

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN DE LA ALEACIÓN DE
MAGNESIO AZ31B USANDO EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ANILLO**

MITCHELL ALFREDO GRAJALES ESCÁRRAGA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN DE LA ALEACIÓN DE
MAGNESIO AZ31B USANDO EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ANILLO**

MITCHELL ALFREDO GRAJALES ESCÁRRAGA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

JOHN JAIRO CORONADO MARÍN PH.D

Co-Directora:

SARA AÍDA RODRÍGUEZ PULECIO PH.D



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Ing. John Jairo Coronado Marín, Ph.D
Director del Proyecto

Ing. Sara Aída Rodríguez Pulecio, Ph.D
Co-Directora del Proyecto

Ing. Jairo Antonio Valdés Ortiz, Ph.D
Jurado

Ing. Oscar Vanegas Escalante, M.Sc
Jurado

Santiago de Cali, Marzo 6 de 2014

*A Dios,
A la vida,
Gracias por regalarme un nuevo amanecer*

*A mis padres, Marina y Alfredo,
a mis hermanas, Carolina y Stephanie,
Gracias por su apoyo y amor incondicional,
Los quiero mucho*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a los profesores John Jairo Coronado y Sara Aída Rodríguez por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto, por su apoyo, por su paciencia, por sus múltiples enseñanzas en el campo profesional y principalmente por haber contribuido a mi desarrollo personal.

A la Universidad del Valle, a los miembros de la Escuela de Ingeniería Mecánica y a todos los compañeros del Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS).

A los profesores Julio Cuevas y Oscar Vanegas de la Escuela de Ingeniería de Materiales por su gran colaboración y por brindarme los laboratorios para la realización de este trabajo. Al profesor Fernando Franco que aportó el material de estudio de este trabajo.

A Don Ernesto y Don Vladimir por su colaboración en la fabricación del utillaje y en la instrumentación del ensayo.

A mis amigos, Jaime Jara, Julián Quevedo, Felipe Mejía y Leonel Terán con quienes disfruté y compartí toda mi carrera. Gracias por el apoyo, la compañía y por permitirme entrar en sus vidas durante todos estos años.

A todas las personas que de una u otra manera aportaron para el desarrollo y culminación de este proyecto. A todos ellos, muchas gracias.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1 ANTECEDENTES.....	5
1.2 LAS ALEACIONES DE MAGNESIO.....	7
1.2.1 Denominación de las aleaciones de Magnesio.....	8
1.3 FRICCIÓN EN EL CONFORMADO DE METALES	9
1.4 MODELOS TEÓRICOS DE LA FRICCIÓN.....	10
1.5 MÉTODOS PARA CARACTERIZAR LA FRICCIÓN.....	12
1.6 ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ANILLO.....	14
1.6.1 Cálculo del factor de fricción.....	15
1.6.2 Geometrías utilizadas en el ensayo de compresión de anillo.....	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	18
2.1.1 Caracterización inicial del material base.....	18
2.1.2 Tratamiento térmico	19
2.1.3 Caracterización del material de trabajo	20
2.2 OBTENCIÓN DE MUESTRAS	20

2.2.1	Dimensiones de los anillos.....	20
2.2.2	Construcción de las probetas.....	21
2.3	DISEÑO DEL UTILLAJE	22
2.4	ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE ANILLO	22
2.4.1	Montaje experimental.....	24
2.4.2	Procedimiento experimental.....	26
2.5	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN POR MEDIO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN TEÓRICAS	28
2.6	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ENSAYO PARA LA ALEACIÓN AZ31B MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	30
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	34
3.2	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL UTILLAJE	37
3.2.1	Parámetros funcionales del dispositivo.....	37
3.2.2	Diseño conceptual.....	38
3.2.3	Diseño detallado	40
3.2.3.1	Diseño de las matrices de conformación	40
3.2.3.2	Diseño de la base.....	45
3.2.3.3	Diseño de la camisa	47
3.2.4	Selección de materiales y cálculo de factores de seguridad	49
3.2.4.1	Cálculo de factores de seguridad para los componentes del utillaje	51
3.3	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN UTILIZANDO LA CURVA DE CALIBRACIÓN TEÓRICA.....	52
3.3.1	Macrográficas de las muestras.....	53
3.3.2	Comparación del factor de fricción para las condiciones de lubricación evaluadas a 250°C	54

3.3.3 Comparación del factor de fricción para las condiciones de lubricación evaluadas a 350°C	55
3.3.4 Desempeño de las condiciones de lubricación con la temperatura.....	56
3.4 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ENSAYO PARA LA ALEACIÓN AZ31B MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	57
4. CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelos de fricción utilizados en los procesos de deformación plástica	12
Figura 2. Métodos experimentales para calcular la fricción. (a) Ensayo pin sobre disco; (b) Ensayo de compresión de anillo	13
Figura 3. Variación de la geometría del anillo en el ensayo. (a) Antes del ensayo; (b) Después del ensayo con fricción baja; (c) Después del ensayo con fricción alta	15
Figura 4. Parámetros utilizados en la determinación del factor de fricción	16
Figura 5. Curvas de calibración teóricas de la fricción utilizadas en el ensayo de compresión de anillo (a) en términos de m y (b) en términos de μ	17
Figura 6. Geometrías utilizadas en el ensayo de compresión de anillo	17
Figura 7. Toma de muestras metalográficas y de dureza para el material base.....	19
Figura 8. Dimensiones de las probetas	20
Figura 9. Esquema de fabricación de las probetas a partir de placas de AZ31B.....	21
Figura 10. Prensa hidráulica con capacidad hasta 1000 kN	23
Figura 11. Montaje experimental para registrar el desplazamiento del cabezal inferior	25
Figura 12. Montaje experimental para el calentamiento del utillaje.....	26
Figura 13. Matrices lubricadas con grafito	27
Figura 14. Procedimiento para el calentamiento del utillaje a las temperaturas de prueba.....	27
Figura 15. Procedimiento para la conformación de las muestras	28
Figura 16. Medición de las dimensiones finales de las muestras	29
Figura 17. Curvas de calibración teóricas de la fricción propuestas por DePierre et al	29
Figura 18. Probeta utilizada para la prueba de compresión estandarizada. Medidas en milímetros.....	30
Figura 19. Montaje experimental para registrar la carga y el desplazamiento del cabezal de la máquina.....	31
Figura 20. Modelo de elementos finitos para la determinación de las curvas de calibración. (a) Geometría; (b) Enmallado.....	32

Figura 21. Microestructura de la sección longitudinal del material base de la aleación AZ31B. Fotografía a 100 aumentos	34
Figura 22. Microestructura de la sección transversal del material base de la aleación AZ31B. Fotografía a 100 aumentos	35
Figura 23. Microestructura en dirección longitudinal de la aleación AZ31B con tratamiento térmico de recocido. Fotografía a 100 aumentos	35
Figura 24. Microestructura de la sección transversal del material base de la aleación AZ31B con tratamiento térmico de recocido. Fotografía a 100 aumentos	36
Figura 25. Horno portátil utilizado por Shahriari et al. en el ensayo de compresión de anillo en caliente	38
Figura 26. Dispositivo de conformación utilizado por Matuda en el ensayo de compresión de anillo en caliente. (a) Ensemble; (b) Partes del dispositivo	39
Figura 27. Diseño conceptual del utillaje para el ensayo de compresión de anillo. (a) Vista isométrica; (b) Partes del dispositivo	40
Figura 28. Condiciones de borde aplicadas a los modelos de elementos finitos para la (a) matriz superior y la (b) matriz inferior	41
Figura 29. Enmallado del modelo de elementos finitos para las matrices. (a) Matriz superior; (b) Matriz inferior	43
Figura 30. Curvas de convergencia de los modelos de elementos finitos para la (a) matriz superior y la (b) matriz inferior	44
Figura 31. Campo de esfuerzos de Von Mises para las matrices de conformación. (a) Matriz superior; (b) Matriz inferior	44
Figura 32. Condiciones de borde aplicadas al modelo de elementos finitos para la base	45
Figura 33. Enmallado del modelo de elementos finitos para la base	46
Figura 34. Curva de convergencia del modelo de elementos finitos para la base	46
Figura 35. Campo de esfuerzos de Von Mises para la base	47
Figura 36. Tolerancias dimensionales para (a) la camisa y (b) las matrices. Medidas en milímetros	47
Figura 37. Juego mínimo entre la matriz y la camisa	48
Figura 38. Utillaje construido para la realización del ensayo de compresión de anillo	51

Figura 39. Interpolación de datos en las curvas de calibración teóricas para las condiciones de lubricación evaluadas (a) a 250 °C y (b) a 350 °C.....	52
Figura 40. Macrografía de las muestras	53
Figura 41. Comparación del factor de fricción a 250 °C	54
Figura 42. Comparación del factor de fricción a 350 °C	55
Figura 43. Dependencia del factor de fricción en la temperatura para varias condiciones de lubricación	56
Figura 44. Curvas promedio de fluencia para la aleación de Magnesio AZ31B.....	57
Figura 45. Curvas de calibración del ensayo para la aleación de Magnesio AZ31B	58
Figura 46. Validación de las curvas de calibración con resultados teóricos	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Código de letras para la designación del sistema de aleaciones de Magnesio	9
Tabla 2. Composición química nominal de la aleación AZ31B.....	9
Tabla 3. Composición química (% en peso) del material base, aleación de Mg AZ31B	18
Tabla 4. Propiedades de la aleación de Mg AZ31B	18
Tabla 5. Composición química del Talco Nacional	23
Tabla 6. Variables del ensayo y número de experimentos realizados	24
Tabla 7. Orden de ejecución de los ensayos.....	24
Tabla 8. Dureza del material antes y después del tratamiento térmico.....	37
Tabla 9. Resultados del ensayo preliminar de compresión de anillo a temperatura ambiente	41
Tabla 10. Propiedades del acero AISI 1045	42
Tabla 11. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la matriz superior	43
Tabla 12. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la matriz inferior	43
Tabla 13. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la base	46
Tabla 14. Propiedades del acero AISI O1 a 55 HRC	50
Tabla 15. Resultados del factor de fricción para cada condición evaluada.....	53

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en la caracterización del fenómeno de la fricción en la aleación de Magnesio AZ31B a través de la determinación del factor de fricción, para diferentes condiciones de lubricación y de temperaturas de conformado, usando el Ensayo de Compresión de Anillo. Inicialmente se caracterizó la microestructura y se realizaron mediciones de dureza en sentido transversal y longitudinal para el material de estudio. Para la realización de los ensayos se construyó un utillaje acoplable a la máquina de ensayos y se realizaron los ensayos de compresión de anillo bajo condiciones de lubricación en seco, grafito y talco y para temperaturas de 250 y 350 °C. Para cada condición se determinó el factor de fricción a partir de una curva de calibración teórica de la fricción. Se utilizó un programa de elementos finitos especializado en procesos de conformado para construir las curvas de calibración del ensayo para la aleación de Magnesio AZ31B considerando las variables principales del experimento tales como la temperatura, la velocidad de deformación, el modelo numérico de fricción y el porcentaje de deformación de altura. Los resultados mostraron el factor de fricción aumenta proporcionalmente con la temperatura. En cuanto a la evaluación de las condiciones de lubricación, el grafito fue el que presentó el mejor desempeño durante la ejecución de los ensayos y se propone como el lubricante más adecuado para la conformación en tibio de este tipo de materiales, no obstante el talco presentó un desempeño muy similar al grafito a temperaturas de 250°C.

Palabras claves: Ensayo de compresión de anillo, aleaciones de Magnesio, fricción, conformación de metales, lubricación, método de elementos finitos.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de Magnesio se presentan como una nueva alternativa para la construcción de estructuras livianas, partes de automóviles, aplicaciones en la industria aeronáutica etc. Esta aleación es la más ligera de las aleaciones estructurales: es 1.5 más ligero que el aluminio y 4.3 más que el acero [1], además de poseer buena rigidez y una mejor relación resistencia-peso comparado con los materiales mencionados antes. Un ejemplo es la aleación de Magnesio AZ31B la cual posee buena resistencia y ductilidad a temperatura ambiente acompañada de buena resistencia a la corrosión y soldabilidad [2].

Así, este tipo de materiales presentan una muy buena opción para desarrollar productos aplicados en el entorno nacional. Sin embargo, debido a que este tipo de aleaciones posee una estructura cristalina hexagonal compacta HCP, tiene pobres niveles de conformabilidad a temperatura ambiente. Por ello, estas aleaciones son usualmente conformadas en caliente o en niveles de temperatura intermedias entre la conformación en caliente y en frío. Este concepto se conoce como *warm forming* o conformación en tibio [3].

El fenómeno predominante en la conformación de metales es la fricción que se genera en la interfase entre la herramienta y la pieza de trabajo. Al considerarse la fricción como el efecto más importante en las operaciones de conformado, por lo tanto, tiene que ser controlada adecuadamente para optimizar los procesos y, a su vez, producir de una manera económica productos con una geometría y propiedades deseadas. El control efectivo de la fricción, requiere contar con datos exactos de las principales variables que influyen en los procesos de conformado, algunas de éstas son la lubricación, la temperatura del proceso y la topografía de los cuerpos en contacto [4] [5]. Por tanto se han desarrollado numerosos métodos para caracterizar este fenómeno [6].

Dentro de estos métodos experimentales se encuentra el Ensayo de Compresión de Anillo, en el cual se caracteriza la fricción por medio de alteraciones en la geometría de un anillo, donde la contracción o expansión del diámetro interno del anillo y el cambio en su espesor indican la condición de fricción de la probeta [7]. Estos cambios dimensionales se encuentran tabulados en gráficos conocidos como curvas de calibración para diferentes valores de fricción, que están en términos del coeficiente de fricción μ y en términos del factor de fricción interfaseal

m. Gracias a la simplicidad de este ensayo es uno de los más utilizados para la caracterización de la fricción en condiciones de conformación plástica.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar el fenómeno de la fricción en la aleación de Magnesio AZ31B a través de la determinación del factor de fricción interfasial, para tres condiciones de lubricación y dos niveles de temperaturas de conformado, usando el Ensayo de Compresión de Anillo. Con este proyecto se pretende incentivar la investigación, utilización y desarrollo de productos a base de materiales ligeros como lo son las aleaciones de Magnesio a través del conocimiento de las condiciones adecuadas de conformado de estos materiales utilizando el Ensayo de Compresión de Anillo que se destaca por ser un método sencillo y confiable para caracterizar la fricción en la conformación de metales. Este trabajo hace parte de la línea de investigación en Tribología del Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el factor de fricción de la aleación de Magnesio AZ31B para tres diferentes condiciones de lubricación y dos niveles de temperatura usando el Ensayo de Compresión de Anillo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir el utillaje que garantice las condiciones óptimas de lubricación y temperaturas de las probetas durante el desarrollo de las pruebas.
- Caracterizar la microestructura y medir la dureza del material
- Determinar el factor de fricción bajo la condición de lubricación en seco para niveles de temperatura de 250 y 350 °C usando el Ensayo de Compresión de Anillo.
- Determinar el factor de fricción bajo condiciones de lubricación usando grafito y talco para niveles de temperatura de 250 y 350 °C usando el mismo ensayo.
- Obtener mediante un modelo de elementos finitos las curvas de calibración del ensayo para la aleación AZ31B.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 ANTECEDENTES

El Ensayo de Compresión de Anillo es un método sencillo y efectivo para caracterizar el fenómeno de la fricción en los procesos de conformado de metales. La prueba se inició con Kunogi [8], y fue mejorada por Male y Cockcroft [9]. Avitzur [10] y Hawkyard y Johnson [11] llevaron a cabo estudios teóricos de esta prueba trazando las primeras curvas de calibración considerando el factor de fricción interfásial constante. Posteriormente Male realizó una comparación entre el factor de fricción interfásial y el coeficiente de fricción en relación a las condiciones reales de fricción en los procesos de conformado. Concluyó que el factor de fricción interfásial otorga los valores más realistas al momento de determinar las condiciones de fricción en el conformado [12]. DePierre *et al.* [13] trazaron nuevas curvas de calibración que incluyeron el efecto de abarrilamiento que se presenta en el cuerpo de estudio durante la ejecución del ensayo. El material se modeló como un material perfectamente plástico sin acritud.

En las formulaciones anteriores se asume que las curvas de calibración no dependen de las propiedades del material. Sin embargo Sofuoglu *et al.* [4] llevaron a cabo el ensayo de compresión de anillo para diferentes materiales con el fin de investigar el efecto de las propiedades del material, velocidad de deformación (*Strain rate*) y el abarrilamiento en el comportamiento de las curvas de calibración de la fricción. También realizó una simulación computacional usando un modelo elasto-plástico. Los resultados experimentales y del análisis por elementos finitos indicaron que las propiedades del material, la velocidad de deformación y el abarrilamiento tienen influencia en las curvas de calibración de la fricción. Así, aunque la prueba de compresión de anillo es un método efectivo para determinar la fricción, su exactitud será mayor cuando sean tenidos en cuenta tanto el comportamiento del material como las condiciones del ensayo.

A pesar que el ensayo se fundamenta principalmente en el forjado de un anillo, también es aplicable para determinar la fricción en los demás procesos de conformado de metales para diferentes condiciones de temperatura y de lubricación. Kunogi [8] fue el primero en emplear el ensayo para comparar lubricantes utilizados en el proceso de extrusión en frío. Recientemente Domínguez [14] estudió el coeficiente de fricción mediante la prueba de compresión de anillo para el proceso de laminación en frío, con el fin de predecir los parámetros más adecuados para llevar a cabo este proceso. El estudio se

realizó para dos aceros de bajo carbono y cuatro diferentes condiciones de lubricación a diferentes porcentajes de reducción en el espesor del anillo.

En los últimos años el ensayo de compresión de anillo está siendo empleado en materiales para aplicaciones especiales. El nuevo enfoque metodológico de esta prueba sugiere combinar la parte experimental con el método de elementos finitos. Matuda [15] realizó el ensayo para la aleación de Aluminio AA6351-T4 evaluando dos condiciones de lubricación y tres niveles de temperatura. Seguidamente se hizo la simulación numérica del ensayo por el método de elementos finitos usando dos software comerciales (QFORM 2D/3D y COSMOSM) y se compararon los resultados de las simulaciones con los resultados del ensayo experimental.

