



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

“CARACTERIZACIÓN DE COEFICIENTE DE  
FRICCIÓN EN PROCESO DE FORJADO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. MIGUEL ÁNGEL NÚÑEZ CÁRDENAS

DIRECTORES:

DR. HÉCTOR PLASCENCIA MORA

DR. EDUARDO AGUILERA GÓMEZ

Salamanca, Gto.

Mayo de 2018

Salamanca, Gto., a      de mayo del 20 18.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN  
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
PRESENTE.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Miguel Angel Niñez Cárdenas del Programa de Maestría en Ingeniería Mecánica y cuyo número de NUA es: 912102 del cual soy director. El título de la tesis es: Caracterización de coeficiente de fricción en proceso de forjado

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
Héctor Plascencia Mora  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

  
Eduardo Aguilar Gómez  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
Susi Arce  
NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
Juan Francisco Revelos Arrada  
NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud e inteligencia para realizar este trabajo.

Agradezco a mi madre Ma. Guadalupe Cárdenas Medina, por todo su amor que siempre me ha dado y a mi Padre J. Jesús Núñez Corona por toda su confianza.

Mi más sincero agradecimiento a mis asesores, el Dr. Héctor Plascencia Mora y el Dr. Eduardo Aguilera Gómez por sus sabios consejos. También agradezco a mis sinodales, el Dr. José Ángel Diosdado de la Peña y el Dr. Juan Francisco Reveles Arredondo por tan valiosas observaciones que hicieron a mi trabajo.

Especial mención a la Universidad de Guanajuato por haber seleccionado a tan buenos profesores de posgrado, como el Dr. Elías Rigoberto Ledesma Orozco, el Dr. Adrián Hernández Pérez, el Dr. Sergio Cano Andrade, el Dr. Luz Antonio Aguilera Cortés, el Dr. J. Jesús Cervantes Sánchez, el Dr. Maximino Antonio González Palacios, el Dr. Arturo Lara López, el Dr. José Manuel Riesco Ávila, el Dr. José María Rico Martínez y el Dr. Agustín Vidal Lesso.

Un agradecimiento a mis compañeros de proyecto, el M. en C. Ismael Ruiz López y el M. en C. Diego Armando Gómez, porque me motivaron con su ejemplo de entrega.

Gracias al albergue Sagrado Corazón de Jesús por brindarme hospedaje durante toda mi estancia en la ciudad de Salamanca. Agradecimiento especial al Excmo. Monseñor Gerardo Velázquez Solís y a la Lic. Ma. del Carmen Guerra Zúñiga, por toda su amabilidad y apoyo, me hicieron sentir como en casa.

También agradezco a mis compañeros y amigos José Antonio González Hernández, Miguel Ángel García Sancen y Julio Cesar Galvis Chacón por todos los momentos tan agradables que pasamos. Así mismo un agradecimiento a mis amigos del albergue Sagrado Corazón de Jesús por todas las bonitas experiencias compartidas.

Finalmente quiero agradecer la confianza que me brindó el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad de Guanajuato y el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan.

# Contenido General

Contenido General .....	1
Contenido de figuras .....	3
Contenido de tablas .....	8
Resumen.....	9
Abstract .....	10
Justificación .....	11
Objetivo.....	14
1 Estado del arte .....	15
1.1 Generalidades de los procesos de manufactura.....	15
1.2 Forja.....	18
1.2.1 Antecedentes .....	19
1.2.2 Forjabilidad.....	20
1.2.3 Régimen plástico .....	21
1.2.4 Temperatura.....	24
1.2.5 Velocidad de deformación unitaria.....	25
1.2.6 Fricción y lubricación.....	28
1.3 Metodologías de caracterización de la fricción en procesos de formado de metales. ....	31
1.3.1 Metodología teórico - matemática. ....	31
1.3.2 Metodología de simulación numérica.....	35
1.3.3 Metodología experimental.....	37
2 Metodología experimental.....	41
2.1 Definición de parámetros del espécimen .....	41
2.1.1 Selección de forma, dimensiones, tolerancias y acabado superficial del espécimen. 42	
2.1.2 Selección del material .....	43
2.1.3 Selección de temperatura .....	44
2.1.4 Selección de parámetros de lubricación .....	45

2.2	Definición de parámetros del equipo.....	46
2.2.1	Análisis de la carga requerida .....	49
2.2.2	Análisis del desplazamiento y tasa de deformación .....	52
2.2.3	Selección de herramental y dados .....	55
2.3	Proceso de fabricación de anillos.....	60
2.4	Diseño experimental de pruebas .....	64
2.5	Ejecución de pruebas de compresión de anillo.....	65
3	Metodología de la simulación .....	70
3.1	Descripción del software LS-DYNA® .....	70
3.2	Generación de la geometría del espécimen.....	71
3.3	Discretización del modelo .....	72
3.3.1	Formulación de los elementos .....	73
3.4	Asignación de las propiedades de los materiales. ....	74
3.5	Aplicación de cargas y condiciones de frontera.....	78
3.5.1	Asignación de restricciones de movimiento .....	79
3.5.2	Contactos en LS-DYNA® .....	80
3.6	Generación de solución de simulación .....	85
3.6.1	CONTROL .....	85
3.6.2	DATABASE.....	86
3.6.3	Generación de solución por FEM. ....	87
4	Análisis de resultados.....	90
4.1	Análisis estadístico de resultados de pruebas experimentales .....	90
4.2	Análisis estadístico de resultados de simulación por MEF.....	92
4.3	Análisis y validación de resultados.....	96
	Conclusiones .....	102
	Trabajo futuro .....	103
	Bibliografía .....	105
	Apéndice 1: Dispersión de resultados en Curvas de Calibración .....	110
	Apéndice 2: Ensamble porta dados de cuarzo (vista explosionada).....	110

## Contenido de figuras

Figura 1.1. Conjunto del proceso de formado. [5] .....	15
Figura 1.2. Clasificación de los procesos de manufactura. [6] .....	16
Figura 1.3. Clasificación de los procesos de deformación. [7] .....	17
Figura 1.4. Diversos productos forjados. ....	19
Figura 1.5. “La Fragua de Vulcano” de Diego Velázquez (1630). [8].....	19
Figura 1.6. Utensilios usados en la forja antigua. [9] .....	20
Figura 1.7. (a) Tocho cilíndrico recalado entre matrices planas. (b) Deformación uniforme del tocho sin fricción. (c) Deformación con fricción. [7] .....	21
Figura 1.8. Diagramas esfuerzo – deformación de ingeniería (continua) y verdadero (punteada) de una prueba de tensión axial, denotando la zona elástica en rojo y la zona plástica en azul. [11] ...	23
Figura 1.9. Representación logarítmica de la obtención del coeficiente de resistencia K y el exponente de endurecimiento por deformación n. [10] .....	24
Figura 1.10. (a) Efecto de velocidad de deformación unitaria sobre la resistencia a la fluencia a temperatura elevada, (b) la misma relación graficada en coordenadas logarítmicas. [6] .....	26
Figura 1.11. Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. [6] .....	27
Figura 1.12. Esquema de fenómeno abrasivo debido a partículas residuales en la pieza. [13] .....	29
Figura 1.13. Esquema de aplicación de película de grafito en la interfaz dado-pieza. [14].....	30
Figura 1.14. Metodologías de caracterización de fricción. ....	31
Figura 1.15. Esquema de dirección de flujo del metal en compresión de anillo. [21].....	32
Figura 1.16. Curvas de calibración propuestas por Male and DePierre. [22] .....	34
Figura 1.17. Diagrama esquemático de anillo en dos dimensiones para cálculos de elemento finito [32]. .....	35
Figura 1.18. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo en caliente obtenidas por Rudkins et al. [33].....	35
Figura 1.19. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo en caliente obtenidas por D. Shahriari et al. [35].....	36
Figura 1.20. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo con lubricación de cristal a un coeficiente de transferencia de calor de $5 \text{ kW(m}^2\text{K)}^{-1}$ [36].....	36

Figura 1.21. Anillos obtenidos por Male&Cockcroft; sin deformar, deformado a baja fricción, a media fricción y a alta fricción (de izquierda a derecha) [24].....	37
Figura 1.22. Esquema de factor de fricción bajo (imagen izquierda) y esquema de factor de fricción alto (imagen derecha) [7].....	38
Figura 1.23. Curvas de calibración de fricción con proporciones: a) 6:3:2, b) 6:3:1, c) 6:3:0.5 [38].	39
Figura 1.24. Diagrama representativo de la prueba de extrusión de doble copa (izquierda); probeta final despues de la prueba de extrusión (derecha) [40]. .....	40
Figura 2.1. Diagrama de parámetros experimentales.....	41
Figura 2.2. Diagrama de parámetros del espécimen. ....	41
Figura 2.3. Anillos concavo, rectangular y convexo propuesto por X. Tan et al. [53] (Imagen izquierda); anillo con tolerancias y rugosidad propuesta por Yanchun Zhu et al. [36] (Imagen derecha). ....	43
Figura 2.4. Dimensionado, tolerancias y acabado superficial de probeta de anillo propuesto para el presente trabajo de investigación.....	43
Figura 2.5. Grafito disuelto en agua utilizado como lubricante.....	46
<i>Figura 2.6. Prensa hidráulica YL32-100 ubicada en DICIS – UG. ....</i>	<i>48</i>
Figura 2.7. Consideración de volumen constante y deformación uniforme sin abarrilamiento. [7]	49
Figura 2.8. Esfuerzo máximo obtenido de pruebas de compresión de cilindros @1000°C y 30s <sup>-1</sup> en probetas de acero titular por la TU Bergakademie Freiberg. [61] .....	50
Figura 2.9. Modelo geométrico simplificado de la probeta de anillo elaborado en NX® con superficies de compresión superior e inferior, así como planos de simetría (izquierda) y su correspondiente modelo de elementos finitos elaborado en MSC Patran (derecha). [61] .....	51
Figura 2.10. Resultados de deformación unitaria verdadera en probeta de anillo sin efecto de fricción correspondiente al último incremento del paso de carga obtenida en MSC.Marc®. [61]...	51
Figura 2.11. Resultados de esfuerzos de von Mises en MPa para una probeta de anillo en condición sin fricción (izquierda) y en condición de fricción con lubricación de grafito 0.3 (izquierda) en el último incremento del paso de carga obtenido en MSC.Marc®. [61].....	51
Figura 2.12. Gráfica de carga en mTon versus pasos de carga de la simulación de compresión de anillos con fricción cero y fricción de forja en caliente con lubricación de grafito. [61] .....	51
Figura 2.13. Perfiles de velocidades de las pruebas para cada tasa de deformación en relación con la altura de las probetas durante las pruebas hechas en Freiberg. [61].....	53

