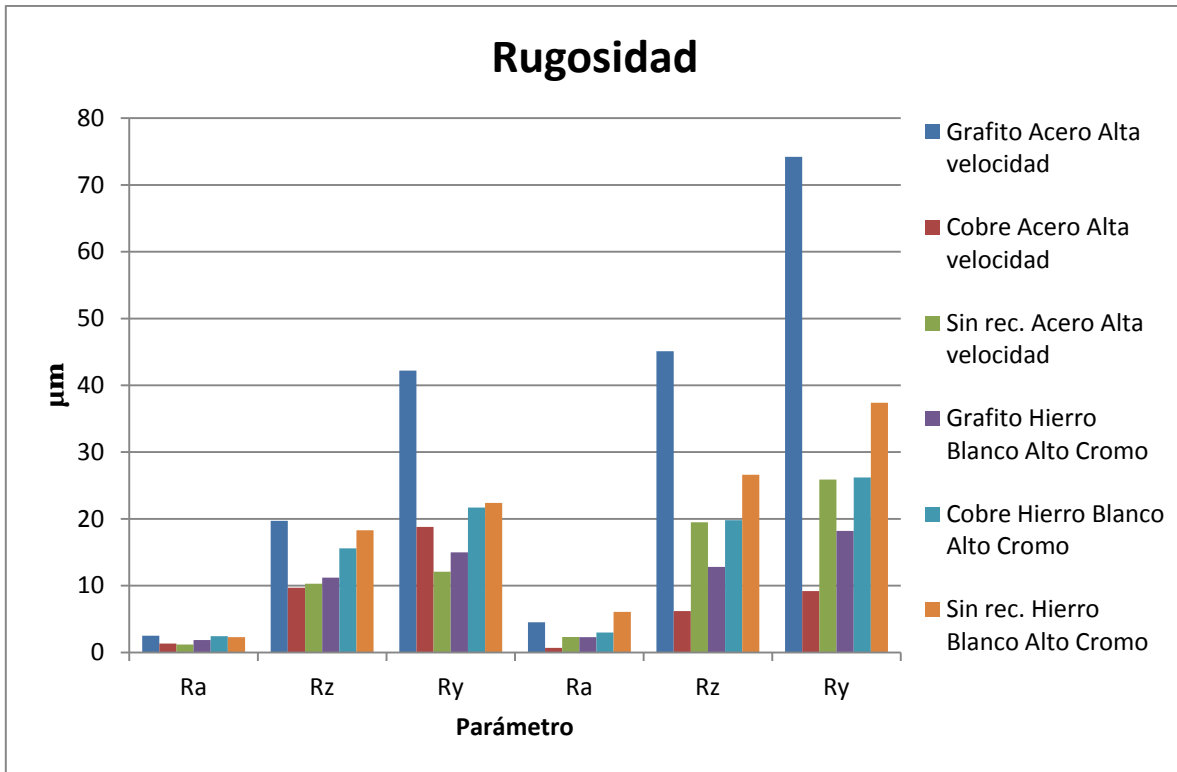


Ilustración A.62 - Rugosidad medida con rugosímetro para distintos anillos

En la gráfica A.1 se observa que el ensayo de compresión con grafito y usando las herramienta del acero de alta velocidad fue el que presentó una mayor rugosidad final. También el ensayo sin recubrimiento con la herramienta de alto cromo presenta una rugosidad más elevada que las de los demás experimentos.

La alta rugosidad presentada por el ensayo sin recubrimiento con la herramienta de hierro blanco puede explicarse debido a que esas pruebas fueron las últimas que se realizaron, cuando la herramienta ya presentaba una porosidad importante.

2 Comparación de mediciones de confocal vs perfilómetro

El microscopio confocal también otorgó valores de la rugosidad, los cuales se encuentran en el anexo VII. Sin embargo, los valores de los parámetros de rugosidad distaron de los calculados con el rugosímetro. Debido a los valores distintos obtenidos con los dos aparatos, no se realizaron muchas mediciones con el microscopio, ya que se tuvo más confianza en el perfilómetro.

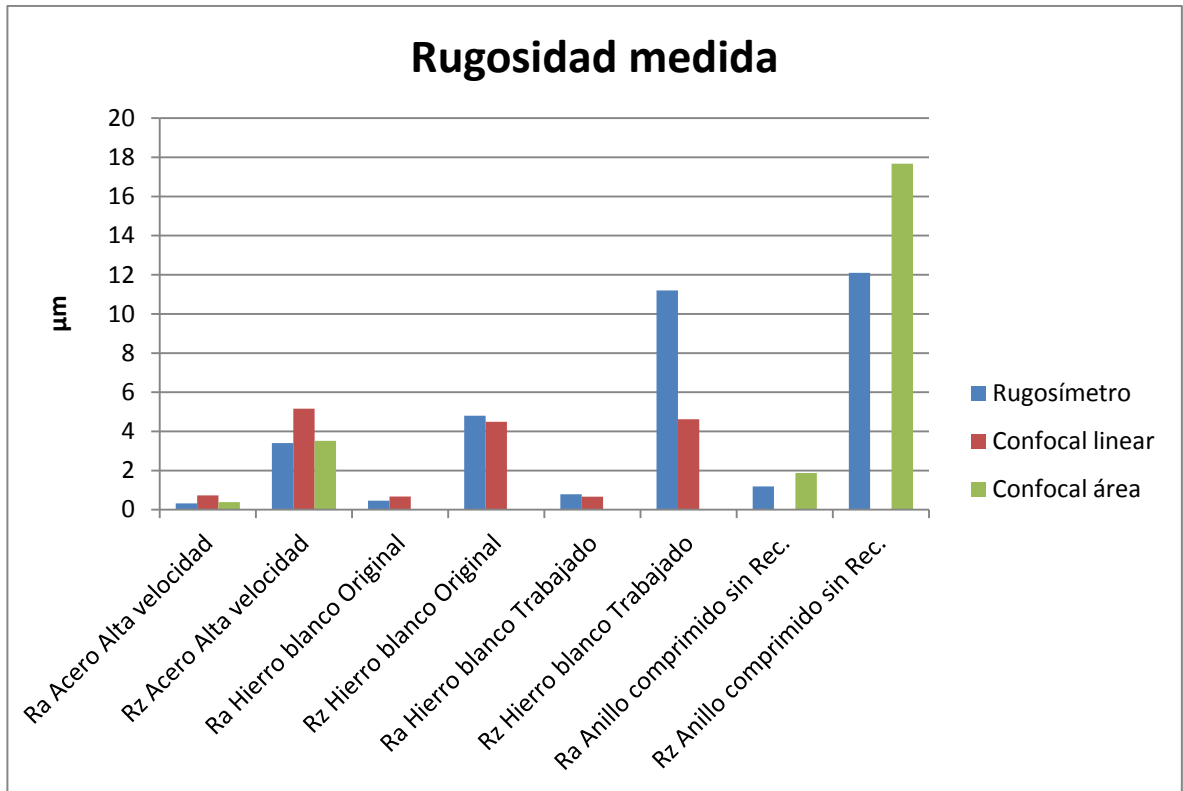


Ilustración A.63 - Comparación de valores de rugosidad

La figura A.2 muestra las diferencias de valores que se obtienen en cada aparato que mide la rugosidad. Se observa que cada aparato obtiene distintos valores, incluso el microscopio obtiene valores distintos al medir una línea y al medir una superficie. Esta diferencia de valores se puede adjudicar a la escasa experiencia que se tiene usando el microscopio confocal.