Shahriari *et al.* [16] realizaron la caracterización experimental de la fricción en el forjado en caliente de la superaleación Nimonic 115 para dos condiciones diferentes de temperatura (1100 y 1175 °C) y cuatro condiciones de lubricación (seco, grafito, vidrio y mica), aplicando el mencionado ensayo. El objetivo principal de esta investigación fue determinar el lubricante adecuado e identificar el comportamiento de la fricción en el forjado de este tipo de materiales. Por medio del método de elementos finitos se elaboraron las curvas de calibración de fricción entre la matriz y la pieza de trabajo con la particularidad de que la simulación incorporó el efecto que tiene la variación de la temperatura en el flujo del material. El lubricante que tuvo mejor desempeño fue la mica ya que obtuvo los menores valores de fricción a las temperaturas evaluadas. Además los autores mostraron que los valores de fricción entre la matriz y la pieza aumentan proporcionalmente con la temperatura.

Zhu *et al.* [17] determinaron el factor de fricción para el forjado en caliente de la aleación de Titanio Ti-6Al-4V usando la prueba de compresión de anillo y el método de elementos finitos. La prueba consistió en determinar los factores de fricción interfase para diferentes condiciones de lubricación (seco y vidrio), a una temperatura de 940 °C y para porcentajes de reducción de altura de 30 y 50%. Las curvas de calibración del ensayo se calcularon usando el software de elementos finitos DEFORM 3D utilizando un modelo termomecánico acoplado donde se tuvo en cuenta el coeficiente de transferencia de calor entre la interfase matriz-pieza. Como resultado principal se obtuvo que la velocidad de flujo del material aumenta proporcionalmente con el coeficiente de transferencia de calor. Esto se debe a que un incremento en dicho coeficiente afecta directamente la temperatura en la interface matriz-pieza, esto tiene efectos directos en la velocidad de flujo del material, esto trae como consecuencia el incremento en la fricción.

Camacho *et al.* [18] aplicaron el ensayo para determinar las curvas de calibración para diferentes aleaciones metálicas empleadas habitualmente en la práctica industrial del conformado de metales. Los materiales de estudio fueron: acero 1045, acero inoxidable 304, aleación de Aluminio AA2024, aleación de Cobre C11000, aleación de Titanio Ti-6Al-4V y aleación de Níquel Inconel 600. Se empleó el programa DEFORM-F2 para determinar las curvas de calibración para cada material. Cada uno de los modelos numéricos se validaron por comparación con los resultados teóricos obtenidos por DePierre *et al.* [13]. Luego se compararon las curvas de calibración para cada material y se concluyó que existen diferencias en las curvas de un material a otro, y que dichas diferencias, si bien son pequeñas para procesos con bajo factor de fricción, se van incrementando conforme dicho valor aumenta.

Matsumoto y Osakada [19] emplearon el ensayo para estudiar el efecto de la fricción en el forjado en tibio de la aleación de Magnesio ZK60 utilizando seis condiciones diferentes de lubricación. Los autores informan que las aleaciones de Magnesio poseen un rango ideal de temperaturas de conformación que oscila entre los 200 y los 400°C, ya que si se eleva la temperatura por encima de ese rango el material se oxida. Por esto la prueba se realizó a una temperatura entre 200 y 300°C.

1.2 LAS ALEACIONES DE MAGNESIO

El Magnesio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, constituyendo el 2.7% en masa y es el tercero más abundante en el agua de mar. Como polvo, es extremadamente reactivo pero como sólido se oxida lentamente al aire y reacciona lentamente en el agua. Este elemento es uno de los metales estructurales más ligeros, es 1.5 más ligero que el Aluminio y 4.3 más que el acero [1], por lo que este elemento es utilizado actualmente en aplicaciones donde el peso es un factor crítico.

El Magnesio es raramente usado para aplicaciones ingenieriles, sin ser aleado con otros metales. Generalmente, el Aluminio, Zinc, Manganeso, Tierras Raras, Zirconio, Cobre y Torio, son adicionados para mejorar sus propiedades mecánicas, en especial su relación resistencia-peso.

El uso de estas aleaciones ha crecido considerablemente durante los últimos años, principalmente en la industria automotriz y aeronáutica, en la que se desea

reducir el peso de los vehículos, con el fin de disminuir el consumo de combustible y mejorar su eficiencia [20]. Otras características que hacen que las aleaciones de Magnesio sean de interés son:

- Su baja densidad
- Buena resistencia específica
- Excelentes resultados al crear piezas por fundición
- Se pueden obtener piezas con buena precisión dimensional
- Fácil de mecanizar con buenas características de acabado
- Buena soldabilidad
- Alta conductividad tanto térmica como eléctrica
- Buena resistencia a la corrosión
- Altamente reciclable

Sin embargo, estos materiales poseen desventajas que limitan su rango de aplicación. Estas son:

- Bajo módulo de elasticidad y dureza
- Baja capacidad de conformado a temperatura ambiente
- Altos costos de producción en comparación con el Aluminio
- Alta reactividad química
- La resistencia específica y la resistencia al creep se ven afectadas dramáticamente a altas temperaturas

Las aleaciones de Magnesio se encuentran en el comercio en casi todas las formas usuales para los metales entre ellas: lingotes, piezas fundidas en arena, en moldes permanentes y en matrices, piezas forjadas, barras, varillas, tubos, formas específicas de extrusión, planchas y láminas.

1.2.1 Denominación de las aleaciones de Magnesio

Las aleaciones de Magnesio son designadas por un sistema establecido por la norma ASTM B951 [21] en el que las primeras dos letras indican los dos elementos de aleación presentes en mayor cantidad. Las letras son ordenadas en forma decreciente según porcentajes, o alfabéticamente si los elementos se encuentran en igual proporción. Las letras son seguidas de sus respectivos porcentajes redondeados a números enteros, seguidos por una letra final de serie.

Esta letra de serie indica alguna variación en composición de algún constituyente aleante menor, o impurezas. Las letras que designan los constituyentes de aleación más comunes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Código de letras para la designación del sistema de aleaciones de Magnesio

Letra	Elemento Aleante
A	Aluminio
C	Cobre
E	Tierras Raras
H	Torio
K	Zirconio
L	Litio
M	Manganeso
Q	Plata
S	Silicio
Z	Zinc

Fuente: Adaptado de [21]

Por ejemplo, la aleación de Magnesio AZ31B contiene 3% de Aluminio (código de letra A) y 1% de Zinc (código de letra Z) mientras que la letra B significa que es la segunda aleación registrada en su serie. La composición química nominal de esta aleación se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química nominal de la aleación AZ31B

Designación		Composición química (% en peso)									
ASTM	UNS	Al	Li	Mn	Ni	Zn	Ca	Cu	Fe	Si	Tierras raras
AZ31B	M11311	2.5-3.5	--	0.20-1.0	0.005	0.6-1.4	0.04	0.05	0.005	0.1	--

Fuente: [21]

1.3 FRICCIÓN EN EL CONFORMADO DE METALES

En los procesos de conformación de metales (laminado, extrusión, forjado, etc) la fricción se genera debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta o matriz y el material de trabajo, los materiales involucrados, la topografía de los cuerpos y las condiciones de trabajo [22]. La fricción es un evento indeseable por las siguientes razones:

- Retarda el flujo del material ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos en el producto final.

- Se incrementan las fuerzas y la potencia requerida para desempeñar la operación. También se incrementa la generación de calor en la interfaz herramienta-pieza.
- El desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da como resultado piezas defectuosas y el reemplazo continuo de las herramientas. Este factor es de gran importancia ya que las herramientas son generalmente costosas.

Uno de los métodos más comunes para evitar los efectos negativos de la fricción en el conformado ha sido la aplicación de lubricantes entre las dos superficies. La lubricación evita el desgaste, la erosión y el depósito de material en la matriz, disminuye la acción de contaminantes, la aparición de inclusiones y la formación de gases durante el proceso. Además, durante el trabajo en caliente, la capa de lubricante actúa como aislante térmico disminuyendo la pérdida de calor hacia el medio exterior. La aplicación de lubricantes también tiene una directa influencia en la economía de estos procesos, ya que disminuyen la energía requerida para deformar plásticamente el material, tienen un costo relativamente bajo y son de fácil aplicación y remoción. Por lo tanto, el entendimiento del fenómeno de la fricción en el conformado es importante para comprender lo que realmente sucede en la interfaz herramienta-pieza bajo diversas condiciones de trabajo con el propósito de optimizar este tipo de procesos de fabricación.

En el conformado en frío el lubricante se aplica en la pieza, siendo los lubricantes líquidos los más utilizados, por ejemplo los aceites de origen mineral. En el conformado en caliente se utilizan lubricantes sólidos mezclados en aceite mineral o sintético, en agua o en grasa. A diferencia del conformado en frío, el lubricante se aplica en las matrices de conformación. Entre los lubricantes sólidos más comunes se pueden mencionar el grafito, el bisulfuro de Molibdeno (MoS_2) y el vidrio [23]. Otros lubricantes sólidos que también tienen una buena aceptación son el estearato de Zinc, el nitrato de Boro, el talco y el teflón (PTFE).

1.4 MODELOS TEÓRICOS DE LA FRICCIÓN

La fricción se puede definir como la resistencia al movimiento relativo de un cuerpo sobre otro bajo una carga normal, los cuerpos en cuestión pueden ser un gas y un sólido (fricción aerodinámica), o un líquido y un sólido (fricción líquida) o en el caso presente, a los efectos de la fricción sólida que es la que se manifiesta

entre dos cuerpos sólidos [24]. Existen varios modelos representativos de la fricción en los procesos de deformación plástica, dentro de los cuales se destacan dos: el modelo de Amonton-Coulomb y el modelo de fricción constante.

El modelo de fricción de Amonton-Coulomb, también conocida como la ley clásica de fricción, está basado en los trabajos desarrollados anteriormente por Leonardo da Vinci y Amonton (1663-1705), y se define como:

$$\tau = \mu p \quad (1.1)$$

Este modelo muestra que el esfuerzo cortante (τ) en cualquier punto de la superficie es proporcional a la presión normal (p) entre los dos cuerpos en contacto. El factor de proporcionalidad (μ) se conoce como el **coeficiente de fricción** y es considerado como constante para una herramienta y material específico, en condición de superficie (rugosidad) y temperatura constantes. Este modelo solo se aplica para bajas presiones. Cuando se presentan presiones muy altas, como es el caso de los procesos de conformación de metales, estos pueden alcanzar valores superiores a los del esfuerzo cortante haciendo que el valor del coeficiente de fricción disminuya considerablemente y que muestren valores poco acordes a la realidad.

El modelo de fricción constante o ley de Prandtl, que se aplica para altas presiones, asume que en los cuerpos en contacto el esfuerzo cortante (τ) es proporcional al esfuerzo cortante crítico de fluencia (k) del material, resultando la siguiente expresión:

$$\tau = mk \quad (1.2)$$

Donde (m) se conoce como el factor cortante de fricción interfásial o solamente **factor de fricción**. Este factor varía de 0 (condición de fricción nula) a 1 (condición de fricción máxima acompañada del fenómeno de adhesión). Este factor, al igual que el coeficiente de fricción, también depende de los materiales y las superficies en contacto, de las condiciones de lubricación y de la temperatura en la Interfase matriz-pieza [25].

De acuerdo al criterio de fluencia de Von Mises el valor de k también puede ser expresado como:

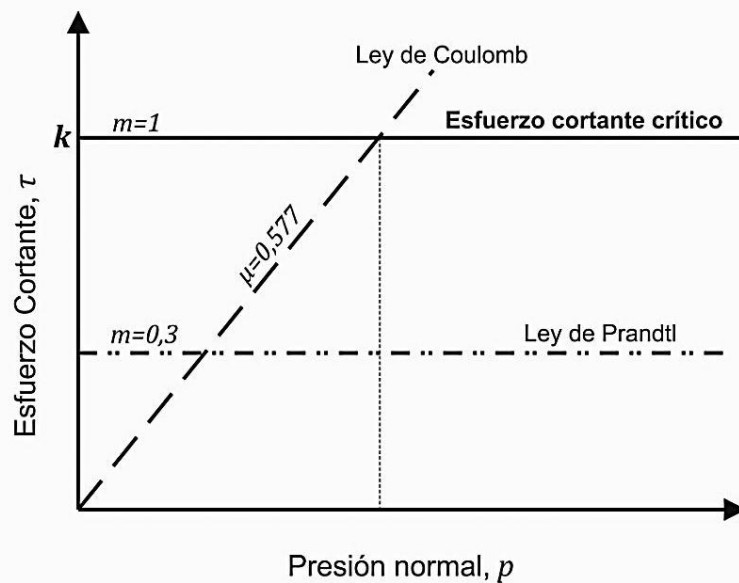
$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (1.3)$$

Donde σ_0 es el esfuerzo de fluencia del material. Luego, reemplazando la ecuación 1.3 en la 1.2 tenemos:

$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (1.4)$$

De este modo se puede expresar el modelo de fricción constante en términos del esfuerzo de fluencia del material. La Figura 1 muestra una representación esquemática de los modelos de fricción discutidos anteriormente, presentando la evolución del esfuerzo cortante en la interfase en función de la presión normal entre los cuerpos en contacto.

Figura 1. Modelos de fricción utilizados en los procesos de deformación plástica



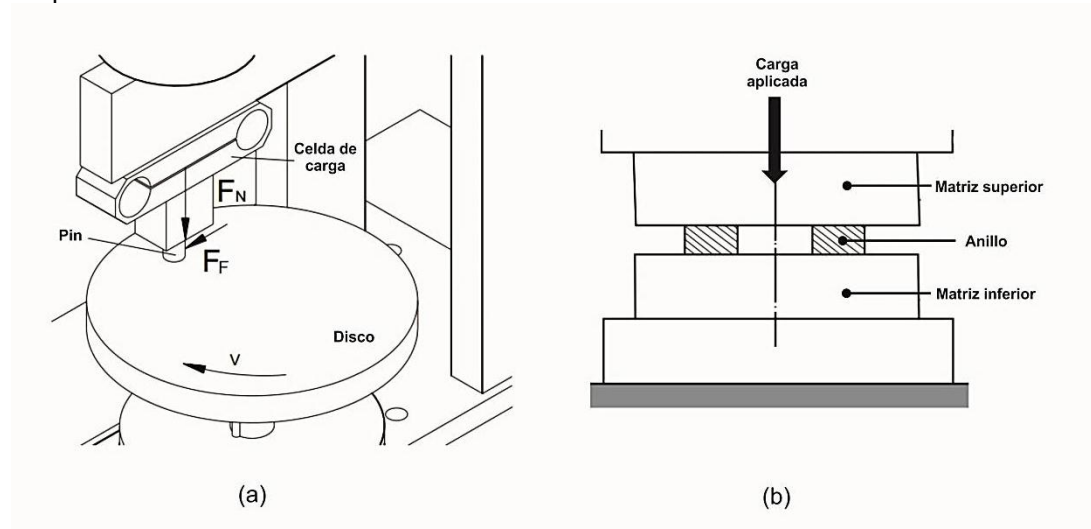
1.5 MÉTODOS PARA CARACTERIZAR LA FRICCIÓN

Debido a que la fricción se presenta a causa de la respuesta entre dos sistemas, existen numerosos ensayos para su caracterización y su efectividad depende de la manera como el modelo represente las condiciones reales de operación. En el ASM Handbook Vol 18 [5] se presentan 23 ensayos normalizados para medir la fricción entre los cuerpos, puesto que cada configuración de ensayo corresponde a una determinada condición tribológica.

En estos ensayos normalizados la fricción se clasifica como alta o baja en función de la medida de la fuerza de fricción que se obtiene directamente por instrumentación como es el caso del ensayo pin sobre disco (ver Figura 2a) o indirectamente, como en el método del plano inclinado, en el que se mide el ángulo para el cual el cuerpo vence la fricción e inicia el movimiento. Estos ensayos tienen la particularidad de que los cuerpos en contacto no presentan deformación volumétrica.

Existen otros tipos de ensayos que aunque no están normalizados, son utilizados para medir la fricción entre cuerpos que están en contacto y en condiciones donde por lo menos uno de los dos cuerpos sufre deformación plástica volumétrica. Entre estos ensayos se encuentra **el Ensayo de Compresión de Anillo**, en el cual se caracteriza la fricción por medio de alteraciones en la geometría de un anillo, donde la contracción o expansión del diámetro interno del anillo indica la condición de fricción de la probeta (ver Figura 2b). Gracias a la simplicidad de este ensayo es uno de los más utilizados para la caracterización de la fricción en condiciones de conformación plástica [26]. Además la prueba no requiere la medición de las cargas de compresión. Adicionalmente, esta prueba también puede ser usada para caracterizar lubricantes y se puede determinar en qué porcentaje de deformación falla el lubricante.

Figura 2. Métodos experimentales para calcular la fricción. (a) Ensayo pin sobre disco; (b) Ensayo de compresión de anillo



Fuente: Adaptado de [27]

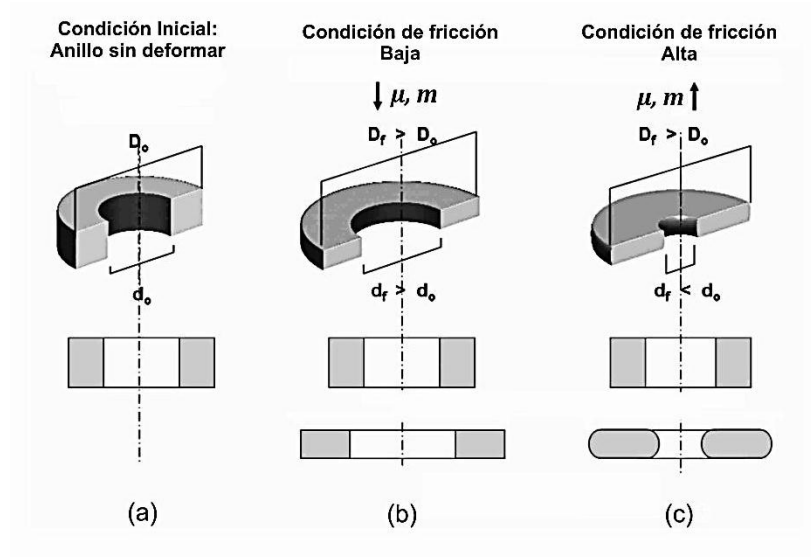
1.6 ENSAYO DE COMPRESIÓN DE ANILLO

El ensayo de compresión de anillo (*ring compression test*) es un ensayo tribológico en el que se relacionan los cambios dimensionales de un cuerpo sometido a compresión con la fricción. Esta prueba consiste en el forjado libre de una pieza en forma de anillo (Figura 3a) entre dos matrices planas mediante el cual es posible evaluar la fricción entre las superficies en contacto en función del cambio de diámetro del anillo y del cambio en su espesor. Este cambio dimensional depende de las condiciones de fricción que hay entre la interfaz herramienta-anillo. Cabe destacar que la fuerza es una propiedad necesaria nada más para deformar el anillo, pero no tiene influencia en la valoración de la fricción. Durante la ejecución del ensayo se pueden presentar las siguientes situaciones:

- Para el caso ideal, cuando no hay fricción entre el anillo y las matrices, el anillo se deforma como si fuera un disco comprimido bajo condiciones de deformación homogénea en donde cada elemento de él fluye radialmente hacia fuera de manera proporcional.
- Cuando se presenta un valor pequeño de fricción entre las superficies en contacto, el material fluye hacia fuera en menor grado comparándolo con el caso ideal (sin fricción) para una misma cantidad de compresión. Así, el anillo experimenta un aumento del diámetro interno (Figura 3b).
- Para una determinada reducción de altura la fricción excede un valor crítico en el que la resistencia friccional del flujo hacia fuera se hace tan grande que una porción del material del anillo fluye en dirección hacia el centro del mismo, lo que ocasiona la disminución del diámetro interno (Figura 3c).