Figura 2.14. Perfiles de velocidad del herramental superior respecto al tiempo en escala logarítmica hechas en Freiberg. [61].....	53
Figura 2.15. Perfiles de velocidades de las pruebas de tasa de deformación en relación con la altura a velocidades constantes para el presente proyecto.....	54
Figura 2.16. Vistas del herramental construido en la primera etapa del proyecto. ....	56
Figura 2.17. Fotografía herramental construido en la primera etapa del proyecto efectuando una prueba de compresión de probeta cilíndrica a altas temperaturas.....	56
Figura 2.18. Herramentales diseñados para actuar como tope, para la prueba de compresión de anillo a altas temperaturas. ....	57
Figura 2.19. Proceso de corte de placa (imagen izquierda) y redondeo (imagen derecha) de herramentales tope.....	58
Figura 2.20. Proceso de corte de redondo (imagen izquierda) y pulido con lija (imagen derecha) de herramentales tope.....	59
Figura 2.21. Herramentales fabricados para actuar como tope, para la prueba de compresión de anillo a altas temperaturas. ....	59
Figura 2.22. Ensamble de dado inferior con las tres distintas rondanas que actuarán como topes.60	
Figura 2.23. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.....	60
Figura 2.24. Montaje de redondo de acero especial en cortadora por chorro de agua abrasiva marca Dynamic Waterjet. ....	61
Figura 2.25. Primera pieza cortada con chorro de agua abrasiva marca Dynamic Waterjet.....	61
Figura 2.26. Cilindrado de tocho cilíndrico en torno mecánico convencional.....	62
Figura 2.27. Careado de tocho cilíndrico en torno mecánico convencional.....	63
Figura 2.28. Modelado de 7 tochos cilíndricos de 20 mm de diámetro por 45 mm de longitud. ....	63
Figura 2.29. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.....	63
Figura 2.30. Modelado de obtención de anillos de 7 mm de altura. ....	64
Figura 2.31. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.....	64
Figura 2.32. Anillos que serán utilizados en las pruebas experimentales.....	65
Figura 2.33. Sistema para ejecución de pruebas .....	66
Figura 2.34. Montaje de herramentales tope en prensa. ....	66

Figura 2.35. Horno Carbolite Gero 3000® para calentar los anillos. ....	67
Figura 2.36. Tabique refractario untado con pasta lubricante [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] dentro del horno. ....	67
Figura 2.37. Horno con anillos calentados a 1300°C. ....	68
Figura 2.38. Prueba de compresión de anillo a 1000°C. ....	69
Figura 3.1. Línea de tiempo de LS-DYNA®. ....	71
Figura 3.2. Algunas aplicaciones de LS-DYNA®. ....	71
Figura 3.3. Modelado de probeta de anillo en LS-Prepost. ....	72
Figura 3.4. Discretizado de probeta de anillo en LS-Prepost. ....	72
Figura 3.5. Discretizado de capas de dados de compresión en LS-Prepost. ....	73
Figura 3.6. Formulación del elemento de sección sólida para probeta en LS-Prepost. ....	73
Figura 3.7. Formulación del elemento de sección capa para dados en LS-Prepost. ....	74
Figura 3.8. Asignación de propiedades mecánicas de los dados en LS-Prepost. ....	75
Figura 3.9. Curva de flujo plástico de la probeta de anillo. ....	75
Figura 3.10. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] ....	77
Figura 3.11. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] ....	77
Figura 3.12. Asignación de propiedades a cada una de las partes en LS-Prepost. ....	78
Figura 3.13. Curva de velocidad del dado superior. ....	78
Figura 3.14. Asignación de velocidad del dado superior en LS-Prepost. ....	79
Figura 3.15. Restricción de nodos del modelo de anillo en LS-Prepost. ....	79
Figura 3.16. Contacto inadecuado entre superficie maestra y esclava en el Método de Restricción Cinemática. [64]. ....	81
Figura 3.17. Cuatro segmentos maestros albergando un nodo esclavo y un nodo maestro [64]. ...	82
Figura 3.18. Asignación de propiedades de contacto de la interfase en LS-DYNA®. ....	83
Figura 3.19. Asignación de propiedades de control en LS-DYNA®. ....	86
Figura 3.20. Asignación de comandos de archivos de salida de resultados DATABASE_ASCII Y DATABASE_BINARY_D3PLOT en LS-DYNA®. ....	87
Figura 3.21. Asignación de comandos de archivos de salida de resultados DATABASE_BINARY_D3THDT y DATABASE_EXTENT_BINARY en LS-DYNA®. ....	87

Figura 3.22. Generación de la solución del FEM con ANSYS® .....	88
Figura 3.23. Archivos generados por el solucionador de Elementos Finitos ANSYS® .....	89
Figura 4.1. Imagen de dados de Acero AISI-SAE 1045 dañados al final de las pruebas de compresión de anillo.....	90
Figura 4.2. Anillos después de la prueba de compresión experimental. ....	91
Figura 4.3. Medición de altura y diámetro interno de anillo con Vernier Digital Mitutoyo® .....	91
Figura 4.4. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	92
Figura 4.5. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	92
Figura 4.6. Resultados de desplazamiento en Z (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	93
Figura 4.7. Resultados de velocidad en Z (mm/s) de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	93
Figura 4.8. Resultados de deformación plástica efectiva de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	94
Figura 4.9. Resultados de esfuerzo efectivo de Von Mises (MPa) de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	94
Figura 4.10. Análisis nodal de desplazamiento de radio interno (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	95
Figura 4.11. Análisis nodal de reducción de altura (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA® .....	95
Figura 4.12. Tratamiento de resultados numéricos para generar las curvas de calibración en LS-DYNA® .....	96
Figura 4.13. Curvas de calibración de fricción en LS-DYNA® .....	96
Figura 4.14. Curva de validación de Relación de Energía en LS-DYNA® .....	98
Figura 4.15. Curva de validación de Relación de Energía de Deslizamiento en LS-DYNA® .....	99
Figura 4.16. Curva de validación de Relación de Energía Cinética en LS-DYNA® .....	99
Figura 4.17. Curva de validación de Relación de Energía Interna en LS-DYNA® .....	99
Figura 4.18. Curva de validación de Relación de Energía de Hourglass en LS-DYNA® .....	100
Figura 4.19. Presentación de resultados en curva de calibración de fricción. (Ver Anexo 1 para ver en tamaño más amplio) .....	100

## Contenido de tablas

Tabla 1.1. Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación y coeficiente de fricción en forja en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización. [6] .....	27
Tabla 2.1. Distintas geometrías de anillo, propuestas por diversos autores.....	42
Tabla 2.2. Materiales del anillo usados por diversos autores. ....	44
Tabla 2.3. Temperatura implementada en distintos experimentos por diversos autores. ....	45
Tabla 2.4. Veinticuatro distintos lubricantes usados en prueba de compresión de anillo.....	46
<i>Tabla 2.5. Equipos con su respectiva capacidad de carga usada por algunos autores [24] [56] [57] [48] [14].</i> .....	47
<i>Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la prensa YL32-100</i> .....	49
Tabla 2.7. Análisis comparativo de resultados de cargas máximas analíticas y numéricas, así como sus errores asociados al resultado analítico. [61].....	51
<i>Tabla 2.8. Deformación y tasa de deformación usadas por algunos autores [24] [57] [48] [14] [35] [59].</i> .....	52
Tabla 2.9. Duración de las pruebas de compresión para cada tasa de deformación. [61].....	54
<i>Tabla 2.10. Tabla de materiales de los dados o matrices implementados por varios autores.</i> .....	55
Tabla 2.11. Propiedades mecánicas del acero D2 y acero AISI-SAE 1045. [62] [63].....	57
Tabla 2.12. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.....	65
Tabla 2.13. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.....	65
Tabla 3.1. Consistencia de Sistema de Unidades. ....	74
Tabla 4.1. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	92
Tabla 4.2. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	92
Tabla 4.3. Validación del modelo numérico a través del análisis de sus energías. [71] .....	97
Tabla 4.4. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	100
Tabla 4.5. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] .....	100

## Resumen

El presente trabajo de investigación surge de la segunda etapa del proyecto denominado “Forja moderna de cigüeñales con aceros especiales para motores de alto rendimiento”, donde se han desarrollado procedimientos de caracterización de un acero especial. La contribución de la presente tesis describe en su contenido la caracterización del coeficiente de fricción en el proceso de forjado.

En el primer capítulo se presenta una reseña histórica, y se enuncian los conocimientos previos para la comprensión y desarrollo de la caracterización del coeficiente de fricción. En el segundo capítulo se describe la metodología experimental que se siguió para efectuar las pruebas de compresión de anillo. Posteriormente se enmarca una metodología de simulación numérica en el software LS-DYNA® y se generan una serie de curvas de calibración de fricción. En el último capítulo se unen los resultados experimentales y de simulación numérica para determinar los coeficientes de fricción del proceso de forjado caracterizado.

## Abstract

The present research work arises from the second stage of the project called "Modern forging of crankshafts with special steels for high performance engines", where the procedures for the characterization of special steel have been developed. The contribution of this thesis describes in its content the characterization of friction coefficient in the forging process.

A historical review is presented in the first chapter, and the previous knowledge for the understanding and development of the coefficient of friction characteristic is stated. In the second chapter, the experimental methodology that was followed to perform ring compression tests is described. Subsequently, a numerical simulation methodology is framed in the LS-DYNA® software and a series of friction calibration curves are generated. In the final chapter the experimental and numerical simulation results are fused to determine the friction coefficients of the characterized forging process.