De manera que la medición del diámetro interno del anillo comprimido proporciona un medio efectivo para el estudio de la fricción interfásica, ya que el diámetro interno aumenta si la fricción es baja y disminuye si la fricción es alta. La condición de fricción entre las superficies en contacto es cuantificada mediante la determinación del factor de fricción interfásica m o el coeficiente de fricción μ , dependiendo del modelo de fricción que más se ajuste a las condiciones del ensayo.

Figura 3. Variación de la geometría del anillo en el ensayo. (a) Antes del ensayo; (b) Después del ensayo con fricción baja; (c) Después del ensayo con fricción alta



Fuente: Adaptado de [15]

1.6.1 Cálculo del factor de fricción

El factor de fricción (o coeficiente de fricción) de una prueba de compresión de anillo se obtiene calculando el porcentaje de reducción de altura del anillo R_h y el porcentaje de reducción del diámetro interno del anillo R_i . A partir de la Figura 4 se tiene que:

$$R_h = \left(\frac{h_0 - h_f}{h_0} \right) \times 100 \quad (1.5)$$

$$R_i = \left(\frac{d_{int,0} - d_{int,f}}{d_{int,0}} \right) \times 100 \quad (1.6)$$

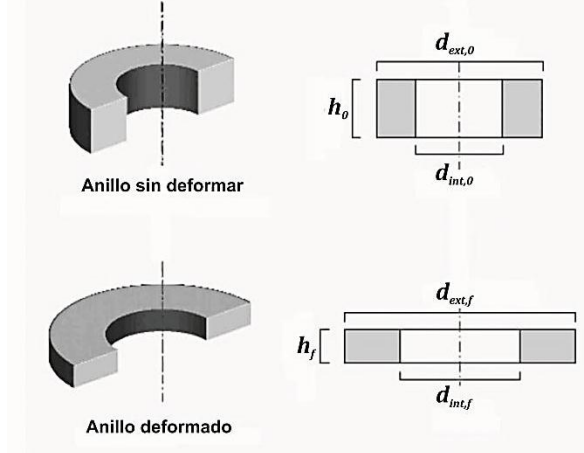
Donde:

$d_{ext,0}$ y $d_{ext,f}$: Diámetro externo inicial y externo final del anillo respectivamente.

$d_{int,0}$ y $d_{int,f}$: Diámetro interno inicial e interno final del anillo respectivamente.

h_0 y h_f : Altura inicial y final del anillo respectivamente.

Figura 4. Parámetros utilizados en la determinación del factor de fricción



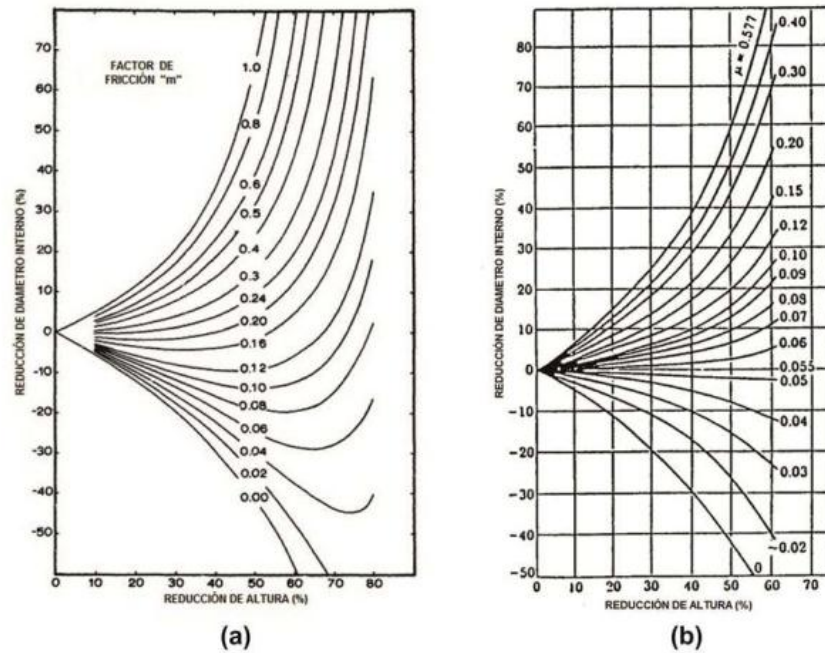
Fuente: Adaptado de [15]

El ensayo de compresión de anillo cuenta con gráficos conocidos como las **curvas de calibración** teóricas de la fricción que se derivan de la solución numérica de las expresiones matemáticas que describen la deformación plástica de un cuerpo en forma de anillo para un intervalo completo de valores de factor de fricción m y coeficiente de fricción μ (ver Figura 5). Así que conociendo los datos de R_h y R_i se puede leer directamente en el gráfico los valores de m y μ .

1.6.2 Geometrías utilizadas en el ensayo de compresión de anillo

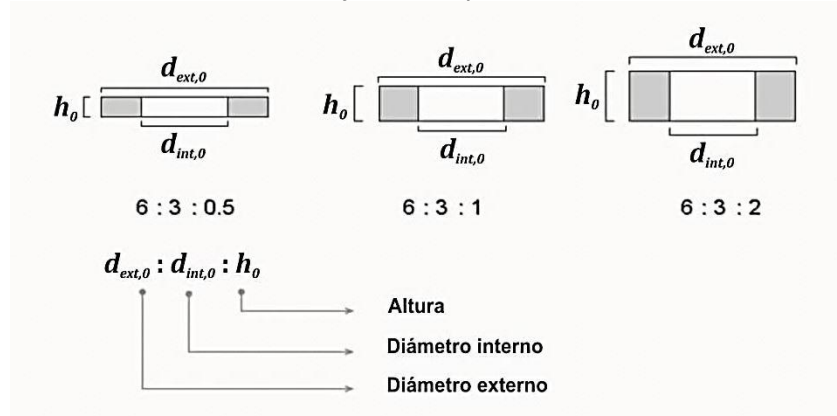
En el ensayo de compresión de anillo la geometría del anillo más común es la de relación 6:3:2, denominada relación canónica, donde el primer número indica el diámetro externo y el segundo número representa el diámetro interno del anillo de la muestra, mientras que el último número indica su altura (Figura 6). De igual manera son utilizadas las geometrías de anillo con relaciones 6:3:1 y 6:3:0.5 para las cuales también se han trazado las correspondientes curvas de calibración. No obstante es recomendable usar la geometría de anillo con relación 6:3:2 dado que esta fue la geometría inicial usada por Male y Corckcroft [9] para el desarrollo del ensayo. Por lo tanto, esta relación ha sido adoptada como una geometría estándar no oficial para estudios de fricción utilizando esta prueba.

Figura 5. Curvas de calibración teóricas de la fricción utilizadas en el ensayo de compresión de anillo (a) en términos de m y (b) en términos de μ .



Fuente: Adaptado de [13] y [9]

Figura 6. Geometrías utilizadas en el ensayo de compresión de anillo



Fuente: Adaptado de [15]

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

2.1.1 Caracterización inicial del material base

El material de estudio corresponde a la aleación de Magnesio AZ31B que se obtuvo a partir de placas extruidas de este material. En la Tabla 3 se muestra la composición química del material que se obtuvo por espectrometría de fluorescencia de Rayos X, y en la Tabla 4 se presentan sus propiedades más relevantes.

Tabla 3. Composición química (% en peso) del material base, aleación de Mg AZ31B

Aleación	Al	Mg	Fe	Mn	Si	Zn
AZ31B	2.8	Bal	0.007	0.52	0.09	0.52

Fuente: [28]

Tabla 4. Propiedades de la aleación de Mg AZ31B

Densidad, ρ (g/cm ³)	1.77
Módulo de elasticidad, E (GPa)	45
Relación de Poisson, ν	0.35
Esfuerzo de fluencia a compresión, S_{yc} (MPa)	110
Esfuerzo de fluencia a tensión, S_{yt} (MPa)	150
Resistencia ultima a tensión, S_{ut} (MPa)	255
Dureza (HB)	56
Capacidad calorífica específica, c (J/g°C)	1.0
Conductividad térmica, k (W/m K)	96
Coefficiente de expansión térmica, α (m/m°C)	26×10^{-6}

Fuente: www.matweb.com

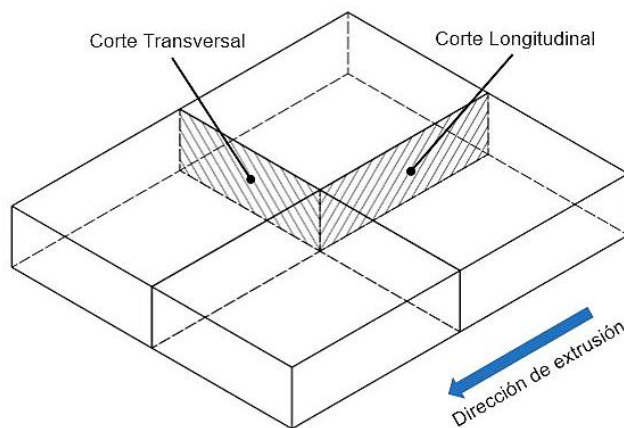
Para conocer el estado inicial del material base se realizó una caracterización inicial que incluyó:

Metalografías: Para la caracterización metalográfica se tomaron dos muestras, una en la dirección de extrusión (dirección longitudinal) y la otra en dirección transversal del material como se muestra en la Figura 7. Se encapsularon las

muestras y se realizó el proceso de pulido inicial, utilizando lijas de carburo de silicio desde la referencia 220 hasta la 1200. Seguidamente se realizó el pulido final con paño, usando abrasivo de alúmina de $1\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ y $0.05\mu\text{m}$. El ataque químico de las muestras se realizó con Acetico-Picral (10 mL ácido acético, 4.2 g ácido pícrico, 10 mL H_2O , 70mL etanol (95%)) durante 10 segundos. Las probetas se examinaron utilizando un microscopio óptico marca ADVANCED OPTICAL a 100 aumentos.

Medición de durezas: Para la toma de muestras se utilizó el mismo proceso de corte de la caracterización metalográfica (Figura 7). Cada una de las superficies se preparó pasándolas por lijas de carburo de silicio desde la referencia 220 hasta la 600. Las mediciones se registraron con un macrodurometro marca Wilson, modelo 1 JRO Tester Number 591, con una carga de 100 Kg. La escala de medición fue Rockwell E (HRE) y se realizaron ocho indentaciones por condición. Este procedimiento se realizó en la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle.

Figura 7. Toma de muestras metalográficas y de dureza para el material base



2.1.2 Tratamiento térmico

Para eliminar la microestructura inicial producto de la extrusión, el material base se sometió a un tratamiento térmico de recocido según la norma ASTM B661 [29]. Este procedimiento se realizó en un horno mufla, con capacidad de calentamiento hasta $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, ubicado en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. El material se calentó hasta una temperatura de $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de calentamiento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,

con un tiempo de sostenimiento de 2 horas. Posteriormente la muestra se dejó enfriar dentro del horno.

2.1.3 Caracterización del material de trabajo

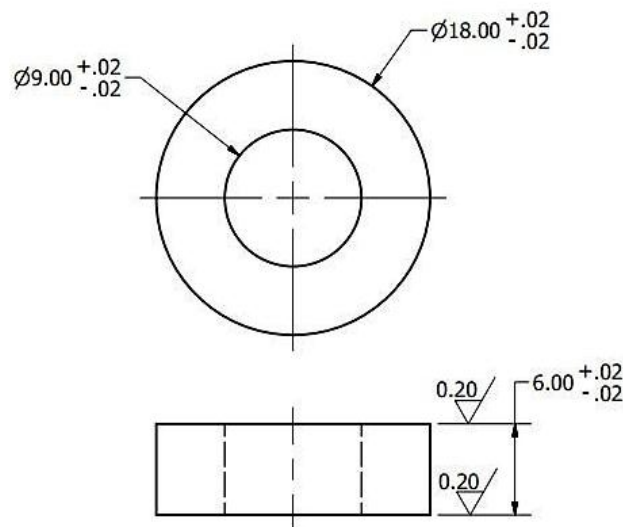
Luego de haber tratado térmicamente el material base, se procedió a caracterizar de nuevo el material de trabajo. Con base en éste se realizarán la construcción de los anillos y las probetas para la prueba de compresión estandarizada. Nuevamente se realizó la caracterización metalográfica y toma de durezas utilizando el mismo procedimiento aplicado en el material base.

2.2 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

2.2.1 Dimensiones de los anillos

En este estudio se utilizó como cuerpo de prueba una geometría de anillo basada en la relación canónica 6:3:2, donde el primer número indica el diámetro externo y el segundo número representa el diámetro interno del anillo de la muestra, mientras que el último número indica la altura de la pieza del anillo. En la Figura 8 se muestra las dimensiones de las probetas basadas en la relación canónica.

Figura 8. Dimensiones de las probetas



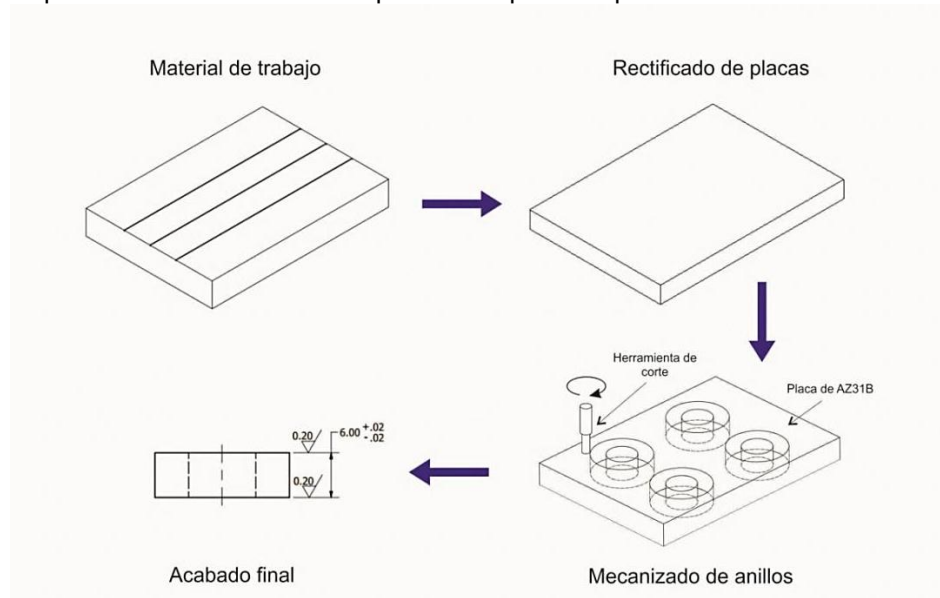
2.2.2 Construcción de las probetas

El proceso de elaboración de probetas se llevó a cabo en el centro de mecanizado CNC de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. En la Figura 9 se muestra esquemáticamente el procedimiento seguido para la fabricación de los anillos.

Cada una de las probetas se fabricó a partir de placas de aleación de Magnesio AZ31B recocidas de 9.6 x 50 x 70 mm. El proceso de fabricación de los anillos se realizó en tres partes: Inicialmente cada placa se rectificó hasta un espesor de 6.4 mm utilizando una velocidad de corte de 50 mm/min y una profundidad de corte de 0.2 mm. Luego mediante una rutina programada en el centro de mecanizado se elaboraron los anillos utilizando una velocidad de corte de 20 mm/min y una profundidad de corte de 0.5 mm. En esta fase se obtuvieron anillos con un espesor de 6.4 mm. En ambos procesos de corte se utilizó refrigerante para evitar cambios en la microestructura debido al calentamiento local.

Por último se aplicó un proceso de desbaste manual a las caras de los anillos utilizando lijas de carburo de silicio desde la referencia 320 hasta la 600 para lograr en los anillos una altura final de 6.00 ± 0.02 mm y una rugosidad final de $0.20 \pm 0.02 \mu\text{m}$. La rugosidad final de cada uno de los anillos se registró con un rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-201P. Se tomaron tres mediciones tanto en la cara superior como en la cara inferior del anillo.

Figura 9. Esquema de fabricación de las probetas a partir de placas de AZ31B



2.3 DISEÑO DEL UTILLAJE

Para el diseño del utillaje se siguió la siguiente metodología: A partir de los requerimientos del proyecto, se formularon un conjunto de parámetros a tener en cuenta en la etapa de diseño del dispositivo. En la fase de diseño conceptual se revisó en la literatura todo lo referente al diseño de dispositivos de conformación utilizados en el ensayo de compresión de anillo y tomando como referencia esta información se propuso una nueva configuración considerando solamente la funcionalidad del utillaje y el espacio de trabajo.

Luego se realizó el diseño detallado de cada componente para establecer la configuración segura de acuerdo a los criterios de resistencia de materiales. En esta fase se estimó la condición más crítica que se presentará durante la ejecución del ensayo y este valor se tomó como parámetro de evaluación del diseño. Para optimizar el proceso de diseño se utilizó un software comercial de elementos finitos para simular el estado de cargas y determinar la geometría definitiva del dispositivo.

Por último se seleccionaron los materiales de construcción y se calculó el factor de seguridad estático para cada componente del utillaje.