## Justificación

Durante el 2016, la industria automotriz alcanzó cifras históricas de producción, exportación y venta interna de vehículos, además de que fue el año del debut de México en la fabricación de unidades híbridas y eléctricas. En el año, el sector generó unos 52,000 millones de dólares de divisas, concretó y anunció inversiones en cinco nuevas plantas productoras de vehículos por 7,600 millones de dólares, alcanzó la fabricación de 3,450,000 unidades; exportaciones por 2,760,000 vehículos y la venta en el mercado interno de 1,600,000 de automotores. [1]

México se ubica en el sexto lugar de producción global de autos, solo por detrás de China, Estados Unidos, Alemania, Japón y Corea del Sur. En una mirada futurista, la República Mexicana continuará en crecimiento hasta el punto de aumentar la producción a 4,100,000 vehículos para el año 2017, y se espera que para el año 2020 esta cifra aumente a 4.8 millones. [2]

Las empresas denominadas Original Equipment Manufacturer (OEM), han sido impulsadas por la presencia de diez de las más importantes ensambladoras de vehículos (pesados y ligeros) del mundo, tales como GM, Ford, Chrysler, VW, Nissan, Honda, BMW, Toyota y Mercedes-Benz. Para poder cumplir con fechas de entrega, muchos proveedores se han ubicado alrededor de las grandes armadoras de vehículos en México, entre ellas Pintura, Estampado y Montajes S. A. P. I. de C. V. (PEMSA) ubicada en Celaya, Guanajuato. [3]

El sector automotriz en México está pasando gradualmente de producción de maquila hacia el desarrollo de tecnología propia, dirigida a nichos específicos como la fabricación de piezas con propiedades mecánicas de última generación obtenidas con distintos procesos de fabricación, siendo el proceso de forja uno de los ideales para la obtención de piezas resistentes a altos esfuerzos.

La influencia de la fricción en el proceso de forjado de metales es muy amplio y poco estudiado, lo cual abre la puerta para llevar a cabo el presente trabajo de investigación y que detonará en la evolución del sector automotriz.

La presente propuesta de investigación surge durante la segunda etapa del proyecto denominado “Forja moderna de cigüeñales con aceros especiales para motores de alto rendimiento”, de la convocatoria 2016 del programa de estímulos a la investigación, desarrollo tecnológico e innovación del CONACYT, en su modalidad PROINNOVA con clave 231116, en el cual la Universidad de Guanajuato (UG) participó como institución vinculada

en conjunto con Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) como proveedores tecnológicos para la empresa Pintura, Estampado y Montajes S. A. P. I. de C. V. (PEMSA).

Durante dicha etapa se desarrollaron pruebas para obtener curvas de flujo plástico a diferentes velocidades de deformación a altas temperaturas (hasta 1300°C), así como pruebas básicas para determinar coeficientes de fricción usando probetas de anillo, surgiendo la necesidad de obtener una metodología teórico experimental para caracterizar el coeficiente de fricción en la interfase matriz - pieza del proceso de forjado. La metodología servirá para incluir dichos coeficientes de fricción experimentales durante el diseño de herramientas para forja para reducir errores del desempeño de los mismos.

El conocimiento del comportamiento plástico de un material bajo sus condiciones de operación como la deformación, temperatura, esfuerzos, fricción. etc., son extremadamente importantes para el diseño óptimo del proceso de producción y poder lograr las piezas con las características y especificaciones deseadas. En procesos de formado de metal, la fricción juega un rol importante para determinar la vida de la herramienta, la forjabilidad de la pieza, y la calidad del producto final. Una fricción excesiva conduce a la generación de calor y desgaste superficial que contribuyen al fallo prematuro de la herramienta y a obtener productos de mala calidad.

Con el fin de reducir los efectos perjudiciales de la fricción, se usan algunos lubricantes. Aunque debe notarse que lo importante es conocer el valor de la fricción, ya que este valor es necesario para simular y mejorar algunos procesos de formado de metales, por ejemplo, en procesos como el rolado, conformado por extrusión, forjado por extrusión, en algunos casos los efectos de fricción benefician el proceso y acabado del producto final. Por lo tanto, en el diseño de operaciones de formado de metales por forja es necesario cuantificar la fricción y evaluar el comportamiento del material bajo las condiciones de operación a las que será sometido, con el fin de optimizar el proceso de fabricación.

La dificultad de evaluación de las condiciones de fricción existentes en las operaciones de conformado de metales, han forzado a la evolución de varias pruebas existentes y la exploración de nuevas [4]. Entre ellas, la prueba de compresión de anillo ha probado ser una de las mejores pruebas para cuantificar la fricción. Esta prueba es realizada usando un pequeño espécimen en forma de anillo, presionado axialmente entre dos dados paralelos, semejante a una prueba de forja abierta. El diámetro interno del anillo puede incrementarse, disminuirse o mantenerse, depende de la cantidad de fricción existente en la interfase pieza-herramienta. Cuando existe baja fricción el diámetro interno del anillo aumenta y cuando

existe alta fricción disminuye. Este cambio dimensional del diámetro interno del anillo puede tener un alto significado para evaluar la fricción, usando una geometría apropiada.

La mayor ventaja de usar la prueba de compresión de anillo para evaluar las condiciones de fricción es que sólo implica la medición física del cambio de forma, a diferencia de otras pruebas que requieren las propiedades mecánicas del material y las cargas de conformación. Las pruebas experimentales que presentan las mayores dificultades debido a los requerimientos del experimento son las que involucran altas temperaturas y altas tasas de deformación. [5]

## Objetivo

Caracterizar el coeficiente de fricción en la interfase matriz – pieza del proceso de forjado.

# 1 Estado del arte

## 1.1 Generalidades de los procesos de manufactura

Existen diferentes normas que se refieren a los materiales y procesos de manufactura, tales como ASTM, ASME, AISI, SAE y otras dependiendo de los diferentes países, en este trabajo se hace referencia a las normas DIN que son usadas por un sector de la industrial automotriz. Como está descrito en la norma DIN 8580, los procesos de manufactura se definen en seis grupos principalmente: formado, moldeado, sustracción, unión, modificación de las propiedades de material y recubrimiento.

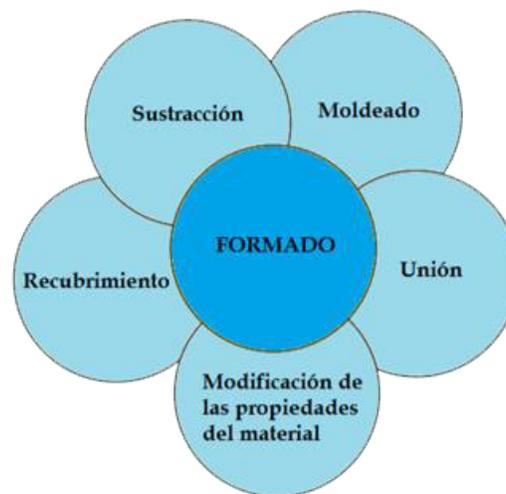


Figura 1.1. Conjunto del proceso de formado. [5]

Definido por la norma DIN 8580, el formado de metales es la manufactura a través de sus dimensiones o modificación plástica de una forma, siempre y cuando se mantenga la masa y la unión de material. En contraste a la deformación, el formado es la modificación de la forma con una geometría controlada. Las técnicas para el proceso de formado se clasifican acorde a la norma DIN 8582, esto dependiendo de la dirección a la cual se le aplican los esfuerzos, quedan las siguientes cinco clasificaciones:

- Formado por condiciones de compresión (NORMA DIN 8583)
- Formado por condiciones de compresión y tensión (NORMA DIN 8584)
- Formado por condiciones de tensión (NORMA DIN 8585)
- Formado por pandeo (NORMA DIN 8586)
- Formado por condiciones de cortante (NORMA DIN 8587)

Una vez sub clasificadas las condiciones de formado dependiendo de la dirección de esfuerzo, cada una de las sub clasificaciones posee una norma DIN diferente. Para cada una de las normas de formado de materiales, existen varios procesos de manufactura que se clasifican de la siguiente manera:

- DIN 8583: rolado, formado con dado abierto, formado con dado cerrado, acuñado y formado por fuerza a través de un orificio.
- DIN 8584: separación de materiales, embutido, doblado, doblado por rotación y abultamiento por arrugas.
- DIN 8585: extensión, expansión y formado por estiramiento.
- DIN 8586: pandeo con movimiento lineal de dado y pandeo con movimiento rotatorio de dado.
- DIN 8587: Desplazamiento y torsión. [5]

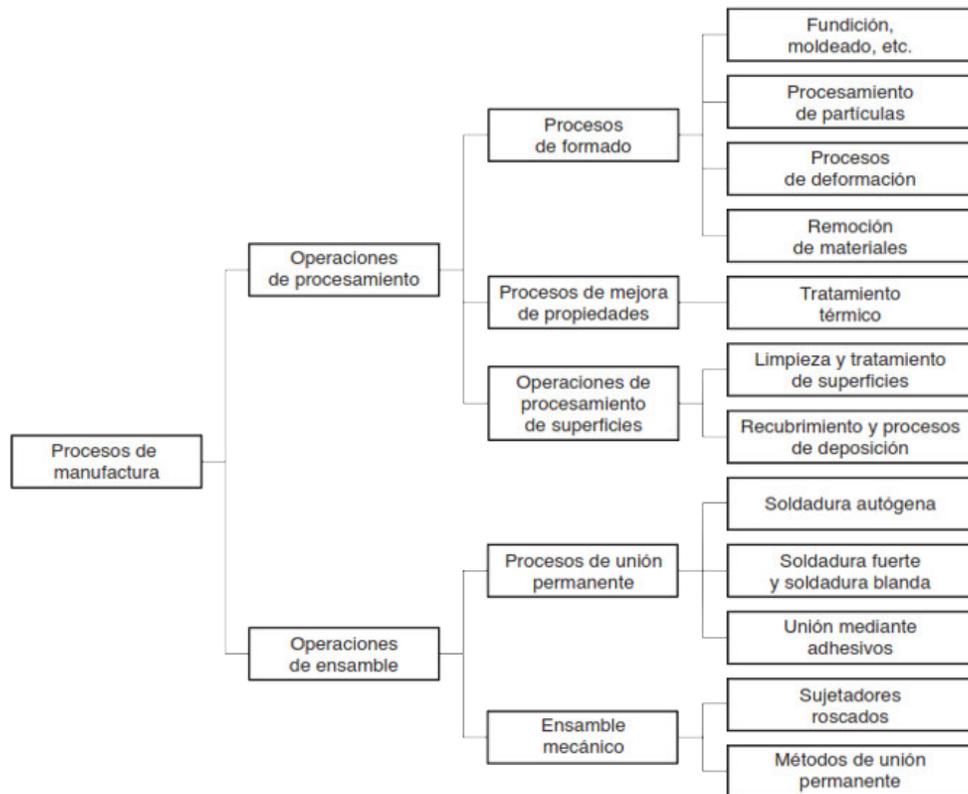


Figura 1.2. Clasificación de los procesos de manufactura. [6]