2.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE ANILLO

Los ensayos de compresión de anillo se realizaron en la prensa hidráulica ubicada en el Laboratorio de Ensayos Físicos y Mecánicos de la Escuela de Ingeniería de Materiales, la cual tiene una capacidad máxima de 1000 kN y es capaz registrar valores de carga con una precisión de ± 0.02 kN. La máquina puede manejar velocidades de desplazamiento del cabezal inferior hasta 20 mm/seg (Figura 10).

Se utilizaron como cuerpo de prueba anillos elaborados en aleación de Magnesio AZ31B cuyas dimensiones se presentan en la sección 2.2.1. Como contra-cuerpo se emplearon dos matrices de conformación elaboradas en acero para herramientas AISI O1 con un acabado superficial de $0.2 \mu\text{m}$ en las caras de contacto con el anillo.

Figura 10. Prensa hidráulica con capacidad hasta 1000 kN



Como parámetros de prueba se utilizaron dos niveles de temperatura (250 °C y 350°C) y tres condiciones de lubricación entre la interfaz pieza-herramienta: sin lubricación (lubricación en seco) y con lubricación. Los lubricantes evaluados fueron el Grafito Natural con un tamaño de partícula de 74 μm (malla 200¹), y Talco Nacional con un tamaño de partícula de 44 μm (malla 320²) cuya composición química² se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química del Talco Nacional

Componente	Porcentaje en peso (%)
Oxido de Magnesio (MgO)	29.01
Sílice (SiO ₂)	55.40
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	5.30
Oxido de Calcio (CaO)	2.54
Alúmina (Al ₂ O ₃)	2.10

Los anillos se comprimieron al 50% de reducción de altura a una velocidad promedio de 0.2 mm/seg. Se realizaron 3 pruebas por cada condición; este valor se tomó en base a la experiencia de otros autores [14] [17]. En la Tabla 6 se muestra el número de experimentos realizados y las condiciones bajo las cuales se realizaron los experimentos.

¹ Dato suministrado por el proveedor

² Dato suministrado por el proveedor

Tabla 6. Variables del ensayo y número de experimentos realizados

Descripción de la variable	Valor	Número
Temperatura (°C)	250, 350	2
Condición de lubricación	Seco, Grafito, Talco	3
Repeticiones	R1, R2, R3	3
Total de experimentos		18

Para reducir los efectos de factores extraños sobre los resultados del experimento la ejecución de las pruebas se realizó de manera aleatoria. En la Tabla 7 se muestra el orden de ejecución de los ensayos de compresión de anillo.

Tabla 7. Orden de ejecución de los ensayos

Temperatura (°C)	Condición de Lubricación	Repetición	Orden de Ejecución
250	Seco	R1	(16)
250	Seco	R2	(7)
250	Seco	R3	(5)
250	Grafito	R1	(15)
250	Grafito	R2	(13)
250	Grafito	R3	(2)
250	Talco	R1	(11)
250	Talco	R2	(4)
250	Talco	R3	(18)
350	Seco	R1	(3)
350	Seco	R2	(8)
350	Seco	R3	(6)
350	Grafito	R1	(17)
350	Grafito	R2	(10)
350	Grafito	R3	(1)
350	Talco	R1	(9)
350	Talco	R2	(12)
350	Talco	R3	(14)

2.4.1 Montaje experimental

Para la realización de los ensayos de compresión de anillo se llevó a cabo el siguiente montaje con el fin de registrar y controlar las variables más importantes de la prueba.

- Para registrar el desplazamiento del cabezal durante la ejecución de los ensayos se utilizó el siguiente arreglo: se colocó una platina de manera horizontal en la superficie de la base del cabezal inferior, y en un extremo se

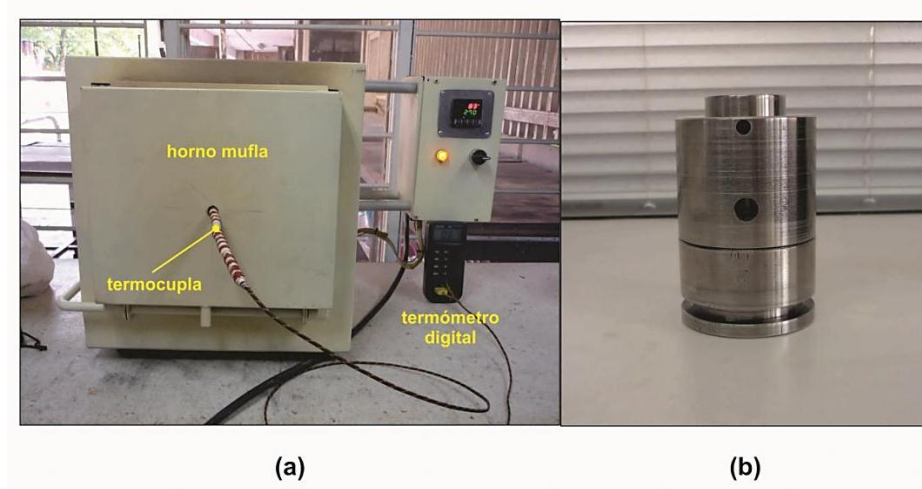
ubicó el comparador de carátula cuya precisión es de ± 0.01 mm; esto permite que se transmita el movimiento del cabezal hacia la aguja del comparador. En la Figura 11 se muestra el montaje realizado.

Figura 11. Montaje experimental para registrar el desplazamiento del cabezal inferior



- En la prensa hidráulica la velocidad de desplazamiento del cabezal inferior se controla a través de una válvula reguladora que regula el caudal del aceite hidráulico hacia la recámara del cilindro. Para lograr una velocidad promedio de 0.2 mm/seg, se estimó la apertura de válvula que se necesita para que el cabezal recorra 1 mm en un tiempo de 5 segundos. La distancia recorrida por el cabezal se midió con el comparador de carátula y el tiempo se tomó con un cronometro que tiene una precisión de ± 0.1 s.
- Para la realización de las pruebas a las temperaturas de trabajo se utilizó un horno mufla con capacidad hasta 600 °C (Figura 12a) y un utillaje al cual se realizó un agujero donde se adaptó una termocupla tipo K con el fin de registrar la temperatura en las cercanías del anillo (Figura 12b). Las lecturas de temperatura se tomaron con un termómetro digital marca Tecpel 305 con una precisión de ± 1 °C.

Figura 12. Montaje experimental para el calentamiento del utillaje



2.4.2 Procedimiento experimental

A continuación se ilustra paso a paso el procedimiento que se debe realizar para los ensayos de compresión de anillo.

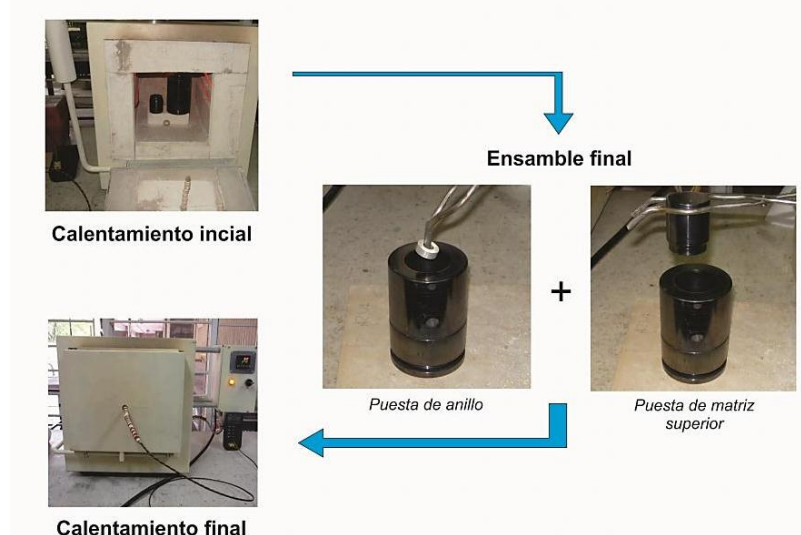
- **Medición de muestras:** Se toma un anillo al azar del lote y se registra las mediciones de diámetro externo, diámetro interno y altura con un calibrador digital marca Mitutoyo cuya precisión es de ± 0.01 mm.
- **Preparación de matrices:** Luego se procede a preparar las superficies de las matrices de acuerdo a la condición superficial a evaluar. Para la condición de lubricación en seco se prepara las superficies utilizando lijas de carburo de silicio desde la referencia 150 y 220 para lograr una rugosidad final de 0.20 ± 0.02 μm . Para la lubricación con grafito y talco, se aplica primero una fina capa de vaselina en las superficies para luego sumergirla en un recipiente que contiene el lubricante sólido. Al final se obtiene una fina capa de lubricante en la superficie de las matrices como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Matrices lubricadas con grafito



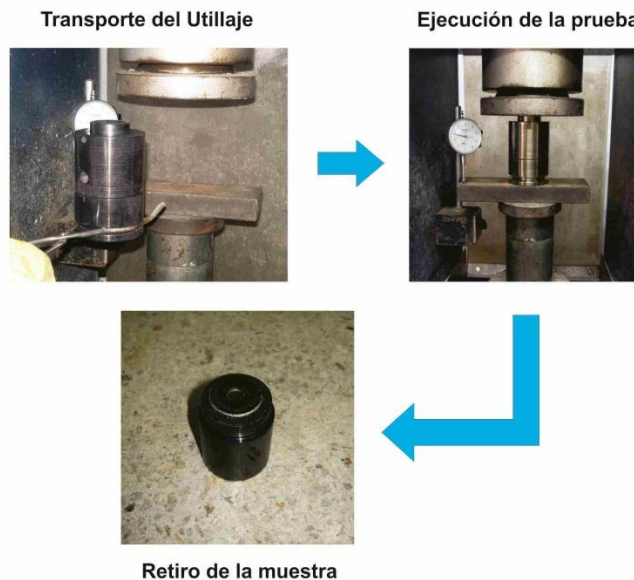
- **Calentamiento del utillaje**: Inicialmente se realiza un previo precalentamiento al horno mufla a 100 °C durante 15 minutos. Luego, en la etapa de calentamiento inicial, se ingresan al horno todos los elementos del utillaje de manera separada y el cuerpo de prueba. Se procede a calentar estos elementos a una velocidad de 6 °C/min durante 25 minutos para los ensayos a 250 °C y 35 minutos para los ensayos a 350 °C. Seguidamente, en la etapa de ensamble final, se extraen todos los elementos del horno y se hace el ensamble del anillo y la matriz superior. Por ultimo todo el conjunto es llevado de nuevo al horno para el calentamiento final. En esta etapa, para los ensayos a 250 °C se calienta el utillaje hasta los 255 °C y para los ensayos a 350 °C se calienta el utillaje hasta las 360 °C. Esto se hace para garantizar que el forjado del anillo sea realizado a las temperaturas de trabajo con un error de ± 5 °C. En la Figura 14 se muestra este procedimiento.

Figura 14. Procedimiento para el calentamiento del utillaje a las temperaturas de prueba



- **Conformación de las muestras:** Luego de que el utillaje alcance la temperatura requerida, se retira del horno y rápidamente se transporta hacia la prensa hidráulica, se ajusta el comparador de carátula en posición de inicio, se ejecuta la prueba y con un cronometro se toma el tiempo de conformado. Posteriormente se retira la muestra y se deja enfriar al aire libre tanto la muestra como el utillaje. Luego se limpian las matrices con alcohol etílico para eliminar los residuos de lubricante. En la Figura 15 se ilustra este procedimiento.

Figura 15. Procedimiento para la conformación de las muestras

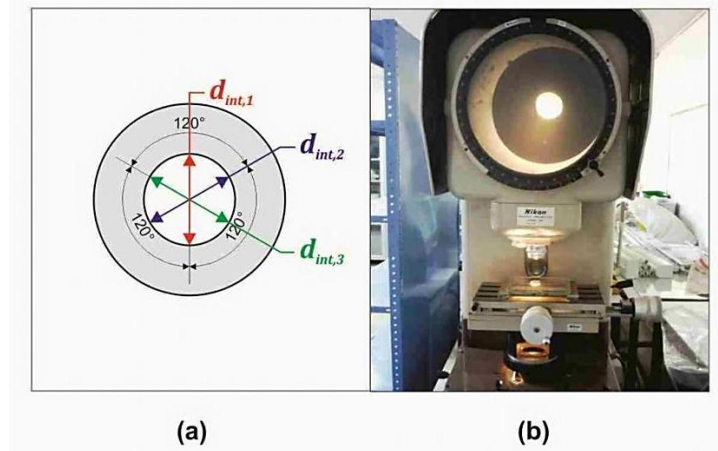


2.5 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN POR MEDIO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN TEÓRICAS

Para calcular el factor de fricción interfaseal m bajo las condiciones de estudio se siguió el siguiente procedimiento:

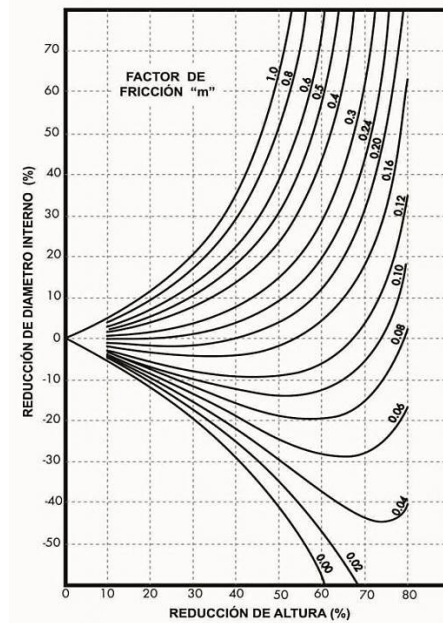
Medición de las muestras después del ensayo: Para la medición de las muestras deformadas plásticamente se tomaron 3 mediciones de diámetro interno cada 120° (Figura 16a) usando un proyector de perfiles marca Nikon el cual permite mediciones con una precisión de ± 0.01 mm (Figura 16b). Para determinar la altura final se tomaron 3 mediciones cada 120° con un calibrador digital marca Mitutoyo cuya precisión es de ± 0.01 mm. Con estos datos se calculó el diámetro interno promedio y la altura promedio para cada muestra.

Figura 16. Medición de las dimensiones finales de las muestras



Interpolación de datos en las curvas de calibración: Teniendo en cuenta las dimensiones iniciales y finales del diámetro interno y altura, se calculó el porcentaje de reducción de altura R_h y el porcentaje de reducción de diámetro interno R_i para cada muestra usando las ecuaciones 1.4 y 1.5 respectivamente (ver sección 1.6.1). Luego estos datos se interpolaron en las curvas de calibración teóricas propuestas por DePierre *et al.* [13] (Figura 17) y se leyó en el gráfico el factor de fricción m para cada repetición. Por último se tomó el promedio de estos valores como la medida total del factor de fricción para cada condición evaluada.

Figura 17. Curvas de calibración teóricas de la fricción propuestas por DePierre et al

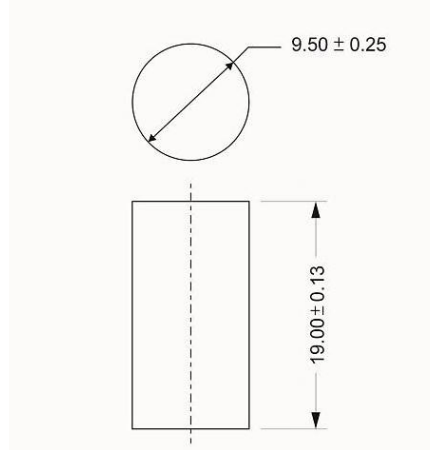


Fuente: [13]

2.6 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ENSAYO PARA LA ALEACIÓN AZ31B MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para obtener las curvas de calibración del ensayo utilizando el método de elementos finitos, se debe conocer el comportamiento plástico del material bajo las condiciones de prueba. Ya que en la revisión de la literatura no se encontró información sobre el comportamiento plástico del material bajo las condiciones evaluadas en este trabajo, se realizó una prueba de compresión estandarizada bajo la norma ASTM E209 [30] para trazar la curva de fluencia del material bajo las mismas variables principales del ensayo de compresión de anillo: velocidad de desplazamiento, niveles de temperatura, porcentaje de deformación de altura; a excepción de la lubricación ya que la presente prueba se hizo solamente con lubricación en seco. Se utilizó el mismo montaje y procedimiento experimental con el que se realizaron los ensayos de compresión de anillo. El espécimen de prueba se muestra en la Figura 18. Se realizaron tres pruebas por condición evaluada de temperatura.

Figura 18. Probeta utilizada para la prueba de compresión estandarizada. Medidas en milímetros



Debido a las limitaciones del montaje y de la prensa hidráulica se utilizó como sistema de adquisición de datos una cámara digital, con la cual se filmó el desplazamiento del cabezal, registrado por el comparador de carátulas, junto con el lector de cargas de la prensa hidráulica. En la Figura 19 se presenta el montaje utilizado.

Figura 19. Montaje experimental para registrar la carga y el desplazamiento del cabezal de la máquina



Para extraer del video los datos de carga versus desplazamiento, se utilizó un software especializado en edición de video que permitió tomar datos de carga y desplazamiento cada 0.2 segundos. Con estos datos se obtuvo la curva esfuerzo-deformación ingenieril y a partir de esta curva se calculó la curva esfuerzo-deformación real mejor conocida como la curva de fluencia con las siguientes expresiones:

$$\sigma = S(e + 1) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (2.2)$$

Donde:

σ : Esfuerzo real

ε : Deformación real

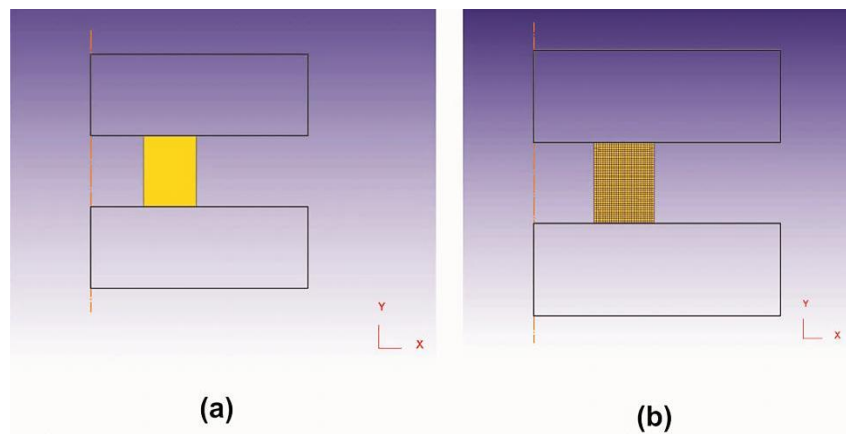
S: Esfuerzo ingenieril

e: Deformación ingenieril

Simulación del ensayo de compresión de anillo utilizando el método de elementos finitos: El método de los elementos finitos es una herramienta muy potente en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería en general, y del conformado por deformación plástica en particular. El programa elegido para realizar las diferentes simulaciones es DEFORMTM v10.0. En especial se empleó la aplicación DEFORM-2D, que es un programa de simulación en dos

dimensiones aplicable al proceso de compresión de anillo, dada su simetría axial. DEFORM es un software de ingeniería asistida por ordenador inicialmente desarrollado con fines específicos relacionados con la simulación de operaciones de conformado por deformación plástica. En el preproceso se modeló el ensayo definiendo las matrices, la pieza de trabajo en dimensiones y las condiciones en las que se va a realizar. Se consideró para el análisis un modelo axisimétrico de dos dimensiones (ver Figura 20a). Se realizó el enmallado de la geometría en el que se aplicó un enmallado estructurado como se muestra en la Figura 20b.

Figura 20. Modelo de elementos finitos para la determinación de las curvas de calibración. (a) Geometría; (b) Enmallado



Debido a que la librería del programa no posee información sobre el comportamiento plástico del AZ31B, se utilizaron los datos de las curvas de fluencia del material para que el programa realice la solución numérica del problema. Las matrices de conformación se modelaron como elementos rígidos indeformables, la matriz inferior se modeló como un elemento empotrado, mientras que la matriz superior se modeló como un elemento en movimiento que entra en contacto con el material a una velocidad de 0.2 mm/seg.

En la determinación de los nodos de contacto entre la pieza de trabajo y la matriz es dónde se indicó el modelo de fricción para la simulación. Se definió el valor numérico de fricción que va a tener asociado el contacto y fue el factor determinante a la hora de obtener los resultados en la simulación. Para la simulación se usó el factor de fricción interfásial m , cuya utilización es muy habitual en problemas de conformado por deformación plástica.

Introducidas todas las condiciones y variables, se realizó el análisis de modelo y se procedió a la simulación del proceso, que fue realizado en base al método

numérico que el programa utiliza para conseguir una solución con los datos indicados. El programa permite visualizar el estado geométrico de la pieza de trabajo, y por tanto el desplazamiento radial de la cara interna del anillo en cada instante del proceso. Las curvas de calibración del ensayo se construyeron en una gráfica que tiene en el eje de las abscisas el porcentaje de reducción de la altura de la pieza y en el eje de las ordenadas el porcentaje de reducción sufrido por el diámetro interno del anillo. La zona negativa del eje de ordenadas corresponde al incremento del diámetro interno, mientras que la positiva es propiamente el decremento sufrido en dicho diámetro.

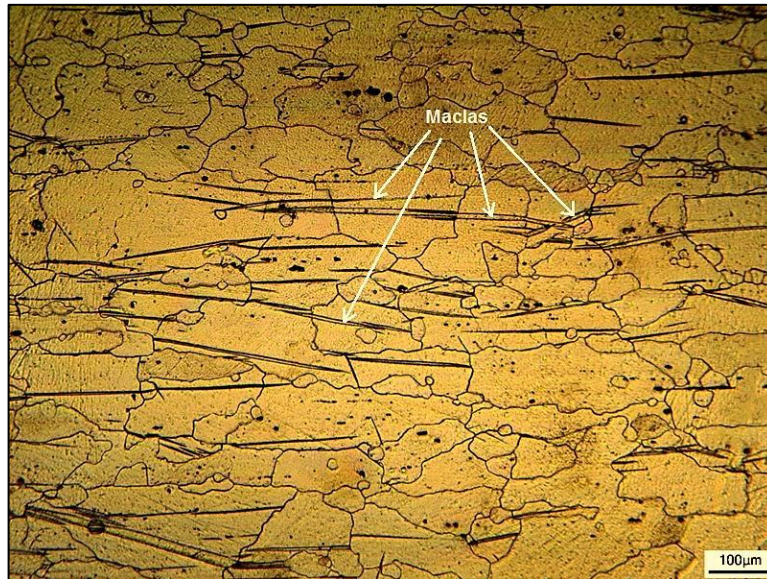
Los datos se obtienen del cuadro de variables de estado que ofrece el programa DEFORM, leyendo los desplazamientos locales en cada paso, tanto de radio como de altura. Estos datos han de recogerse para todos los pasos, de todos los procesos realizados con distintos valores de factor de fricción. Con estos se realizaron los cálculos para obtener los decrementos porcentuales de altura y diámetro necesarios para la elaboración de las curvas de calibración del ensayo para la aleación de Magnesio AZ31B.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

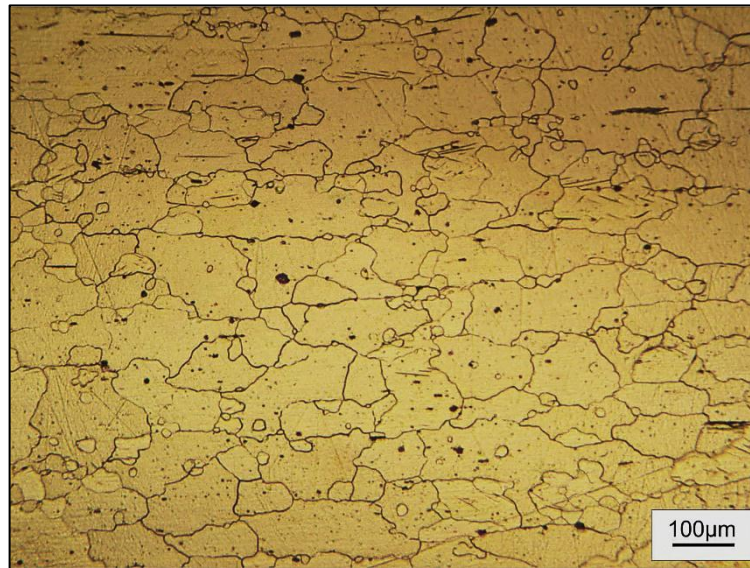
En la Figura 21 se muestra la microestructura en dirección longitudinal de la aleación de Magnesio AZ31B correspondiente al material base. Se aprecia claramente la estructura típica de un material que ha sido sometido a un proceso de extrusión. Se observan granos grandes y alargados de tamaños variados que están orientados en la misma dirección de extrusión, y en grado menor, se distinguen granos pequeños y equiaxiales. Esta microestructura presenta numerosas inclusiones no metálicas de Al_xMn_y dispersas en la solución sólida. También se aprecian maclas mecánicas en la dirección de extrusión.

Figura 21. Microestructura de la sección longitudinal del material base de la aleación AZ31B. Fotografía a 100 aumentos



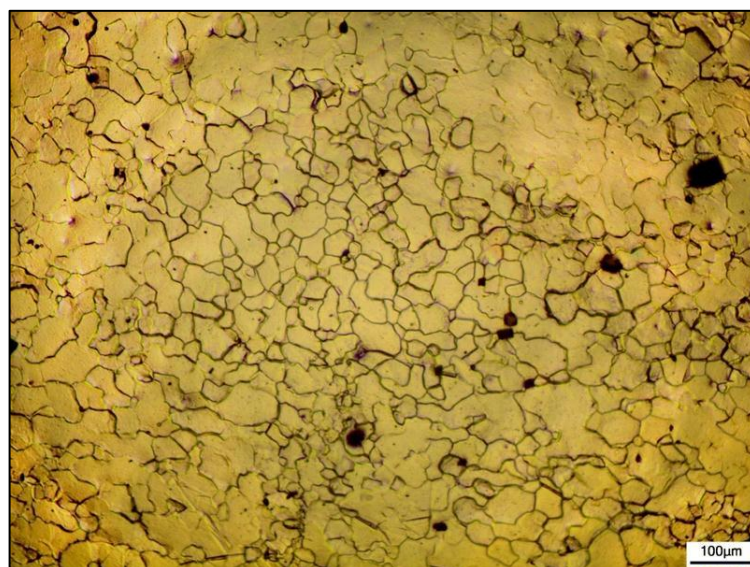
En la Figura 22 se muestra la microestructura del material base en la sección transversal. En esta dirección no se visualizan maclas y se observa un grano grande y alargado, también se distinguen granos pequeños y equiaxiales y se visualizan inclusiones no metálicas de Al_xMn_y .

Figura 22. Microestructura de la sección transversal del material base de la aleación AZ31B. Fotografía a 100 aumentos



En la Figura 23 se presenta la microestructura en dirección longitudinal de la aleación AZ31B luego de aplicar el tratamiento térmico. Después del recocido se logra apreciar una microestructura recrystalizada libre de maclas, con granos más pequeños y equiaxiales. Se alcanzan a apreciar inclusiones no metálicas de Al_xMn_y en los bordes de grano.

Figura 23. Microestructura en dirección longitudinal de la aleación AZ31B con tratamiento térmico de recocido. Fotografía a 100 aumentos



En la Figura 24 se presenta la microestructura en dirección transversal de la aleación AZ31B después del tratamiento térmico de recocido. Se observa una configuración de los granos muy similar a la estructura que se presenta en dirección longitudinal. No hay presencia de maclas en esta sección.

Figura 24. Microestructura de la sección transversal del material base de la aleación AZ31B con tratamiento térmico de recocido. Fotografía a 100 aumentos



En la Tabla 8 se presentan los valores de dureza obtenidos en promedio para el material antes y después de aplicar el tratamiento térmico de recocido tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal. Nótese la diferencia de durezas en ambas direcciones para el material sin tratamiento térmico, donde el valor de dureza más alto se presentó en la dirección longitudinal (58 ± 1 HRE).

Para los valores de dureza del material recocido se obtuvieron valores similares en ambas direcciones siendo en la dirección longitudinal el valor más alto (36 ± 1 HRE). Comparando los valores de dureza en sentido longitudinal antes y después del recocido, se aprecia la disminución de este valor cuando se aplica este tratamiento térmico.

Por lo tanto mediante la aplicación del tratamiento térmico de recocido se observa que el material de trabajo para la realización de las muestras recupera sus condiciones iniciales en ambas direcciones, valores de dureza similares, con una textura uniforme con granos equiaxiales.

Tabla 8. Dureza del material antes y después del tratamiento térmico

Indentaciones	Dureza del Material Sin Tratamiento Térmico, (HRE) ± 1		Dureza del Material Recocido, (HRE) ± 1	
	Dirección Longitudinal	Dirección Transversal	Dirección Longitudinal	Dirección Transversal
1	56	37	34	32
2	57	46	33	31
3	59	41	41	28
4	56	37	38	35
5	59	51	39	32
6	59	37	31	32
7	59	43	39	35
8	56	46	34	33
Promedio	58 ± 1	42 ± 2	36 ± 1	32 ± 1

3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL UTILLAJE

3.2.1 Parámetros funcionales del dispositivo

Para la realización del ensayo de compresión de anillo bajo las condiciones de lubricación y temperaturas requeridas, se diseñó y construyó un utillaje acoplable a la prensa hidráulica ubicada en el Laboratorio de Ensayos Físicos y Mecánicos de la Escuela de Ingeniería de Materiales. Por eso se establecieron los siguientes parámetros de diseño de acuerdo a las condiciones experimentales: el dispositivo debe operar desde la temperatura ambiente hasta los 400 °C ya que se desea usar el equipo para otros estudios donde se involucren nuevos rangos de temperatura para la conformación en tibio. El diámetro de las matrices debe ser como mínimo 1.8 veces el diámetro externo del anillo, valor que se obtuvo de pruebas preliminares. Con esto se asegura que el anillo conformado permanezca entre las matrices. La aplicación de lubricantes entre la interfase matriz-pieza debe ser de manera ágil al igual que la remoción de los mismos. Las matrices de conformación deben tener una dureza de 55 Rockwell C (HRC) que corresponde a un valor típico de dureza que se utiliza en el diseño de matrices en el conformado de metales [31]. El espacio disponible entre el cabezal superior e inferior de la prensa hidráulica para la ubicación del dispositivo es de 180 mm. Adicionalmente el utillaje debe ser económico, fácil de ensamblar y de transportar.

3.2.2 Diseño conceptual

Para la realización del ensayo de compresión de anillo a altas temperaturas se han utilizado diversos dispositivos para garantizar el control de las variables de la prueba dentro de los límites establecidos por el experimentador. A partir de los requisitos que debe cumplir el utillaje, se plantearon varias propuestas de diseño basadas en las soluciones planteadas por otros autores.

Shahriari *et al.* [16] utilizaron para la realización de la prueba un horno portátil acoplable a una máquina de ensayos servohidráulica con capacidad hasta 250 kN. La configuración de este horno garantiza el suministro constante de calor a los cuerpos de prueba controlando en tiempo real las temperaturas de trabajo mediante un controlador PID. En la Figura 25 se presenta esta configuración. Así, la primera propuesta de solución consistió en el diseño de un horno portátil acoplable a la prensa hidráulica con capacidad hasta 400°C. A pesar que esta configuración permitiría el control eficaz de las temperaturas de trabajo, la propuesta fue descartada ya que la construcción de este equipo implicaba un alto costo que no estaba contemplado dentro del presupuesto.

Figura 25. Horno portátil utilizado por Shahriari et al. en el ensayo de compresión de anillo en caliente

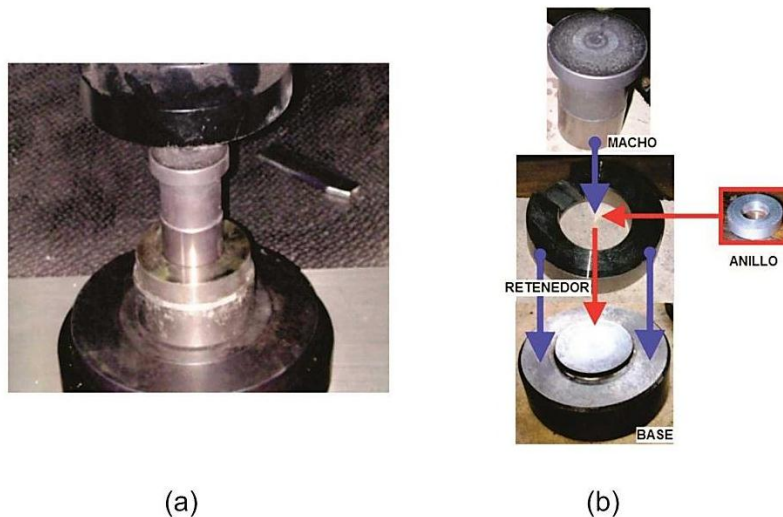


Fuente: [16]

Matuda [15] propuso un procedimiento diferente para realizar el ensayo en caliente: utilizó un dispositivo de conformación como el que se muestra en la Figura 26a el cual es calentado en un horno mufla hasta una temperatura máxima

de 350 °C durante 30 minutos, luego es llevado a la máquina de ensayos para la ejecución del ensayo. Este utillaje consta de una base, un macho o matriz superior y un anillo retenedor para el alineamiento de cuerpo de prueba y la sustentación del macho (Figura 26b). Esta configuración se acopla a las necesidades del experimento, es de fácil fabricación y tiene la ventaja que es de bajo costo. Sin embargo con este utillaje no se tiene un control preciso sobre la temperatura por lo que con éste se garantiza la temperatura de trabajo dentro de un intervalo limitado de tiempo.

Figura 26. Dispositivo de conformación utilizado por Matuda en el ensayo de compresión de anillo en caliente. (a) Ensamble; (b) Partes del dispositivo



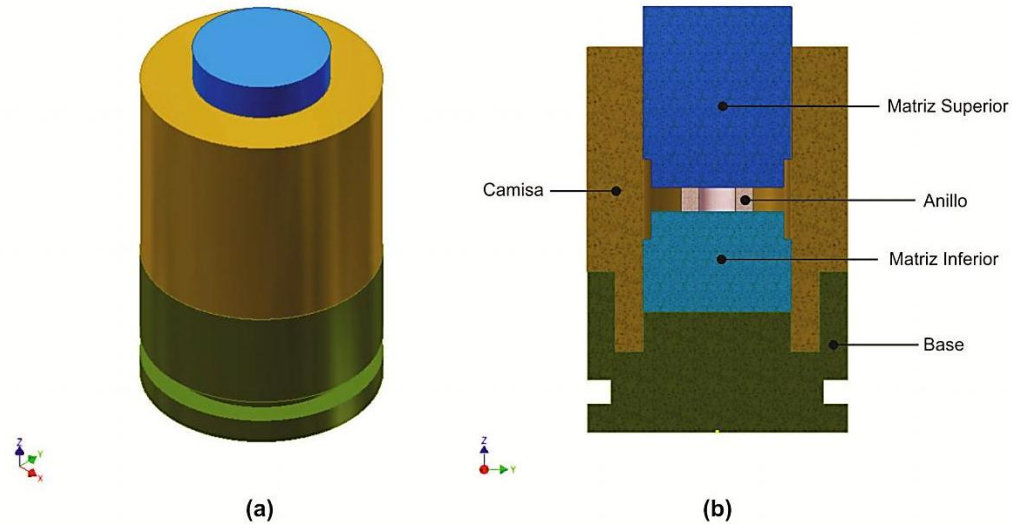
Fuente: Adaptado de [15]

En base al dispositivo anterior, se propuso un diseño que se adapta mejor a los requerimientos de esta investigación y que mejora en varios aspectos el diseño propuesto por Matuda. Esta propuesta se muestra en la Figura 27a.

El utillaje consta de cuatro componentes: una matriz superior, una matriz inferior, una camisa que se encarga de alinear las matrices y de conservar la temperatura en el anillo, y una base que da soporte a los otros elementos y facilita el transporte de todo el conjunto (Figura 27b). En este diseño la matriz inferior se independizó de la base para facilitar la preparación de la superficie de contacto con el cuerpo de prueba. El anillo retenedor se reemplazó por una camisa cilíndrica la cual proporciona un área de contacto mayor con las matrices para que la carga de conformado se transmita lo más uniforme posible. Además, la base posee una

ranura que facilita la manipulación del dispositivo dentro del horno y el transporte desde el horno hacia la máquina de pruebas.