Según Groover [6] los procesos de manufactura se dividen en dos tipos básicos: 1) las operaciones del proceso, y 2) las del ensamblado. Una operación del proceso hace que un material de trabajo pase de un estado de acabado a otro más avanzado que está más cerca del producto final que se desea. Se agrega valor cambiando la geometría, las propiedades o

la apariencia del material de inicio. En general, las operaciones del proceso se ejecutan sobre partes discretas del trabajo, pero algunas también son aplicables a artículos ensamblados. Una operación de ensamblado une dos o más componentes a fin de crear una entidad nueva, llamada ensamble, sub ensamble o algún otro término que se refiera al proceso de unión (por ejemplo, un ensamble soldado se denomina soldadura). (Ver figura 1.2)

Kalpakjian [7] menciona que, la producción de partes exige una extensa variedad de procesos de manufactura en continua expansión, y por lo general hay más de un método de manufactura para una parte a partir de un material dado. Las categorías de dichos métodos son las siguientes:

- a. Fundición: De molde desechable y de molde permanente.
- b. Formado y moldeado: Laminado, forjado, extrusión, estirado o trefilado, formado de lámina, metalurgia de polvos y moldeo. (Ver figura 1.3)

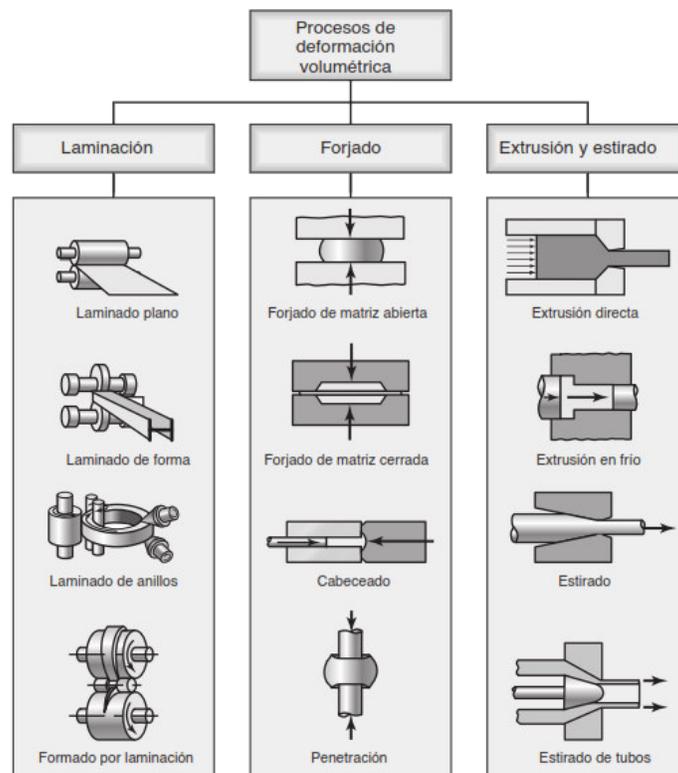


Figura 1.3. Clasificación de los procesos de deformación. [7]

- c. Maquinado: Torneado, mandrilado, taladrado, fresado, cepillado, escariado y rectificado, maquinado ultrasónico, maquinado químico, eléctrico y electroquímico; y maquinado por rayo de alta energía.

- d. Unión: Soldado, soldadura blanda, soldadura fuerte, unión por difusión, unión por adhesivos y unión mecánica.
- e. Acabado: Asentado, lapidado, pulido, satinado, rebabeado, tratamiento superficial, recubrimiento y chapeado.
- f. Nanofabricación: Es la tecnología más avanzada, capaz de producir partes con dimensiones en el nivel nano, una milmillonésima de metro ( $1 \times 10^{-9}$  m); típicamente comprende procesos como técnicas de ataque, haces de electrones y rayos láser.

Las ventajas de la forja como parte del proceso de deformación volumétrica es que a producciones de componentes idénticos o de productos normalizados, los costos y tiempos son muy rentables, las piezas forjadas adquieren excelentes propiedades mecánicas e integridad metalúrgica en comparación con cualquier otro proceso de fabricación, aunque el proceso de maquinado también otorga buenas propiedades metalúrgicas al material pero el proceso es mucho más costoso por el desperdicio de material y los tiempos de maquinado. Es de tomar en cuenta que no todos los materiales se deforman fácilmente, se puede tener problemas con los aceros inoxidable y aceros de alto contenido de carbono o aleados.

## 1.2 Forja

El proceso de forja se define como una operación de conformado mecánico por la cual se obtienen piezas de sección transversal irregular al comprimir un bloque metálico, denominado tocho, entre dos útiles de trabajo llamados estampas o dados, aprovechando la plasticidad del material. En virtud de los elevados niveles de deformación inherentes al proceso, éste se realiza normalmente en caliente. Este proceso permite fabricar piezas de materiales ferrosos y no ferrosos en dimensiones, geometrías y pesos muy variados que serían imposible obtener mediante otras operaciones de fabricación. Una de sus ventajas es que la pieza de trabajo sale de este proceso con dimensiones y geometría cercanas a las finales, implicando mayor facilidad y rapidez para su maquinado. Algunos componentes que se pueden obtener por forja son los cigüeñales, árboles de levas, ejes, implantes biomédicos, rotores de turbina, engranes, palos de golf, bielas, pistones, etc. (ver figura 1.4)



Figura 1.4. Diversos productos forjados.

### 1.2.1 Antecedentes

La forja es la forma más antigua de trabajar los metales, sus antecedentes se encuentran en la labor de los herreros y en las fraguas de los tiempos bíblicos y mitológicos, se practicaban cuando menos desde 4000 a.C., en sus orígenes representó la deformación del material (hierro) por efecto de martilleo al colocarlo sobre el yunque (ver figura 1.5). [8]



Figura 1.5. "La Fragua de Vulcano" de Diego Velázquez (1630). [8]

En sus orígenes se calentaba la pieza metálica en una especie de chimenea construida por piedras y tierra en donde se calentaba con pedazos de troncos y madera y se utilizaba una forma de soplador llamada fuelle para aumentar la temperatura por la mayor cantidad de oxígeno suministrada, y se usaban algunos otros utensilios de formas muy particulares como se puede ver en la figura 1.6.

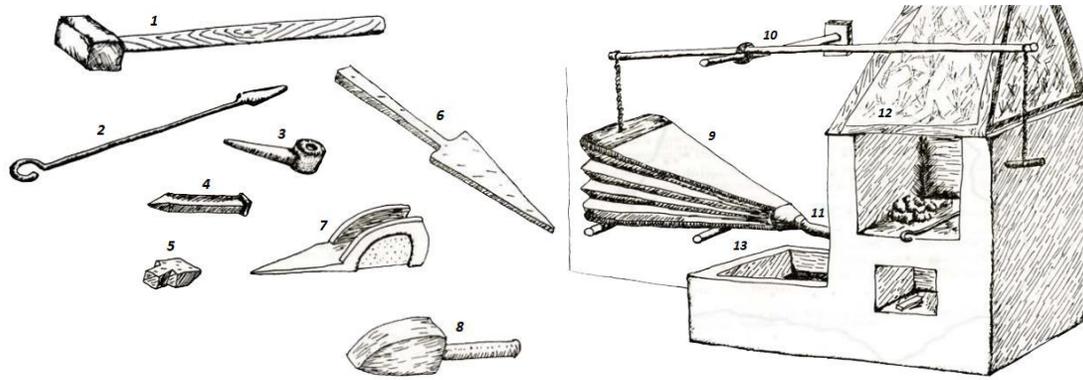


Figura 1.6. Utensilios usados en la forja antigua. [9]

Las partes mostradas en la figura anterior las llamaban de la siguiente manera: 1) Mazo, 2) palilla, 3) clavera, 4) punceta, 5) cortadera y tajadera, 6) reja de cola, 7) reja de calzo, 8) calzo, 9) fuelle, 10) palanca, 11) tobera o tubera, 12) campana, 13) pila de templado.

### 1.2.2 Forjabilidad

La forjabilidad de un material puede ser definida como la capacidad que tiene el mismo, para deformarse antes de llegar a fracturarse. Un material con buena forjabilidad puede ser moldeado o formado a bajas cargas sin fallar. En la actualidad han sido desarrolladas distintas pruebas para medir la forjabilidad de un material, pero ninguna ha sido aceptada universalmente, aunque las más comúnmente usadas son la prueba de torsión en caliente y la prueba tensión en frío y caliente. El presente trabajo se enfoca a la prueba de compresión en caliente. [10]

Para determinar la forjabilidad de un material es necesario realizar una prueba de compresión a un cilindro sólido y obtener el diagrama esfuerzo-deformación para obtener la curva de fluencia, observar el comportamiento del material en su estado plástico, y así, determinar el grado de forjabilidad del material. En la figura 1.7(b) se esquematiza la deformación de un tocho cilíndrico a compresión por forjado abierto en condiciones sin fricción, siendo este caso similar a la prueba de forjabilidad de un material. Puesto que el volumen se mantiene constante, cualquier reducción de la altura aumenta el diámetro de la parte forjada. Obsérvese en la figura 7(b) que la pieza de trabajo se deforma de manera uniforme. Sin embargo, en las operaciones reales sí existe fricción y la parte desarrolla una forma de barril (ver figura 7c), deformación también conocida como colapsado.