Figura 27. Diseño conceptual del utillaje para el ensayo de compresión de anillo. (a) Vista isométrica; (b) Partes del dispositivo



3.2.3 Diseño detallado

3.2.3.1 Diseño de las matrices de conformación

Las matrices de conformación son los componentes principales en el dispositivo dado que se encuentran en contacto directo con el cuerpo de estudio y se encargan de transmitir la fuerza de la máquina para deformar plásticamente el material.

Las cargas a las que están sometidas las matrices son la carga de conformado proveniente de la prensa hidráulica y el peso propio. Como en el ensayo de compresión de anillo se manejarán velocidades de deformación bajas (0.03 s^{-1}), para el diseño se estimó que la carga de conformado es de tipo estática.

Esta carga se caracteriza por ser variable con la temperatura ya que el esfuerzo de fluencia para el material de estudio disminuye a medida que se aumenta la temperatura, luego, se requiere menos carga para deformar plásticamente el material. En ese sentido, la condición más crítica se presentará cuando se realicen ensayos de compresión de anillo a temperaturas cercanas a la ambiental. Para

estimar esta carga crítica de conformado se hizo una prueba preliminar de compresión de anillo en frío para conocer dicha carga. El ensayo se llevó a cabo en una prensa hidráulica con capacidad para 1000 kN ubicada en la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle.

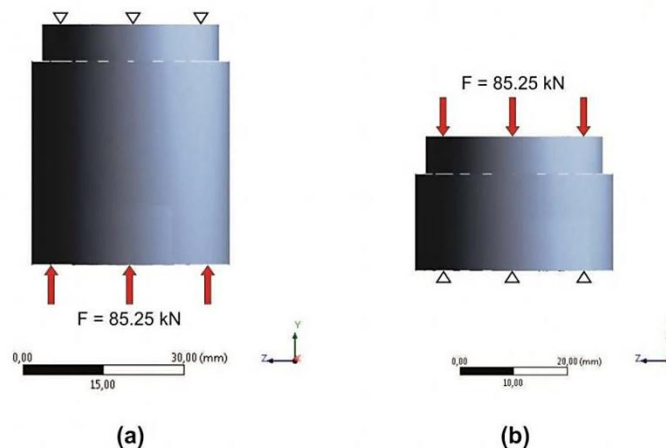
Procedimiento: Se aplicó una carga compresiva al anillo, con iguales dimensiones a las probetas utilizadas en el ensayo definitivo (ver Figura 8), a una velocidad promedio de 0.2 mm/s hasta llevarlo a la rotura. Luego se registró la carga y se midió la altura final del anillo para conocer su deformación real. Se realizaron tres pruebas y el promedio de los valores de carga fue el que se utilizó para evaluar el diseño. La carga resultante promedio fue de 85.25 kN. El resultado de este ensayo se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del ensayo preliminar de compresión de anillo a temperatura ambiente

Ensayo	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Deformación real (mm/mm)	Carga de rotura (kN)
1	6,02	4,42	0,31	85,74
2	6,00	4,61	0,26	84,10
3	6,02	4,38	0,32	85,90
Promedio	6,01	4,47	0,30	85,25

Para determinar el estado de esfuerzos al que estarán sometidas las matrices se realizó un modelo numérico utilizando un software comercial de elementos finitos. En este modelo se usó un análisis estático lineal para una geometría en 3D, aplicando las condiciones de borde como se ilustra en la Figura 28.

Figura 28. Condiciones de borde aplicadas a los modelos de elementos finitos para la (a) matriz superior y la (b) matriz inferior



Para simular las condiciones de trabajo a las que estarán sometidas las matrices se aplicó la carga de conformado sobre la cara inferior para la matriz superior y sobre la cara superior para la matriz inferior. En cada modelo se despreció el peso propio de las matrices y se restringieron los desplazamientos en el eje Y en la cara opuesta a la superficie de aplicación de la fuerza.

El material que se simuló para las matrices corresponde a un material homogéneo, isotrópico, elástico lineal con propiedades iguales a las del acero AISI 1045. Las propiedades de este material se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades del acero AISI 1045

Densidad, ρ (g/cm ³)	7.85
Módulo de elasticidad, E (GPa)	205
Relación de Poisson, ν	0.29
Esfuerzo de fluencia a tensión, S_{yt} (MPa)	530
Resistencia última a tensión, S_{ut} (MPa)	625
Dureza (HRB)	88
Coefficiente de expansión térmica, α (m/m°C)	13×10^{-6}

Fuente: www.matweb.com

Para el enmallado de la geometría se usaron elementos tetraédricos de cuatro nodos y se utilizó un enmallado libre teniendo una densidad de malla superior en las zonas donde se presentan concentradores de esfuerzos. En la Figura 29 se ilustra el enmallado utilizado para las matrices. Se ejecutaron cuatro modelos aumentando el número de nodos hasta obtener convergencia en el valor de esfuerzo de Von Mises con un error menor al 3% respecto al valor anterior. En la Tabla 11 y Tabla 12 se muestran el análisis de convergencia para la matriz superior y la matriz inferior respectivamente.

Figura 29. Enmallado del modelo de elementos finitos para las matrices. (a) Matriz superior; (b) Matriz inferior

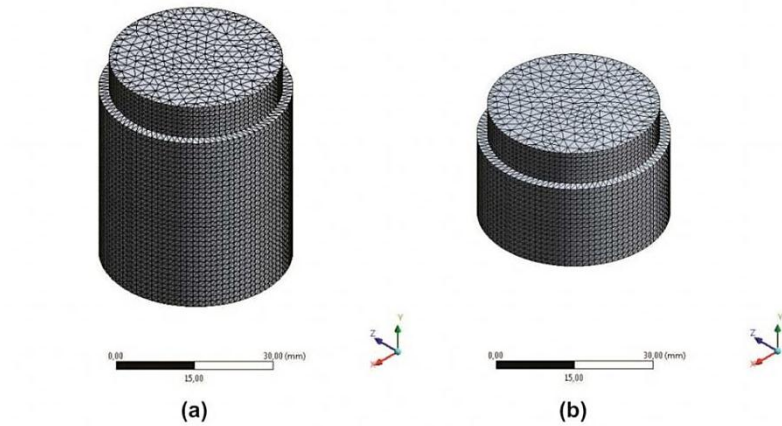


Tabla 11. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la matriz superior

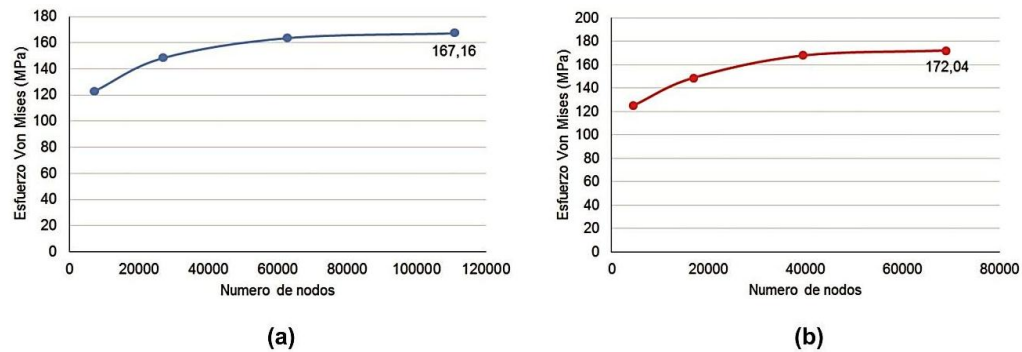
Numero de nodos	Esfuerzo Máximo Von Mises (MPa)	Error respecto al anterior
7035	122,73	-----
26962	148,28	17,2 %
62667	163,53	9,3 %
110937	167,16	2,2 %

Tabla 12. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la matriz inferior

Numero de nodos	Esfuerzo Máximo Von Mises (MPa)	Error respecto al anterior
4520	125,02	-----
16858	148,63	15,9 %
39414	167,75	11,4 %
68803	172,04	2,5 %

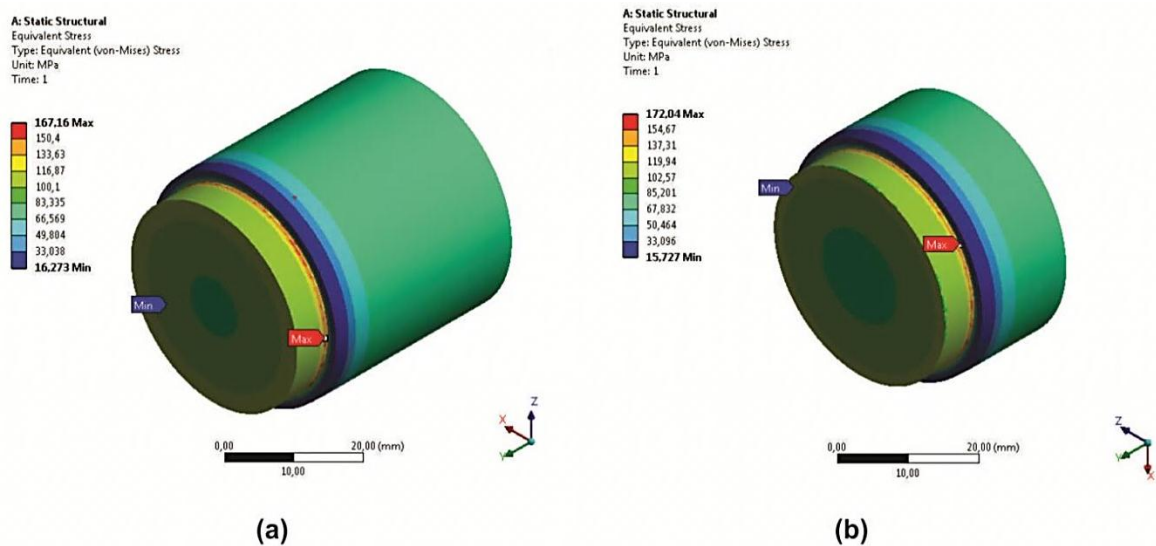
En la Figura 30 se muestra la curva de convergencia para ambos modelos.

Figura 30. Curvas de convergencia de los modelos de elementos finitos para la (a) matriz superior y la (b) matriz inferior



El campo de esfuerzos que se obtuvo para las matrices utilizando el método de elementos finitos se presenta en la Figura 31. Se puede observar que el máximo valor de esfuerzo efectivo de Von Mises se presenta en el cambio de sección transversal de las matrices con un valor de 167.16 MPa para la matriz superior y 172.04 MPa para la matriz inferior. Con estos modelos se puede ver que la geometría propuesta para las matrices cumple con los requerimientos de resistencia para las condiciones de servicio evaluadas.

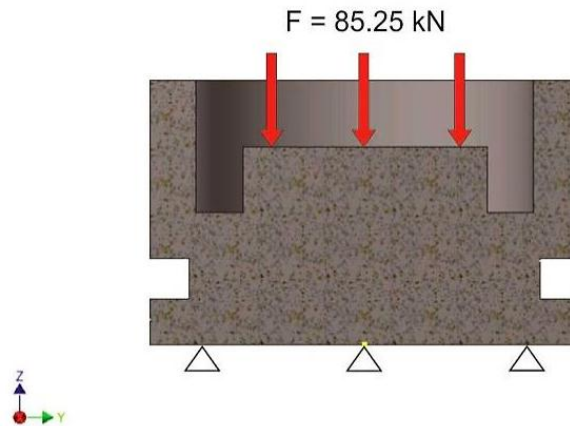
Figura 31. Campo de esfuerzos de Von Mises para las matrices de conformación. (a) Matriz superior; (b) Matriz inferior



3.2.3.2 Diseño de la base

La base cumple la función principal de dar soporte a los demás elementos del utillaje, pero también está sometida a la carga de conformado proveniente de la máquina. Para evaluar el diseño propuesto, se realizó un modelo de elementos finitos en 3D para las condiciones de borde que se presentan en la Figura 32. Se aplicó la carga de conformado en la cara donde se apoya la matriz inferior y se restringieron los desplazamientos en el eje Z en la cara inferior de la base. Al igual que los modelos anteriores se despreció el peso propio. Se realizó un análisis estático lineal en el que se utilizó un material homogéneo, isotrópico, elástico lineal con propiedades iguales a las del acero AISI 1045 (ver Tabla 10).

Figura 32. Condiciones de borde aplicadas al modelo de elementos finitos para la base



En el enmallado del modelo se utilizaron elementos tetraédricos de cuatro nodos y se utilizó un enmallado libre teniendo una densidad de malla superior en las zonas donde se presentan concentradores de esfuerzos. La Figura 33 presenta el enmallado utilizado en el modelo. Se ejecutaron cuatro modelos aumentando el número de nodos hasta obtener convergencia en el valor de esfuerzo de Von Mises con un error menor al 3% respecto al valor anterior. En la Tabla 13 se muestra el análisis de convergencia para la base y en la Figura 34 se aprecia la curva de convergencia para este modelo.

Figura 33. Enmallado del modelo de elementos finitos para la base

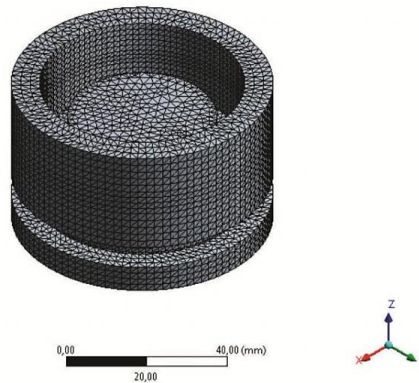
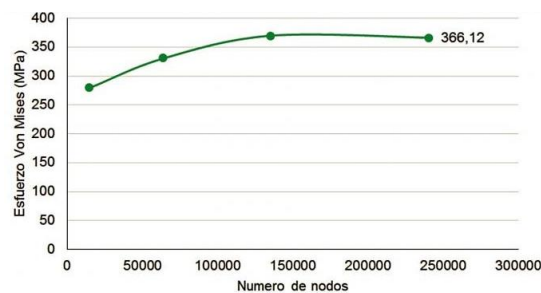


Tabla 13. Análisis de convergencia del modelo de elementos finitos para la base

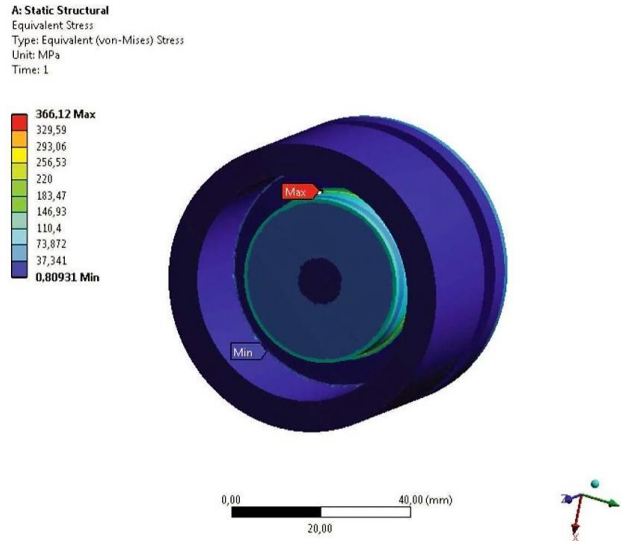
Numero de nodos	Esfuerzo Máximo Von Mises (MPa)	Error respecto al anterior
14435	278,99	-----
63666	330,27	15,5 %
135339	369,80	10,7 %
240750	366,12	1,0 %

Figura 34. Curva de convergencia del modelo de elementos finitos para la base



El campo de esfuerzos que se obtuvo a partir del modelo de elementos finitos de presenta en la Figura 35. Se puede observar que el máximo valor de esfuerzo efectivo de Von Mises se presenta en el interior de la base, específicamente en la zona donde se apoya la camisa; este valor es de 366.12 MPa. Con este modelo se puede ver que la geometría propuesta para la base cumple con los requerimientos de resistencia para las condiciones de servicio evaluadas.

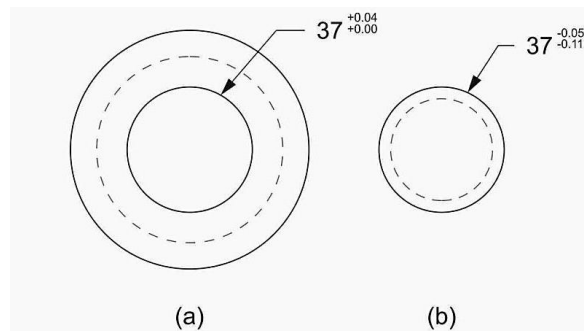
Figura 35. Campo de esfuerzos de Von Mises para la base



3.2.3.3 Diseño de la camisa

La camisa es el elemento del utillaje que se encarga de alinear las matrices para que la carga se transmita lo más verticalmente posible. Esta condición hace que entre la superficie interna de la camisa y las superficies externas de las matrices deba existir un contacto estrecho que permita deslizar las matrices en el interior de la camisa sin que se presente interferencia dentro del rango de temperaturas de diseño. Por este motivo se seleccionaron las tolerancias dimensionales entre el agujero de la camisa y las matrices de tal manera que garanticen el deslizamiento entre superficies sin un juego excesivo (ver Figura 36).

Figura 36. Tolerancias dimensionales para (a) la camisa y (b) las matrices. Medidas en milímetros



Para estas tolerancias calculamos el juego máximo y mínimo.

$$J_{max} = \text{Diametro mayor del agujero} - \text{Diametro menor del eje} \quad (3.1)$$

$$J_{max} = 37.04 - 36.89 = 0.15 \text{ mm}$$

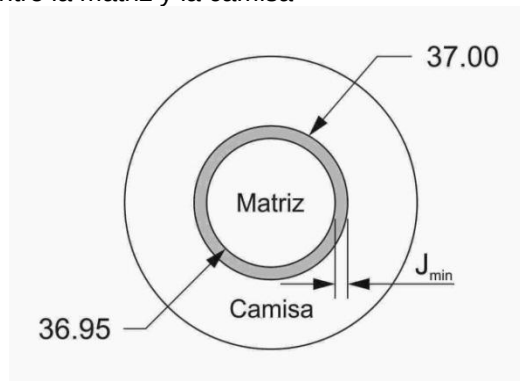
$$J_{min} = \text{Diametro menor del agujero} - \text{Diametro mayor del eje} \quad (3.2)$$

$$J_{min} = 37.00 - 36.95 = 0.05 \text{ mm}$$

Estos valores corresponden a los juegos máximos y mínimos permisibles a temperatura ambiente. Dado que el dispositivo estará sometido a altas temperaturas, las partes sufrirán cambios en sus dimensiones, en especial el interior de la camisa y las matrices que son las dimensiones de interés. Luego, se realiza un chequeo para observar si a la máxima temperatura de trabajo, a 400°C, hay interferencia entre ambas superficies.