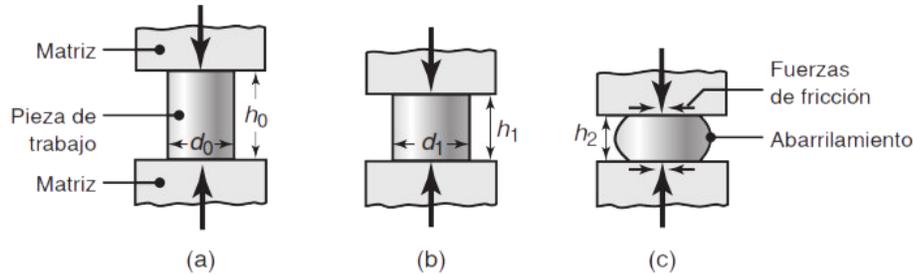


Figura 1.7. (a) Tocho cilíndrico recalcado entre matrices planas. (b) Deformación uniforme del tocho sin fricción. (c) Deformación con fricción. [7]

El abarrilamiento se produce principalmente por las fuerzas de fricción en las interfases matriz-pieza de trabajo que se oponen al flujo exterior de los materiales en estas interfases y que, por lo tanto, se pueden minimizar con un lubricante eficaz. El abarrilamiento también puede desarrollarse al recalcar piezas de trabajo calientes entre matrices frías. El material en las superficies de la matriz, o cerca de ellas, se enfría con rapidez, en tanto que el resto de la pieza de trabajo permanece relativamente caliente. En consecuencia, el material en las partes superior e inferior de dicha pieza tiene mayor resistencia a la deformación que el de la parte central. Por lo tanto, la parte central de las piezas se dilata hacia los lados más que en sus extremos. El abarrilamiento que se produce por los efectos térmicos puede reducirse o eliminarse mediante matrices calientes. Para este propósito, también es posible utilizar barreras térmicas, como los lubricantes, en las interfases entre la matriz y la pieza de trabajo. Otra opción de evitar el abarrilamiento es tratar de disminuir el coeficiente de fricción al máximo. [7]

### 1.2.3 Régimen plástico

Para el estudio del conformado en general y de los procesos de forjado en particular, será necesario recordar ciertas expresiones de la teoría de la plasticidad y algunas propiedades de los materiales, para poder aplicarlas posteriormente. La mayoría de los metales se funden en lingotes, planchas o palanquillas para posteriormente, por deformación plástica, obtener el producto final. Esto implicará que la forma de la pieza vaya cambiando durante el proceso sin afectar prácticamente al volumen y sin fundir, por lo que resulta necesario que el material sufra deformación plástica, pero sin llegar a la fractura.

Por tanto, en el proceso de fabricación será necesario considerar las leyes que gobiernan el flujo del material, la ductilidad de dicho material, que determinará el límite de deformación admisible y las fuerzas, presiones y requisitos de potencia sobre los equipos y herramientas empleados.

La descripción matemática de la plasticidad conlleva una mayor complejidad que la de la elasticidad. Por ejemplo, el comportamiento elástico de un material depende únicamente de su estado final e inicial, mientras que, para la deformación plástica, dicho comportamiento dependerá del camino seguido al aplicar la carga. Por otra parte, en el comportamiento plástico no es tan fácil determinar una constante de proporcionalidad entre deformaciones y tensiones, como era el módulo de Young en la zona elástica, debido a la dificultad de tratar fenómenos como el endurecimiento por deformación, la anisotropía, la histéresis elástica, el efecto Bauschinger, etc.

La curva de flujo tiene interés cuando se dibuja en términos de tensión y deformación real. Esta curva se puede obtener mediante el ensayo de tracción, donde el esfuerzo real será la fuerza real dividida por el área instantánea  $A$ , calculada usando la suposición de invariabilidad de volumen  $V$ .

$$A = \frac{A_0 l_0}{l} = \frac{V}{l} \quad (1.1)$$

Donde  $l$  es la longitud instantánea y  $l_0$  la longitud inicial. Una vez que comienza la estricción, el diámetro mínimo se desconocerá y no será fácil calcularlo.

Como lo que interesa en el presente trabajo es la deformación permanente, la cual comienza en el punto de cedencia, el esfuerzo real suele calcularse partiendo de la cedencia inicial hasta la estricción. Cada punto deducido define el esfuerzo que se debe aplicar para seguir deformando el material.

$$\sigma_f = \frac{P}{A} \quad (1.2)$$

Donde  $P$  es la fuerza instantánea. Es usual representar  $\sigma_f$  con respecto a la deformación ingenieril  $e_t$ .

$$e_t = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.3)$$

Pero en el presente trabajo se representa  $\sigma_f$  con respecto a la deformación real, que se obtiene como

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \frac{A_0}{A} \quad (1.4)$$

Se puede observar en la figura 1.8 una curva esfuerzo – deformación real de un material elastoplástico (línea punteada), además en esta misma figura se observa la diferencia entre

la curva real y la curva considerada en función de la deformación de ingeniería, representada con línea continua.

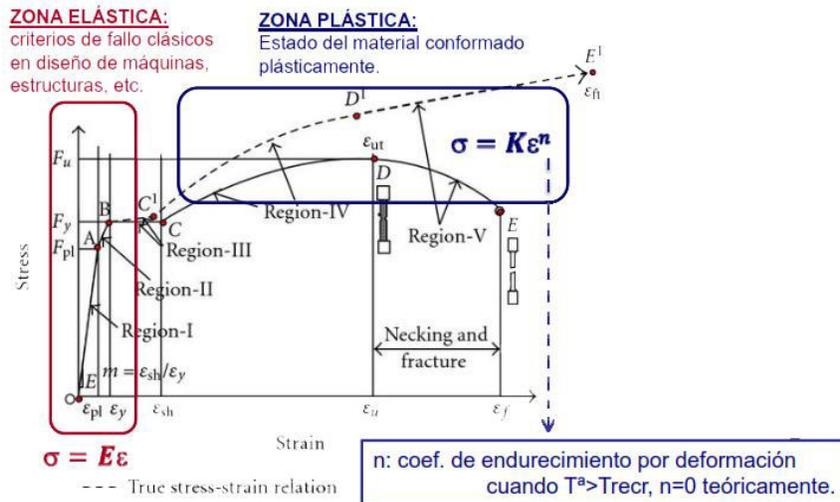


Figura 1.8. Diagramas esfuerzo – deformación de ingeniería (continua) y verdadero (punteada) de una prueba de tensión axial, denotando la zona elástica en rojo y la zona plástica en azul. [11]

Existen muchas expresiones matemáticas que intentan reproducir la curva esfuerzo – deformación real. Una de las más desarrolladas y que no se desvía mucho de la realidad física es

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.5)$$

donde  $K$  es el coeficiente de resistencia, cuando la deformación unitaria  $\epsilon=1$  (esto se logra continuando la pendiente de la línea esfuerzo-deformación hasta que la deformación alcanzar el valor de 1 ya que físicamente la mayoría de los materiales no alcanzan un valor de deformación de 1 antes de romperse) y  $n$  es el exponente de endurecimiento por deformación, que es la pendiente de la línea esfuerzo-deformación verdadera en un diagrama  $\log_{10} \epsilon - \log_{10} \sigma$ . En la figura 1.9 se puede observar la representación logarítmica de la expresión anterior, viendo cómo se obtienen gráficamente los valores de las dos constantes.

Se debe tener presente que la ecuación 5 es válida únicamente a partir del comienzo de la deformación plástica y, además, a máxima carga aparece la estricción, por tanto, no describirá el comportamiento a partir de ese momento. [12]

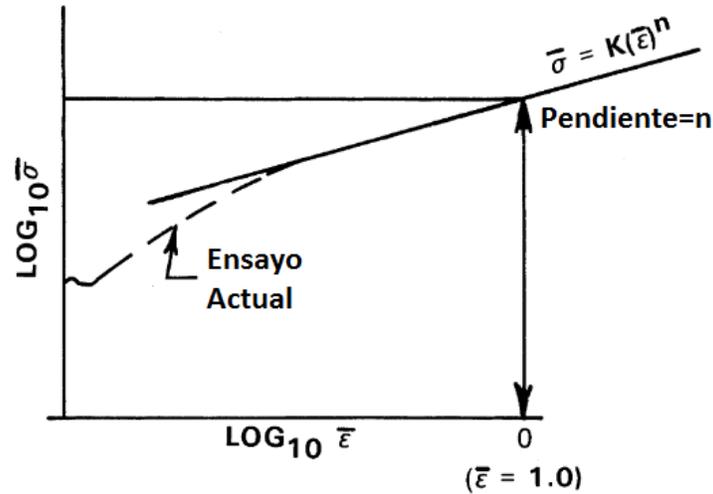


Figura 1.9. Representación logarítmica de la obtención del coeficiente de resistencia  $K$  y el exponente de endurecimiento por deformación  $n$ . [10]

#### 1.2.4 Temperatura

La curva de fluencia es una representación válida del comportamiento esfuerzo-deformación de un metal durante su deformación plástica, particularmente en operaciones de forja en frío. Para cualquier metal, los valores de  $K$  y  $n$  dependen de la temperatura. Tanto la resistencia como el endurecimiento por deformación se reducen a altas temperaturas. Además, la ductilidad se incrementa a altas temperaturas. Este cambio de propiedades es importante porque cualquier operación de deformación se puede alcanzar a temperaturas elevadas con fuerza y potencia menores. El proceso de forja se puede clasificar de acuerdo a tres niveles de temperatura: forja en frío, forja en caliente por debajo del punto de recristalización y forja en caliente por encima del punto de recristalización. La forja en frío se realiza a temperatura ambiente. Para superar el problema de endurecimiento por deformación que se presenta en la forja en frío, y reducir los requerimientos de fuerza y potencia, muchas operaciones de formado se ejecutan en caliente.

La forja en caliente por debajo de la temperatura de recristalización se lleva a cabo a una temperatura entre el 30 y 50 por ciento de la temperatura de fusión  $T_m$  absoluta del material. La forja en caliente implica la deformación a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización. La temperatura de recristalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión en la escala absoluta. La recristalización es el reacomodo de los granos internos del material en su microestructura cristalina y las dimensiones de estos. En la práctica, la forja en caliente se lleva a cabo usualmente a temperaturas por encima de  $0.5T_m$ . El tocho se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de  $0.5T_m$ , mejorando así la ventaja del forjado en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo, el

proceso de deformación en caliente genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones de la pieza. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de forja en caliente se mantienen normalmente dentro del rango de  $0.5T_m$  a  $0.75T_m$ .

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles en la forja en frío o con el forjado que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperaturas ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero y la ductilidad del metal se incrementa de manera significativa. [6]

### 1.2.5 Velocidad de deformación unitaria

En teoría el metal que se trabaja en caliente se comporta como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación  $n=0$ . Esto significa que una vez que se alcanza el nivel de esfuerzo de fluencia, el metal debe continuar fluyendo bajo el mismo nivel de esfuerzo de fluencia. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación unitaria.

La rapidez a la que se deforma el metal en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación unitaria. En muchas operaciones de formado, la velocidad de deformación unitaria es igual a la velocidad del pistón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Esto se visualiza más fácilmente en un ensayo de tensión, como la velocidad del cabezal de la máquina respecto a su base fija. Dada la rapidez de deformación, la velocidad de deformación unitaria se define:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad (1.6)$$

donde  $\dot{\epsilon}$  es la velocidad de deformación unitaria real en unidades de  $s^{-1}$ ; y  $h$  es la altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma en  $m$  o  $in$ , según el sistema de unidades. Si la velocidad de deformación  $v$  dada en  $m/s$  o  $in/s$ , es constante durante la operación, entonces la velocidad de deformación unitaria varía al cambiar la altura  $h$ . En la mayoría de las operaciones prácticas de formado, la valoración de la velocidad de deformación unitaria se complica por la forma de la pieza y las variaciones en la velocidad de deformación unitaria

en diferentes regiones de la pieza. La velocidad de deformación unitaria puede alcanzar hasta  $1000 \text{ s}^{-1}$  o más.

Ya se ha observado que el esfuerzo de fluencia de un metal es una función de la temperatura. En las temperaturas de forjado en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación unitaria. El efecto de la velocidad de deformación unitaria sobre las propiedades de resistencia se conoce como sensibilidad a la velocidad de deformación. El efecto se puede ver en la figura 1.10.

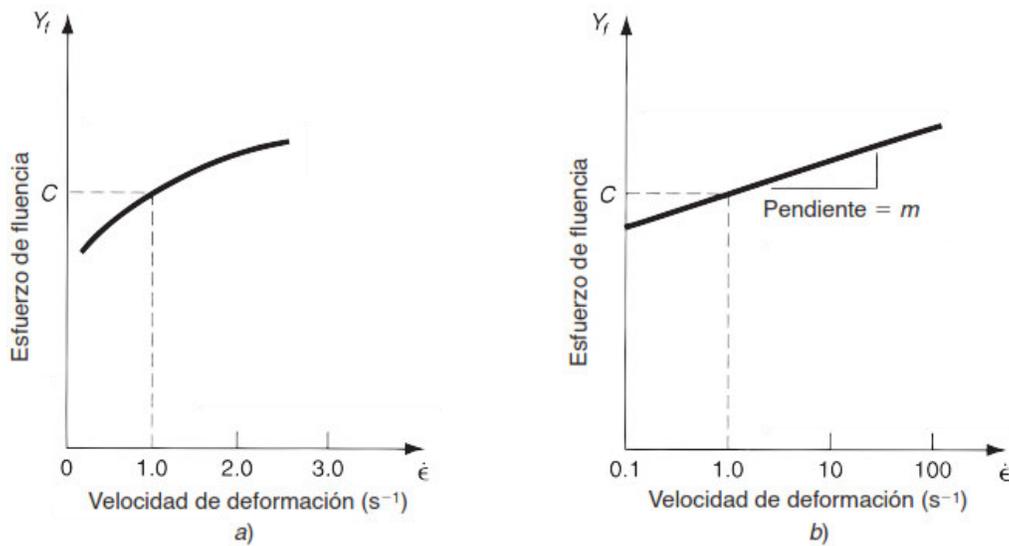


Figura 1.10. (a) Efecto de velocidad de deformación unitaria sobre la resistencia a la fluencia a temperatura elevada, (b) la misma relación graficada en coordenadas logarítmicas. [6]

Al aumentar la velocidad de deformación unitaria, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa de manera usual como una línea aproximadamente recta en una gráfica logarítmica, lo cual conduce a la relación siguiente:

$$Y_f = C \dot{\epsilon}^m \quad (1.7)$$

donde  $C$  es la constante de resistencia (similar pero no igual al coeficiente de resistencia  $K$  en la ecuación de la curva de fluencia) y  $m$  es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación. El valor de  $C$  se determina a una velocidad de deformación unitaria de  $1.0$ , y  $m$  es la pendiente de la curva en la figura 1.10b.

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación 7 es notable. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de  $C$  (consistente con el efecto de  $K$  en la ecuación de la curva de fluencia) y aumenta el valor de  $m$ . En la siguiente figura se puede observar el efecto

de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. La constante  $C$  en la ecuación 1.7, indica por la intersección de cada línea continua con la línea punteada vertical a una velocidad de deformación unitaria=1.0, decrece, y  $m$  (pendiente de cada línea) aumenta al incrementarse la temperatura. [6]

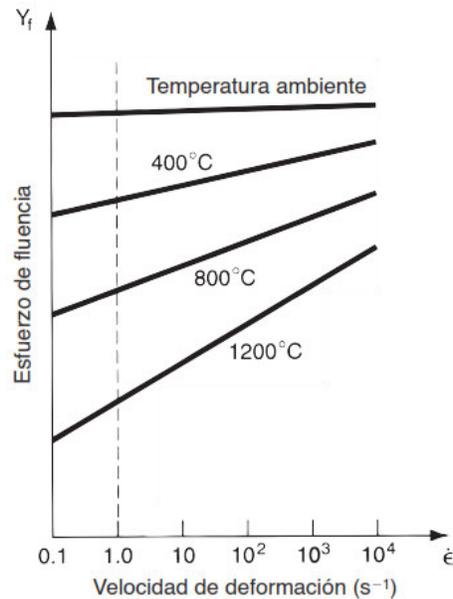


Figura 1.11. Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. [6]

A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación unitaria es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación unitaria juega un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia, como se indica por las pendientes más grandes de las relaciones esfuerzo-velocidad de deformación unitaria. Esto es importante en el forjado en caliente porque la resistencia a la deformación unitaria del material aumenta drásticamente con el incremento de la velocidad de deformación unitaria. Para dar una idea del efecto, en la tabla 1.1, se proporcionan los valores típicos de  $m$  para los tres rangos de temperatura de forja en metales.

Tabla 1.1. Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación y coeficiente de fricción en forja en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización. [6]

Categoría	Rango de temperatura	Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación	Coefficiente de fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3T_m$	$0 \leq m \leq 0.05$	0.1
Trabajo en caliente por debajo de la temp. de recrist.	$0.3T_m - 0.5T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.1$	0.2
Trabajo en caliente por encima de la temp. de recrist.	$0.5T_m - 0.75T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.4$	0.4-0.5

Se puede observar que aunque en el trabajo en frío, la velocidad de deformación unitaria puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia, en el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de la deformación unitaria y de la velocidad unitaria de deformación es la ecuación 1.8

$$Y_f = A\dot{\epsilon}^n \dot{\epsilon}^m \quad (1.8)$$

Donde **A** es un cociente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de **K** y **C**. Por supuesto, **A**, **n**, y **m** podrían ser funciones de la temperatura, y el enorme trabajo de ensayar y recopilar los valores de estos parámetros para diferentes metales y varias temperaturas podría ser prohibitivo.

### 1.2.6 Fricción y lubricación

La fuerza de forjado **F** en una operación de forja abierta, en un tocho sólido cilíndrico, se puede calcular a partir de la ecuación 1.9 [7]:

$$F = Y_f \pi r^2 \left( 1 + \frac{2\mu r}{3h} \right) \quad (1.9)$$

en la que **Y<sub>f</sub>** es el esfuerzo de flujo del material, **μ** el coeficiente de fricción entre el tocho y los dados, y **r** y **h** son el radio y la altura del tocho respectivamente. [7]

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies del dado y el tocho, y las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es un inconveniente por las siguientes razones:

- 1) Retarda el flujo del metal, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto,
- 2) Se incrementan las fuerzas y la potencia necesaria para desempeñar la operación,

3) El desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da por resultado piezas defectuosas y la necesidad de reemplazo de las herramientas.

Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, su desgaste es de una mayor importancia. La fricción y el desgaste de las herramientas son más severos en el trabajo en caliente, debido a que el material se comporta de manera distinta a altas temperaturas aumentando el coeficiente de fricción conforme dicha temperatura aumenta. [6]

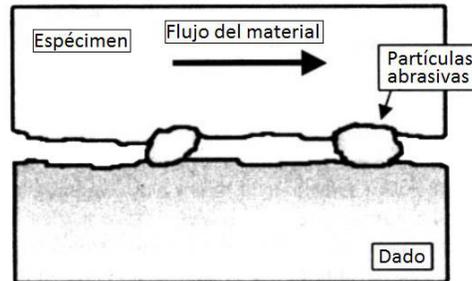


Figura 1.12. Esquema de fenómeno abrasivo debido a partículas residuales en la pieza. [13]

El desgaste de las matrices se debe principalmente al factor abrasivo que desarrolla una mala limpieza o acabado burdo en la interacción matriz-pieza, en donde se pueden alojar partículas residuales invisibles para el ojo humano y que aumentan el factor de fricción causando daño progresivo en las piezas y herramientas (ver figura 1.12).

La fricción en el forjado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistemas mecánicos, como trenes de engranajes, flechas, cojinetes y otros componentes que involucran un movimiento relativo entre las superficies. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales. Por el contrario, la condición de forjado en metales representa presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la pieza de trabajo suave, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas. Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales se presentan en la tabla 1.1.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La fricción con adherencia en el trabajo de metales es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso

de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. [6]

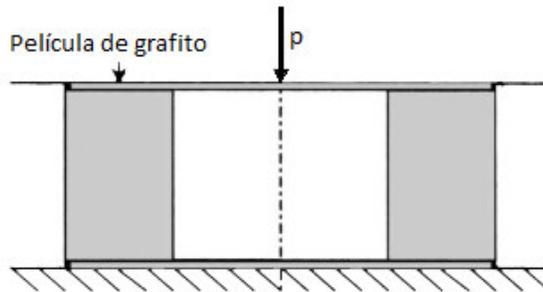


Figura 1.13. Esquema de aplicación de película de grafito en la interfaz dado-pieza. [14]

Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfaz dado-pieza (ver figura 1.13) en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fricción. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen una reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final. Los lubricantes tienen también otras funciones, como reducir el calor en los herramientas. Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el forjado de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar, ya sea forja en caliente o forja en frío, así como el material de trabajo, la reactividad química con la herramienta y con los metales; siempre se desea, por lo general, que los lubricantes se adhieran a las superficies para que sean más efectivos en la reducción de la fricción, que se tenga facilidad de aplicación, bajas toxicidad e inflamabilidad y escaso costo.