Si suponemos que existe un juego mínimo entre las piezas en contacto, tenemos que las dimensiones para el agujero de la camisa y el diámetro exterior de las matrices son de 37 mm y 36.95 mm respectivamente (ver Figura 37). El material de la camisa corresponde a un acero AISI 1045 cuyas propiedades se ilustran en la Tabla 10.

Figura 37. Juego mínimo entre la matriz y la camisa



Seguidamente, calculamos la longitud final de los diámetros debido a la expansión térmica del material con la ecuación 3.3.

$$L_f = L_o [1 + \alpha(T_f - T_o)] \quad (3.3)$$

Donde:

L_f : Longitud final

L_o : Longitud inicial

α : Coeficiente de expansión térmica lineal (13×10^{-6} m/m °C)

T_o : Temperatura inicial (25°C)

T_f : Temperatura final (400°C)

Calculando la expansión térmica del agujero de la camisa, tenemos que:

$$L_f = 37[1 + 13 \times 10^{-6}(400 - 25)]$$

$$L_f = 37.1803 \text{ mm}$$

Ahora calculamos la expansión térmica de las matrices:

$$L_f = 36.95[1 + 13 \times 10^{-6}(400 - 25)]$$

$$L_f = 37.1301 \text{ mm}$$

Entonces, el juego mínimo entre las superficies a 400 °C será:

$$J_{min} = 37.1803 - 37.1301 = 0.05 \text{ mm}$$

Por lo tanto, a una temperatura de trabajo de 400°C no se presentará interferencia entre el agujero de la camisa y el diámetro externo de las matrices de conformación.

3.2.4 Selección de materiales y cálculo de factores de seguridad

En el diseño de matrices de conformación la selección del material es un factor importante ya que estos elementos deben ser rígidos, muy resistentes y tenaces a elevadas temperaturas, ser receptivos a los tratamientos térmicos, soportar choques térmicos y mecánicos y ser muy resistentes al desgaste [23]. Los materiales típicos para este tipo de aplicaciones son los aceros para herramientas. Para el utillaje, se requiere que las matrices de conformación posean una alta resistencia mecánica, un buen desempeño en las temperaturas de trabajo y tener una alta resistencia al desgaste por lo que estos elementos deben tener una dureza mayor o igual a 55 HRC.

Desafortunadamente con el material que fue seleccionado en la fase de diseño detallado no se pueden lograr estos valores de dureza, así que se seleccionó como material de construcción de las matrices el acero para herramientas AISI O1. Este nuevo material al igual que el acero 1045 satisface los criterios de

resistencia que exige el dispositivo. Para lograr el valor de dureza permitido se aplicó a las matrices un tratamiento térmico de temple a 800 °C, luego se hizo un enfriamiento en aceite y posteriormente se les aplicó un doble revenido a 175 °C. A pesar de que este acero es ampliamente utilizado para construcción de herramientas para el trabajo en frío, se consideró que para el rango de temperaturas del ensayo y tiempo de servicio, no ocurrirá un cambio dramático en la resistencia y en la dureza del material. Las propiedades del acero AISI O1 se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Propiedades del acero AISI O1 a 55 HRC

Densidad, ρ (g/cm ³)	7.81
Módulo de elasticidad, E (GPa)	182
Relación de Poisson, ν	0.3
Esfuerzo de fluencia a compresión, S_{yc} (MPa)	1800
Esfuerzo de fluencia a tensión, S_{yt} (MPa)	1500
Resistencia ultima a tensión, S_{ut} (MPa)	1690
Dureza (HRC)	55
Coefficiente de expansión térmica, α (m/m°C)	10.6×10^{-6}

Fuente: www.matweb.com

Aunque la base y la camisa no intervienen directamente en la conformación plástica del anillo, también se seleccionó como material de construcción el acero AISI O1, junto con el mismo tratamiento térmico, a fin de darle homogeneidad al utillaje. Cabe destacar que en la selección del material y en el proceso de fabricación del utillaje se tuvo en cuenta la parte económica ya que se logró disminuir los costos de fabricación seleccionando material disponible en el almacén y usando las maquinas herramienta del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. En la Figura 38 se muestra el dispositivo construido.

Figura 38. Utillaje construido para la realización del ensayo de compresión de anillo



3.2.4.1 Cálculo de factores de seguridad para los componentes del utillaje

El factor de seguridad ante cargas estáticas según el criterio de falla de Von Mises se define como:

$$N = \frac{S_y}{\sigma_{VM}} \quad (3.4)$$

Donde S_y es el esfuerzo de fluencia del material y σ_{VM} es el esfuerzo efectivo de Von Mises. Teniendo en cuenta la ecuación 3.4 se determinó el factor de seguridad para la condición más crítica, esto es, en la zona donde se presentó el valor más alto de esfuerzo efectivo de Von Mises (167.16 MPa). Tomando el valor de esfuerzo de fluencia de la Tabla 14 se tiene que:

$$N = \frac{1800 \text{ MPa}}{167.16 \text{ MPa}} = 10.8$$

Luego, tomando el valor máximo de esfuerzo efectivo de Von Mises (172.04 MPa) se calculó el factor de seguridad para la matriz inferior. Este factor es:

$$N = \frac{1800 \text{ MPa}}{172.04 \text{ MPa}} = 10.5$$

De igual manera se calculó el factor de seguridad para la base. Tomando el valor máximo de esfuerzo efectivo de Von Mises (366.12 MPa), este factor es:

$$N = \frac{1800 \text{ MPa}}{366.12 \text{ MPa}} = 4.9$$

Para la camisa no se calculó el factor de seguridad debido a que se consideró que durante su servicio no se encontrará en un estado de esfuerzos que comprometa su resistencia mecánica.

3.3 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FRICCIÓN UTILIZANDO LA CURVA DE CALIBRACIÓN TEÓRICA

En la Figura 39 se presenta la interpolación de los valores de porcentaje de reducción de altura R_h y el porcentaje de reducción del diámetro interno R_d en la curva de calibración teórica de la fricción para los valores de temperatura de 250°C y 350°C bajo las condiciones de lubricación en seco, grafito y talco. En la Tabla 15 se presentan los resultados del factor de fricción promedio para cada una de las condiciones evaluadas en donde los intervalos fueron calculados con el 95% de confianza.

Figura 39. Interpolación de datos en las curvas de calibración teóricas para las condiciones de lubricación evaluadas (a) a 250 °C y (b) a 350 °C

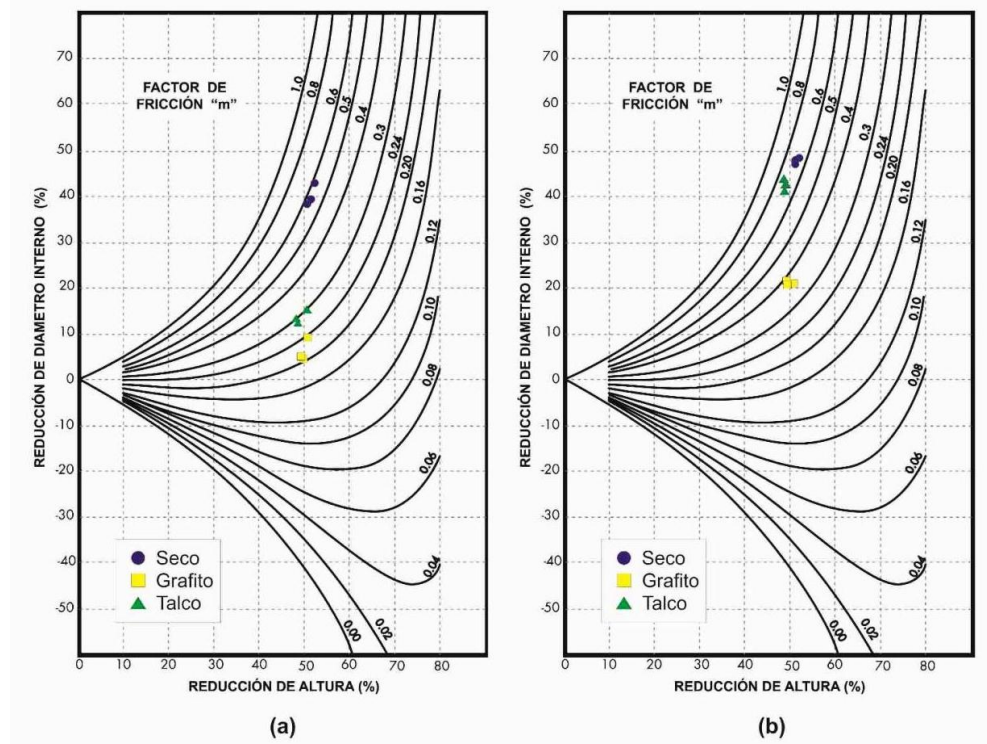


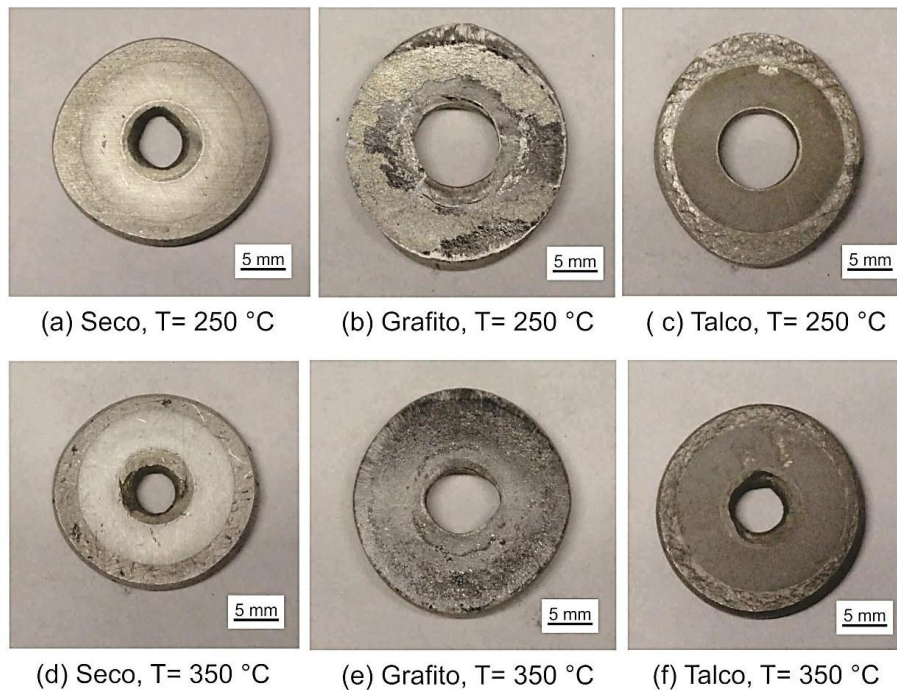
Tabla 15. Resultados del factor de fricción para cada condición evaluada

Temperatura (°C) $\pm$ 5	250			350		
Condición de Lubricación	Seco	Grafito	Talco	Seco	Grafito	Talco
Ensayo 1	0,58	0,23	0,30	0,67	0,36	0,68
Ensayo 2	0,58	0,21	0,28	0,66	0,37	0,73
Ensayo 3	0,57	0,21	0,29	0,68	0,39	0,69
Promedio	0,57	0,22	0,29	0,67	0,37	0,70
DE ³	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03
CV ⁴	0,01	0,07	0,03	0,01	0,04	0,04
IC ⁵ (95%)	0,01	0,04	0,02	0,02	0,04	0,07

3.3.1 Macrografías de las muestras

En la Figura 40 se presenta las macrografías de los anillos conformados para todas las condiciones de ensayo. Se presenta en detalle la variación del diámetro interno con la temperatura y con las condiciones friccionales entre la pieza y la herramienta.

Figura 40. Macrografía de las muestras



³ Desviación estándar

⁴ Coeficiente de variación

⁵ Intervalo de confianza

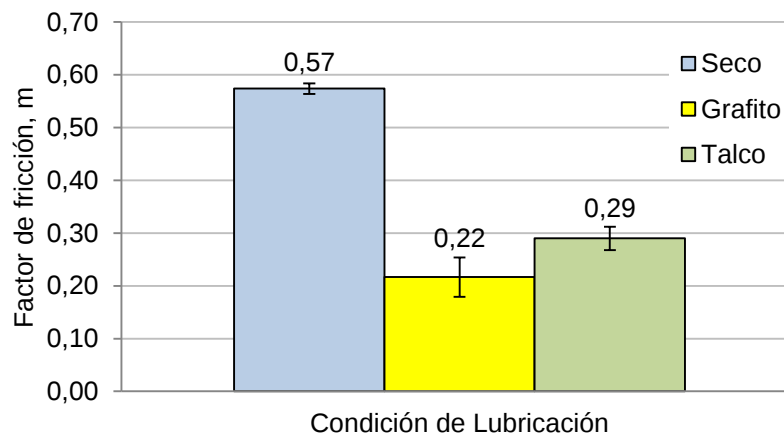
Se nota claramente que la aplicación de lubricantes a varios niveles de temperatura produce diferentes tipos de deformación en el anillo. El aumento en el diámetro interno del anillo indica una condición de fricción baja entre las superficies en contacto, mientras que una reducción en el diámetro interno indica una condición de fricción alta entre superficies. Observando los cambios geométricos de los anillos se puede realizar una evaluación cualitativa de la fricción mediante este ensayo.

Se observa que se presenta una condición de fricción alta en los anillos (a), (d) y (f) de la Figura 40 que corresponden a la condición de lubricación en seco a 250 y 350 °C, y a la lubricación con talco a 350 °C. De igual manera, se observa que se presenta una condición de fricción baja en los anillos (b), (c) y (e) de la misma figura que corresponden a la condición de lubricación con grafito a 250 y 350 °C, y a la lubricación con talco a 250 °C.

3.3.2 Comparación del factor de fricción para las condiciones de lubricación evaluadas a 250°C

En la Figura 41 se muestra un diagrama donde se compara el factor de fricción para cada condición de lubricación evaluada a 250°C usando el ensayo de compresión de anillo. Estos valores fueron tomados a partir de la Tabla 15.

Figura 41. Comparación del factor de fricción a 250 °C



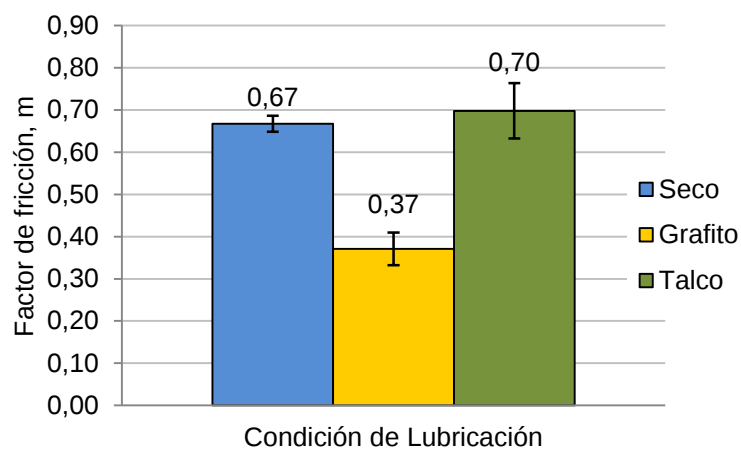
Para la temperatura de conformación de 250°C, la condición donde se presenta una mayor fricción es en la lubricación en seco ($m = 0.57 \pm 0.01$) y la condición

que presenta una menor fricción es en la lubricación con grafito ($m = 0.22 \pm 0.04$). El talco también posee un desempeño similar al grafito ya que el valor de factor de fricción se acerca al del grafito, con una diferencia de 0.07.

3.3.3 Comparación del factor de fricción para las condiciones de lubricación evaluadas a 350°C

En la Figura 42 se muestra un diagrama donde se compara el factor de fricción para cada condición de lubricación evaluada a 350°C usando el ensayo de compresión de anillo. Estos valores fueron tomados a partir de la Tabla 15.

Figura 42. Comparación del factor de fricción a 350 °C



Para la temperatura de conformación de 350°C, la condición donde se presenta una mayor fricción es en la lubricación con talco ($m = 0.70 \pm 0.07$) y en seco ($m = 0.67 \pm 0.02$) mientras que la condición que presenta una menor fricción es en la lubricación con grafito ($m = 0.37 \pm 0.04$). Nótese que el talco tiene un factor de fricción similar a la condición más crítica de fricción, la condición en seco. Se pudo observar que después de realizar los ensayos a 350 °C el lubricante se convertía en una pasta de color marrón que se adhería fuertemente a las matrices.

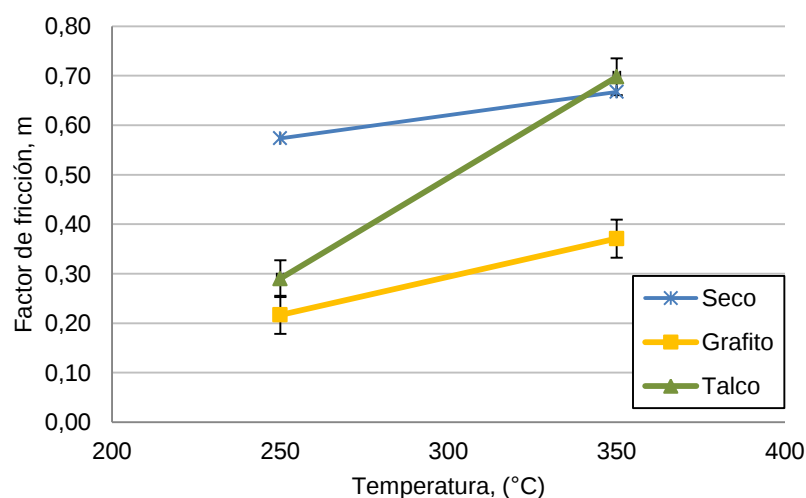
3.3.4 Desempeño de las condiciones de lubricación con la temperatura

En la Figura 43 se muestra el comportamiento de las condiciones de lubricación con la temperatura y se aprecia la dependencia del factor de fricción en la temperatura para las condiciones de lubricación evaluadas.

En esta figura se muestra que a medida que se aumenta la temperatura de conformado también se aumenta el factor de fricción, a su vez esto se manifiesta en un aumento en las condiciones friccionales entre la matriz y la pieza. A partir de la gráfica se concluye que el grafito es el mejor lubricante para la conformación de la aleación de Magnesio AZ31B en altas temperaturas ya que presentó los menores valores de fricción tanto a 250 como a 350°C. Este lubricante logra mantener su desempeño con la temperatura.