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío incluyen aceites minerales, grasas y aceites grasos, emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos. El trabajo en caliente se realiza algunas veces en seco para ciertas operaciones y materiales (por ejemplo, el laminado en caliente del acero y la extrusión de aluminio). Cuando los lubricantes se usan para trabajo en caliente incluyen aceites minerales, grafito y vidrio. El vidrio fundido se convierte en un lubricante efectivo para la extrusión en caliente de aleaciones de acero. El grafito contenido en agua o aceite mineral es un lubricante común para el forjado en caliente de varios materiales de trabajo según Nachtman. [15]

Antes de aplicar el lubricante a la probeta se debe limpiar la zona donde será la interfaz con el dado, esto quiere decir que se debe limpiar tanto las superficies de la probeta, como de los dados o matrices, se puede limpiar maquinando la superficie, aplicar desengrasante, enjuagar con agua fría con o sin antioxidante, limpiar con agua tibia con activadores, luego se fosfatiza la superficie, se neutraliza, y finalmente se aplica el lubricante. [10]

Se pueden encontrar una diversidad de lubricantes que se usan para disminuir la fricción, particularmente en las pruebas de compresión axial en probetas cilíndricas o en forma de anillo a altas temperaturas, como las que se utilizarán en este caso. Es de notar que se distinguen algunos lubricantes industriales que son un poco difíciles de conseguir, pero también se observan algunos lubricantes que son fáciles de conseguir.

### 1.3 Metodologías de caracterización de la fricción en procesos de formado de metales.

El procedimiento o la forma con la cual se obtiene el factor de fricción en procesos de formado de metales es diversa, dependiendo de cada autor; dicha metodología no se encuentra normalizada ni estandarizada, ya que cada autor la desarrolla de acuerdo con sus propios criterios, conocimientos y experiencias. Existen distintas metodologías para obtener la fricción, como lo es la teórica – matemática, la de simulación numérica o la experimental. En la metodología teórica se usan formulaciones matemáticas, en la simulación se utilizan métodos numéricos asistidos por computadora, y en la experimental se realiza una prueba o ensayo, asemejando las condiciones específicas del proceso de formado de metales.

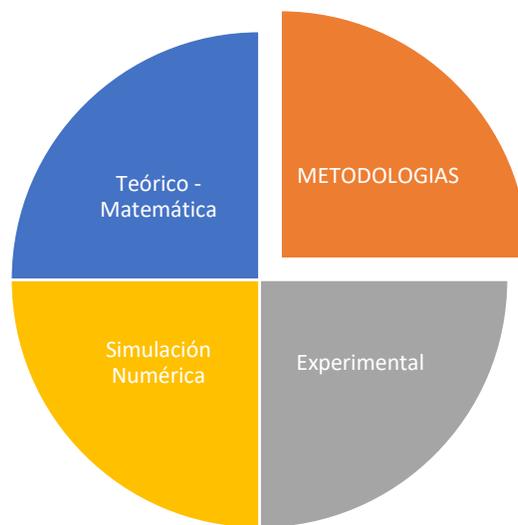


Figura 1.14. Metodologías de caracterización de fricción.

#### 1.3.1 Metodología teórico - matemática.

Uno de los métodos para encontrar el coeficiente de fricción en elementos a compresión es por medio de anillo que se somete a ese tipo de carga y debido a ello sufre una deformación

geométrica. El primer análisis teórico matemático satisfactorio del proceso de compresión de anillo fue desarrollado por Avitzur [16] a través de una solución matemática de límite máximo optimizado, siendo más tarde verificado por Hawkyard y Johnson [17] usando aproximación de análisis de esfuerzo. Ambas soluciones son basadas en las siguientes suposiciones:

- Existe una distorsión uniforme de elementos cilíndricos debido a las restricciones de fricción.
- El material del anillo obedece las leyes de esfuerzo-deformación de von Mises, implicando efectos de dureza resistentes a la deformación, no existe deformación elástica, y no hay cambio volumétrico.
- El factor de fricción  $m$  es constante, para dados y materiales bajo condiciones de superficie y temperatura constantes, tal que, el esfuerzo cortante interfacial  $\tau$ , es dado por la ecuación 1.10.

$$\tau = f\sigma_o = m \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (1.10)$$

Donde  $\sigma_o$  es el esfuerzo de fluencia básico del material del anillo. La suposición de que el factor de fricción  $m$  y el esfuerzo de fluencia sean constantes significa que el esfuerzo cortante también lo será. Algunas investigaciones confiables [18] [19] [20] asumen el coeficiente de fricción constante en la interfaz durante el proceso de compresión de la probeta, dicha suposición puede ser razonablemente justificada. Cuando ocurre endurecimiento por deformación en el anillo, es necesario tener precaución con los resultados de la prueba de anillo respecto a la solución matemática.

La solución teórica de Avitzur [16] y Hawkyard and Johnson [17] hacen referencia a la nomenclatura de la figura 1.15, donde  $R_n$  es el radio de la división de fluencia del metal, algunas veces llamado radio neutral o radio sin deslizamiento.

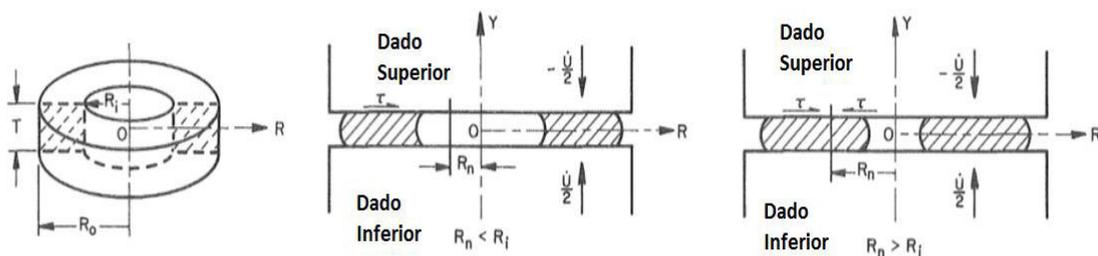


Figura 1.15. Esquema de dirección de flujo del metal en compresión de anillo. [21]

Caso 1. Cuando  $R_n \leq R_i$

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{\sqrt{3} \left[1 + \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4\right] X^2}{\sqrt{X(X-1) \left(1 - \frac{R_i^4}{R_o^4} X\right)}} \quad (1.11)$$

Donde

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

Caso 2. Cuando  $R_i \leq R_n \leq R_o$

$$m \frac{R_o}{T} = \left[ \frac{1}{2 \left(1 + \frac{R_i}{R_o} - \frac{2R_n}{R_o}\right)} \right] \ln \left[ \frac{\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 \left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}}}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}} \right] \quad (1.12)$$

La ecuación 1.11 es válida cuando

$$\frac{mR_o}{T} \leq \frac{1}{2 \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \frac{3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^4}} \quad (1.13)$$

Y la ecuación 1.12 es válida cuando

$$\frac{mR_o}{T} \geq \frac{1}{2 \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \frac{3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^4}} \quad (1.14)$$

Ni el esfuerzo de fluencia,  $\sigma_o$ , del material, ni el esfuerzo cortante de fricción,  $\tau$ , aparecen en las ecuaciones finales en términos de valores absolutos, sólo como una relación del factor de fricción,  $m$ . En el análisis se asume que dicha relación permanece constante en el material y las condiciones de deformación. Si el análisis se lleva a cabo para un pequeño incremento de

deformación,  $\sigma_0$  y  $\tau$ , pueden suponerse aproximadamente constantes y la solución es válida. Así, si el factor de fricción  $m$  es constante para toda operación, será justificable en el análisis matemático una serie de pequeños incrementos de deformación, usando la geometría final del anillo como la geometría inicial para el incremento posterior y así sucesivamente.

En el trabajo hecho por Alan T. Male y Vincent DePierre [22], obtienen algunas curvas de calibración teóricas a partir del análisis matemático descrito anteriormente, expresadas en porcentaje del diámetro interno versus el porcentaje de la reducción de altura, dando distintos valores al factor de fricción  $m$ . El procedimiento de la solución de las ecuaciones se realizó mediante la escritura de un programa en Fortran 4 en un sistema digital de una computadora IBM directamente acoplada. La investigación completa se encuentra disponible en los reportes técnicos del Laboratorio de Materiales de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América.

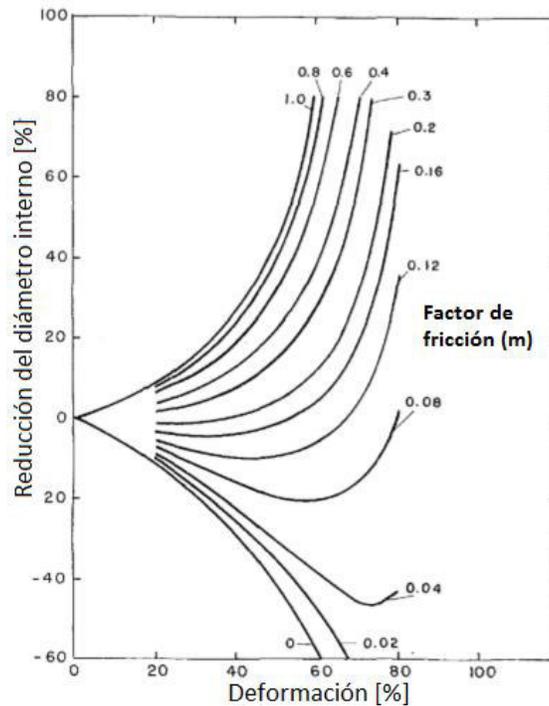


Figura 1.16. Curvas de calibración propuestas por Male and DePierre. [22]

Los primeros investigadores como Kunogi [23], Male y Cockcroft [24], Kudo [25], Avitzur [16], Hawkyard y Johnson [17], y Burgdorff [26] no consideraban en sus análisis teóricos el abarrilamiento de las superficies libres del anillo durante la compresión, no fue hasta Avitzur [27], DePierre [28], Lee [29], Liu [30] y Lahoti [31] que consideraron el abarrilamiento de las superficies libres del anillo en sus estudios.