Se puede observar también que la condición más crítica sigue siendo la condición de lubricación en seco para el cual no hubo un cambio mayor en el factor de fricción. Por último la lubricación con talco muestra un desempeño cercano al grafito para temperaturas de conformado de 250 °C. Caso contrario sucede para temperaturas de conformado de 350 °C, donde el factor de fricción se acerca al valor de la condición más crítica del experimento, esto es, la lubricación en seco. El ensayo muestra que el talco disminuye su desempeño para temperaturas de conformado de 350 °C.

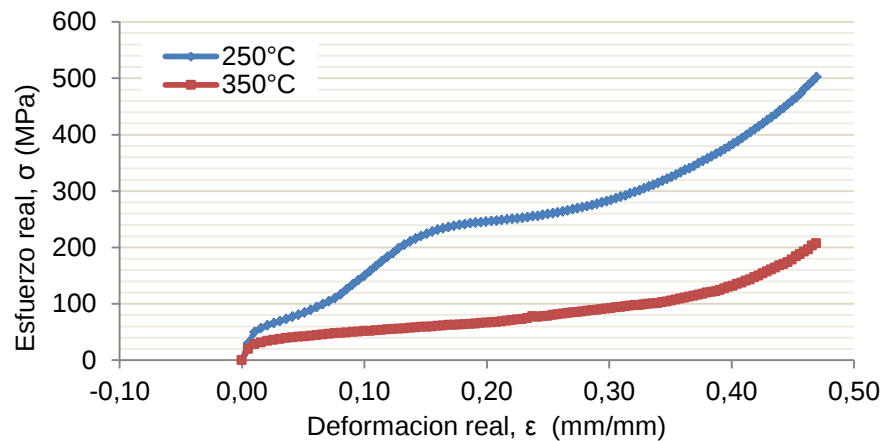
Figura 43. Dependencia del factor de fricción en la temperatura para varias condiciones de lubricación



3.4 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ENSAYO PARA LA ALEACIÓN AZ31B MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

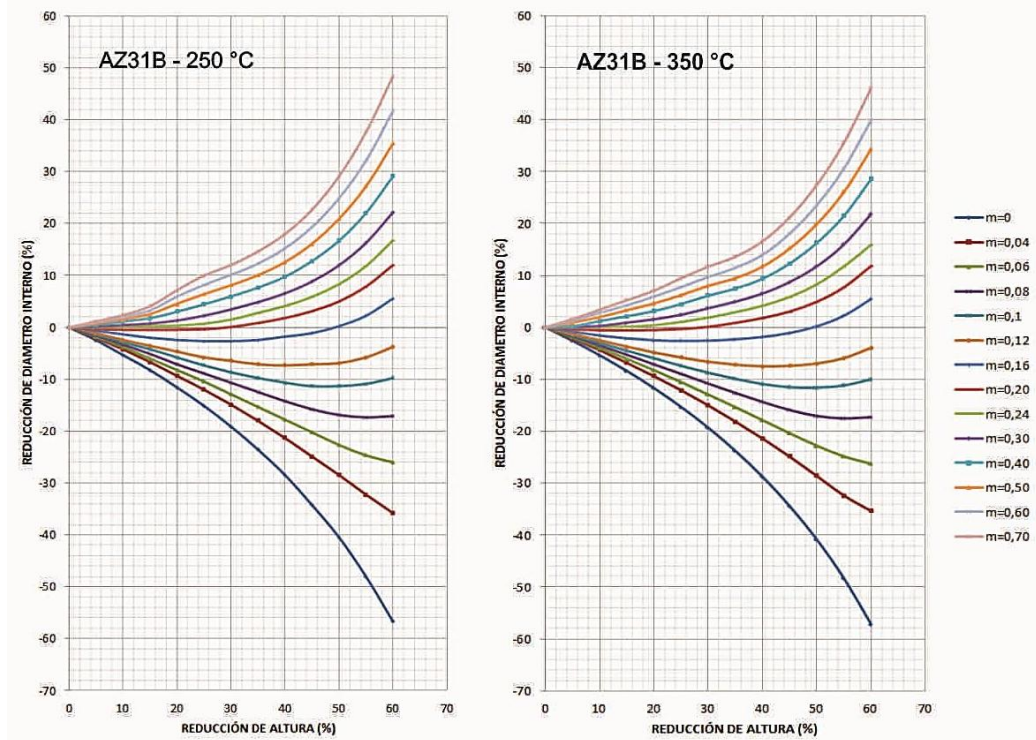
En la Figura 44 se presentan las curvas de fluencia que se utilizaron para la simulación del ensayo para la obtención de las curvas de calibración del ensayo para el material AZ31B. En estas curvas se nota que la temperatura es un factor crítico en la deformación de este tipo de aleaciones, más que otros materiales metálicos, ya que medida que se aumenta la temperatura de conformación se disminuye el esfuerzo necesario para que ocurra la deformación plástica.

Figura 44. Curvas promedio de fluencia para la aleación de Magnesio AZ31B



En la Figura 45 se muestran las curvas de calibración del ensayo para la aleación de Magnesio AZ31B a temperaturas de 250 °C y 350°C.

Figura 45. Curvas de calibración del ensayo para la aleación de Magnesio AZ31B

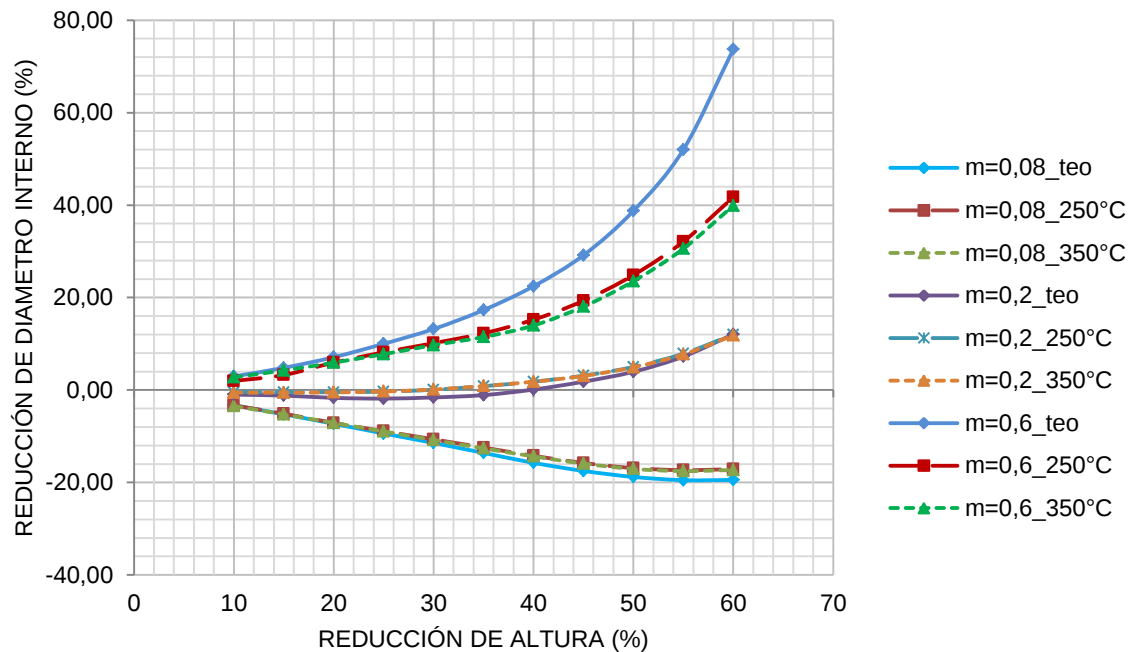


La simulación del ensayo mediante el software de elementos finitos DEFORM se realizó en un computador de escritorio con un procesador Intel Core i7 de 8 GB de memoria RAM. Cada simulación tomó en promedio un tiempo de 1 minuto, mostrando que la realización del modelo 2D es muy eficiente. Se garantizó la independencia del resultado de la malla usada, se verificaron tres tipos de mallas estructuradas con diferente número de elementos (1000, 3000 y 5000) y no se obtuvieron diferencias en los resultados. La simulación se realizó para valores de m desde 0 hasta 0.7. Para valores superiores a 0.7 la simulación no mostró convergencia y tuvo que ser abortada. Desafortunadamente este inconveniente no se pudo solucionar debido a que para estos casos se requiere construir una malla especial, que para este modelo numérico no se pudo construir por limitaciones del software.

Validación de las curvas de calibración: Cada una de las curvas de calibración fueron validadas por comparación con resultados teóricos obtenidos de acuerdo a las curvas de calibración teóricas de la fricción propuestas por DePierre *et al.* para un cuerpo de prueba cuya relación entre dimensiones es 6:3:2 mediante un método analítico. En la Figura 46 se muestra el resultado de esta comparación en la que se observan las curvas correspondientes a valores de factor de fricción muy

comunes en la conformación de metales que reporta la literatura: 0.08 que corresponde a un estado de fricción baja, 0.2 que es un valor típico en la conformación en tibio y 0.6 que corresponde a un estado de fricción en seco.

Figura 46. Validación de las curvas de calibración con resultados teóricos



En la figura anterior se muestra que las curvas elaboradas por el método numérico siguen la misma tendencia de las curvas teóricas. Para valores de m de 0.08 y 0.2 ambas curvas tienen mucha similitud, con un error menor al 3%. Caso contrario sucede con las curvas de fricción para valores de m de 0.6, donde tienen una diferencia notoria a medida que se aumenta el porcentaje de reducción de altura. Una explicación a esta diferencia puede ser que para valores altos de fricción, el material durante la etapa de conformado fluya hacia el exterior en mayor grado que hacia el interior. Es decir, el flujo plástico del material puede encontrar menor resistencia hacia el exterior y esta resistencia puede ser disminuida con el aumento en la temperatura, nótese que para valores de $m=0.6$ la curva de fricción de 350°C se encuentra por debajo de la curva a 250°C. Para todos los casos ambas curvas se asemejan en que siguen la misma dirección creciente de las curvas de calibración teóricas para valores habituales en los procesos de conformación, por lo que las curvas de calibración hechas por método numérico se dan por validadas.

4. CONCLUSIONES

- En este trabajo se diseñó y construyó un utillaje para los estudios de fricción en el conformado de la aleación de Magnesio AZ31B hasta una máxima temperatura de 400°C utilizando el ensayo de compresión de anillo. El funcionamiento del dispositivo fue satisfactorio ya que permitió la realización de los ensayos de compresión dentro de los rangos de temperaturas y condiciones de lubricación establecidas en el experimento y también se pudo utilizar para la prueba de compresión estandarizada.
- Se aplicó el ensayo de compresión para determinar el factor de fricción de la aleación de Magnesio AZ31B para niveles de temperatura de 250 y 350 °C y condiciones de lubricación en seco, grafito y talco. Se obtuvieron resultados confiables mediante la aplicación de una metodología clara y sencilla que a futuro servirá para aplicar este ensayo para el estudio del fenómeno de la fricción en otros materiales.
- Este experimento permitió la evaluación cualitativa de la fricción en la interfaz herramienta-pieza. Esta evaluación se realizó a través de macrografías hechas a los cuerpos de prueba después de realizar el ensayo en las que se observó específicamente el cambio en el diámetro interno del cuerpo deformado plásticamente. Los cambios dimensionales de esta zona es un índice de cuál es la condición de fricción que se presenta entre el cuerpo y la herramienta.
- Con este ensayo se pudo comprobar que la temperatura es la variable más importante a tener en cuenta en un proceso de conformado en tibio y que es la que tiene mayor influencia en la fricción entre la interfaz herramienta-material. El ensayo de compresión de anillo mostró que el factor de fricción interfasial m se incrementa cuando se aumenta la temperatura de conformación.
- Mediante el ensayo de compresión de anillo se determinó que para el conformado de la aleación de Magnesio AZ31B es recomendable usar grafito como lubricante para el rango de temperaturas que comprende entre los 250 y 350 °C. Con el talco se recomienda usarlo para un proceso de conformado realizado a 250 °C ya que al estar sometido a una temperatura de 350 °C el lubricante disminuye su desempeño y aumenta la fricción en las superficies de aplicación.

- Se determinaron las curvas de calibración de la fricción para la aleación de Magnesio AZ31B a las temperaturas de 250 y 350 °C. Estas curvas consideran el comportamiento plástico del material y las condiciones experimentales que se evaluaron en este trabajo. Se validaron estas curvas por comparación con las curvas teóricas de la fricción propuestas por DePierre *et al.* mostrando diferencias mínimas con las curvas hechas por simulación numérica para valores de factor de fricción iguales a 0.08 y 0.2 (error menor al 3%). Para valores de factor de fricción iguales a 0.6 tanto las curvas hechas por simulación numérica como las curvas teóricas presentaron diferencias notorias a medida que se aumenta el porcentaje de reducción de altura. A pesar de estas diferencias, estas curvas siguieron una tendencia similar a los resultados teóricos, por lo que se dieron por validadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Easton, A. Beer, and M. Barnett, "Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures," *JOM*, vol. 60, no. 11, pp. 57-62, Noviembre 2008.
- [2] Magnesium Elektron UK. (2013) Magnesium Elektron: Service & innovation in magnesium. [Online]. <http://www.magnesium-elektron.com/data/downloads/DS482.pdf>
- [3] F. Fereshteh-Saniee, H. Badnava, and S. M. Pezeshki-Najafabadi, "Application of T-shape friction test for AZ31 and AZ80 magnesium alloys at elevated temperatures," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 3221-3230, 2011.
- [4] H. Sofuoglu, H. Gedikli, and J. Rasty, "Determination of friction coefficient by employing the ring compression test," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 123, pp. 338-348, Julio 2001.
- [5] American Society for Metals ASM, *ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology*, Decima ed.: ASM International, 1992, vol. 18.
- [6] I. Kacmarcik, D. Movrin, and A. Ivanisevic, "One contribution to the friction investigation in bulk metal forming," *Journal for Technology of Plasticity*, vol. 36, no. 1, pp. 35-48, 2011.
- [7] P. M. Dixit, *Modeling of metal forming and machining processes: by finite element and soft computing methods*. Escocia, Reino Unido: Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [8] M. Kunogi, "A new method of cold extrusion," *Journal of Science Research Institute Tokio*, vol. 50, pp. 215-246, 1956.
- [9] A. T. Male and M. G. Cockcroft, "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of Bulk plastic deformation," *Journal of the institute of Metals*, vol. 93, pp. 38-46, 1964-65.
- [10] B. Avitzur, "Forging of Hollow Disks," *Israel Journal of Technology*, vol. 9, pp. 295-304, 1964.
- [11] J. B. Hawkyard and W. Johnson, "An analysis of the changes in geometry of short hollow cylinder during axial compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 9, pp. 163-182, 1967.
- [12] A. T. Male, V. DePierre, and G. Saul, "The Relative Validity of Concept of Coefficient of Friction and Interface Friction Shear Factor for Use in Metal Deformation Studies,"

ASLE Trans., vol. 16, pp. 177-184, 1972.

- [13] V. DePierre, F. Gurney, and A. T. Male, "Mathematical calibration of the ring test with bulge formation," USAF Materials Laboratory, EUA, Technical Report No. AFML-TR-72-37 1972.
- [14] E. Dominguez, "Obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas," Universidad Autónoma De Nuevo León, Nuevo León, México, Tesis de Maestría, 2003.
- [15] F. Matuda, "Determinação do fator de atrito de ligas de alumínio conformadas à temperatura ambiente e a quente," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, Tesis de Pregrado, 2006.
- [16] D. Shahriari, A. Amiri, and M. H. Sadeghi, "Study on Hot Ring Compression Test of Nimonic 115 Superalloy Using Experimental Observations and 3D FEM Simulation," *Journal of Marterials Engineering and Performance*, vol. 19, pp. 633-642, Julio 2010.
- [17] Y. Zhu et al., "Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM," *Tribology International*, vol. 44, pp. 2074-2080, Julio 2011.
- [18] A. M. Camacho, A. I. Torralvo, C. Bernal, and L. Sevilla, "Investigations on Friction Factors in Metal Forming of Industrial Alloys," *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 564-572, 2013.
- [19] R. Matsumoto and K. Osakada, "Lubrication and Friction of Magnesium Alloys in Warm Forging," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 223-226, 2002.
- [20] B. L. Mordike and T. Ebert, "Magnesium: Properties — applications — potential," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 302, no. 1, pp. 37-45, Abril 2001.
- [21] American Society for Testing Materials, *ASTM B951 - 11: Standard Practice for Codification of Unalloyed Magnesium and Magnesium-Alloys, Cast and Wrought*. Estados Unidos: ASTM International, 2011.
- [22] J. A. Schey, *Procesos de Manufactura*, Tercera ed. México: Editorial McGraw-Hill, 2002.
- [23] J. Camarero de la Torre and A. Martínez Peña, *Matrices, moldes y utillajes*. España: CIE Dossat 2000, 2003.
- [24] American Society for Metals ASM, *ASM Handbook: Materials Selection and Design*,

Decima ed.: ASM International, 1992, vol. 20.

- [25] O. Koçac, "Analysis of formability of metals," Middle East Technical University, Ankara, Turquía, Tesis de Maestría, 2003.
- [26] M. V. Leite, "Estudo tribológico de superficies com topografia estruturada," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, Tesis de Doctorado, 2009.
- [27] E. M. Cangundo, "Avaliação experimental da condição tribológica no processo de corte por arranque de apara," Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, Tesis de maestría, 2009.
- [28] J. A. Ávila, H. E. Jaramillo, and F. Franco Arenas, "Evaluación de la resistencia mecánica de uniones soldadas mediante proceso SFA y GTAW de la aleación de magnesio AZ31B," *El Hombre y la Máquina*, no. 35, pp. 166 - 171, Julio - Diciembre 2010.
- [29] American Society for Testing Materials, *ASTM B661 - 12: Standard Practice for Heat Treatment of Magnesium Alloys*. Estados Unidos: ASTM International, 2012.
- [30] American Society for Testing Materials, *ASTM E209 - 00: Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates*. Estados Unidos: ASTM International, 2010.
- [31] J. Del Rio, *Conformación plástica de materiales metálicos (en frío y en caliente): forja, laminación, estirado, estampación, extrusión, embutición*. España: CIE Dossat 2000, 2005.