### 1.3.2 Metodología de simulación numérica

La metodología comúnmente usada por la mayoría de los científicos para la solución de este tipo de problemas es el Método de Elemento Finito (MEF), Yamada [32] intentó simular cualitativamente la prueba de compresión de anillo desarrollando un programa basado en un modelo elastoplástico en dos dimensiones basado en el MEF.

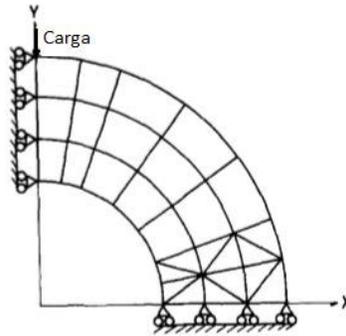


Figura 1.17. Diagrama esquemático de anillo en dos dimensiones para cálculos de elemento finito [32].

Rudkins et al. [33] realizó un estudio experimental y de MEF para la obtención de curvas de calibración de la prueba de compresión de anillo en caliente, utilizando un código de elemento finito elastoplástico desarrollado en software EPFEP3 por Rowe et al. [34], el programa se basa en grandes deformaciones del modelo Lagrangiano usando reglas de fluencia de Prandtl-Reuss y el criterio de fluencia de von Mises. Usa una técnica llamada capas de fricción, dicha técnica crea una capa de elementos en la interfase pieza-dado, asegurando el movimiento tangencial de los nodos en contacto.

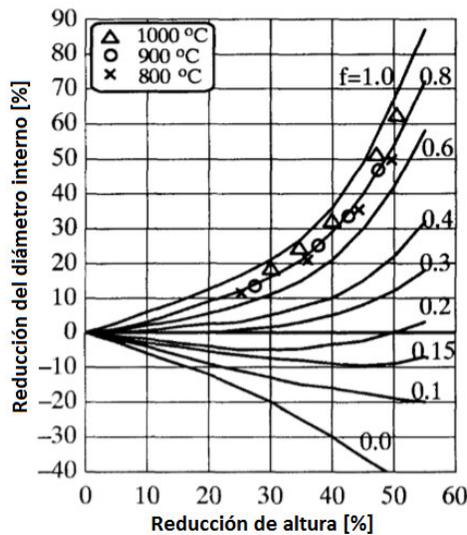


Figura 1.18. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo en caliente obtenidas por Rudkins et al. [33].

D. Shahriari et al. [35] caracterizan el coeficiente de fricción de una súper aleación Nimonic 115 usada en forja en caliente, en su estudio varían las magnitudes de altas temperaturas y tipos de lubricantes en la interfase pieza – dado, utilizan el MEF para obtener las curvas de calibración de fricción, concluyen que una variación en la temperatura o lubricante afecta el comportamiento de fricción.

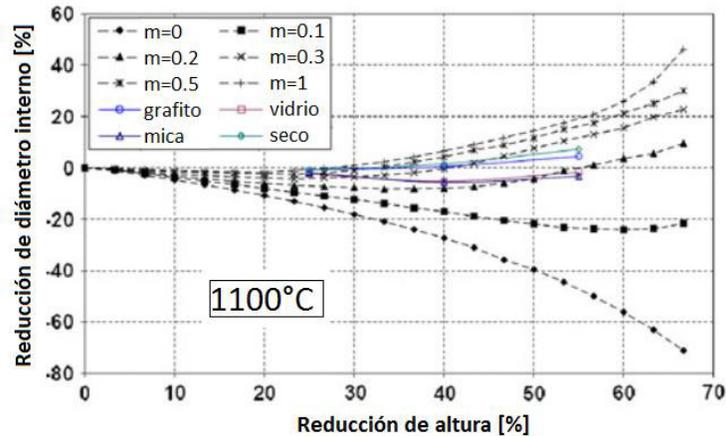


Figura 1.19. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo en caliente obtenidas por D. Shahriari et al. [35].

Zhu et al. [36] utilizan el MEF para obtener las curvas de calibración de una aleación de titanio Ti-6Al-4V para forjado en caliente con pruebas de compresión de anillo a un 50 % de su altura, con lubricante de vidrio y sin lubricante, a distintos coeficientes de transferencia de calor. En la siguiente figura se muestra una de las curvas de calibración obtenidas por Zhu.

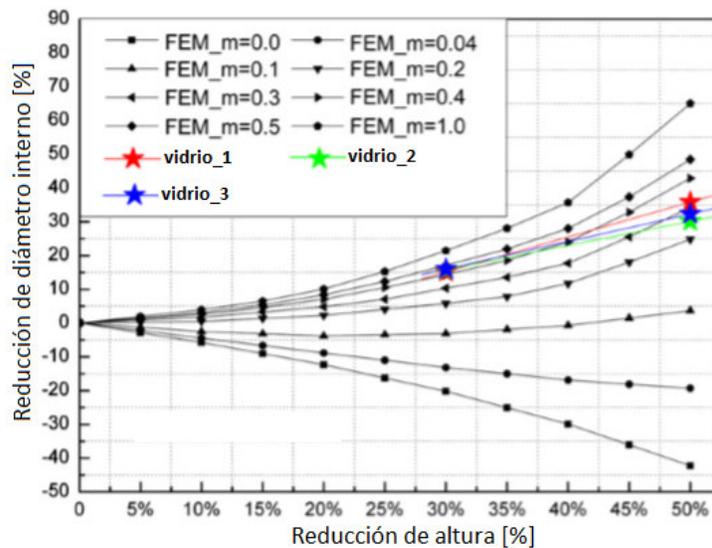


Figura 1.20. Calibración de curvas de fricción de compresión de anillo con lubricación de cristal a un coeficiente de transferencia de calor de  $5 \text{ kW}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$  [36].

### 1.3.3 Metodología experimental

Por lo general, el coeficiente de fricción se determina de manera experimental, ya sea durante procesos de manufactura o en pruebas de laboratorio, utilizando especímenes a pequeña escala de diversas formas. Las pruebas más conocidas para deformación volumétrica son la de extrusión de doble copa y la prueba de compresión de anillo. La prueba de extrusión de doble copa solo se ha usado en el análisis de fricción en procesos de forjado en frío, a diferencia de la prueba de compresión de anillo, que recientemente se ha utilizado en análisis de fricción de forjado a altas temperaturas.

Un gran número de investigadores optan por hacer pruebas experimentales de la prueba de compresión de anillo para predecir los valores de fricción, tomando como referencia estos resultados experimentales para posteriormente validarlos con formulaciones teórico – matemáticas y/o con simulaciones numéricas. Estas metodologías son prácticas y relativamente sencillas, ya que solo son necesarias sus dimensiones geométrico - volumétricas antes y después de la prueba o experimento. Cabe señalar que la prueba de compresión de anillo es muy sencilla y confiable según los investigadores y científicos que la han usado.

#### 1.3.3.1 Prueba de compresión de anillo

La prueba de compresión de anillo para estudios de la fricción fue propuesta inicialmente por Kunogi [23] en 1964, y más tarde estudiada y ampliada por Male & Cockcroft [24] en 1964, siendo estas personalidades las que sentaron las bases de dicha metodología. Posteriormente varios investigadores incursionaron el tema, como Kudo [25], Avitzur [16], Hawkyard & Johnson [17], y Burgdorff [26]. Avitzur [16], y Hawkyard & Johnson [17] mostraron sus resultados relacionados al factor de fricción  $m$ , mientras que Burgdorff [26] prefirió trabajar en función del coeficiente de fricción  $\mu$  para representar las condiciones de fricción en la interfase dado-pieza. La mayor parte de los estudios de fricción fueron hechos a temperatura ambiente.



Figura 1.21. Anillos obtenidos por Male&Cockcroft; sin deformar, deformado a baja fricción, a media fricción y a alta fricción (de izquierda a derecha) [24].

La metodología de la prueba de compresión de anillo [7] menciona que, se coloca la probeta en forma de anillo entre los dados de una prensa, y se aplica presión a compresión al anillo, el cual reducirá su altura y se expandirá radialmente. Si la fricción en la interfase anillo-dado fuera cero, los diámetros internos y externos aumentarían como si fuera un disco sólido uniformemente. Para una reducción de altura particular, existe un valor crítico de la fricción en el cual el diámetro interno se incrementa si el factor de fricción es bajo (deseable); y el diámetro interno disminuye si el factor de fricción es alto (indeseable).



Figura 1.22. Esquema de factor de fricción bajo (imagen izquierda) y esquema de factor de fricción alto (imagen derecha) [7].

El coeficiente de fricción se puede determinar midiendo el cambio en el diámetro interno y la altura del espécimen y utilizando las curvas mostradas en la figura 1.23, que se obtienen a través de análisis teóricos y experimentales, llamadas curvas de calibración de fricción. Cada geometría y material de los anillos tiene su propia serie específica de curvas. La geometría más común de un espécimen posee unas proporciones de diámetro externo, diámetro interno y altura de 6:3:2, respectivamente. Por lo general, el tamaño del espécimen no es relevante en estas pruebas, ni el material, sino lo más crítico es el lubricante aplicado. En consecuencia, una vez que se conoce el porcentaje de reducción en la altura y el diámetro interno, puede determinarse la magnitud del factor de fricción  $f$  o el coeficiente de fricción  $\mu$  usando la gráfica apropiada [7]. Las gráficas para determinar el coeficiente de fricción de una prueba de compresión de anillo, con proporciones 6:3:1 y 6:3:0.5 también se pueden observar en la figura 1.23.b y 1.23.c. Se pudieran obtener más curvas de calibración de fricción con diferentes proporcionalidades, pero la revisión bibliográfica demuestra al comparar resultados que son suficientes con las existentes hasta ahora, aunque esto no quiere decir que más adelante se utilice alguna otra configuración de proporcionalidades. Las curvas mostradas a continuación fueron obtenidas por Douglas & Altan [37], por el método de análisis de límite superior, que toma en cuenta el abarilamiento del espécimen a una fricción constante, dicho programa computacional para la obtención de curvas de fricción proveniente del trabajo de Lee & Altan [29].

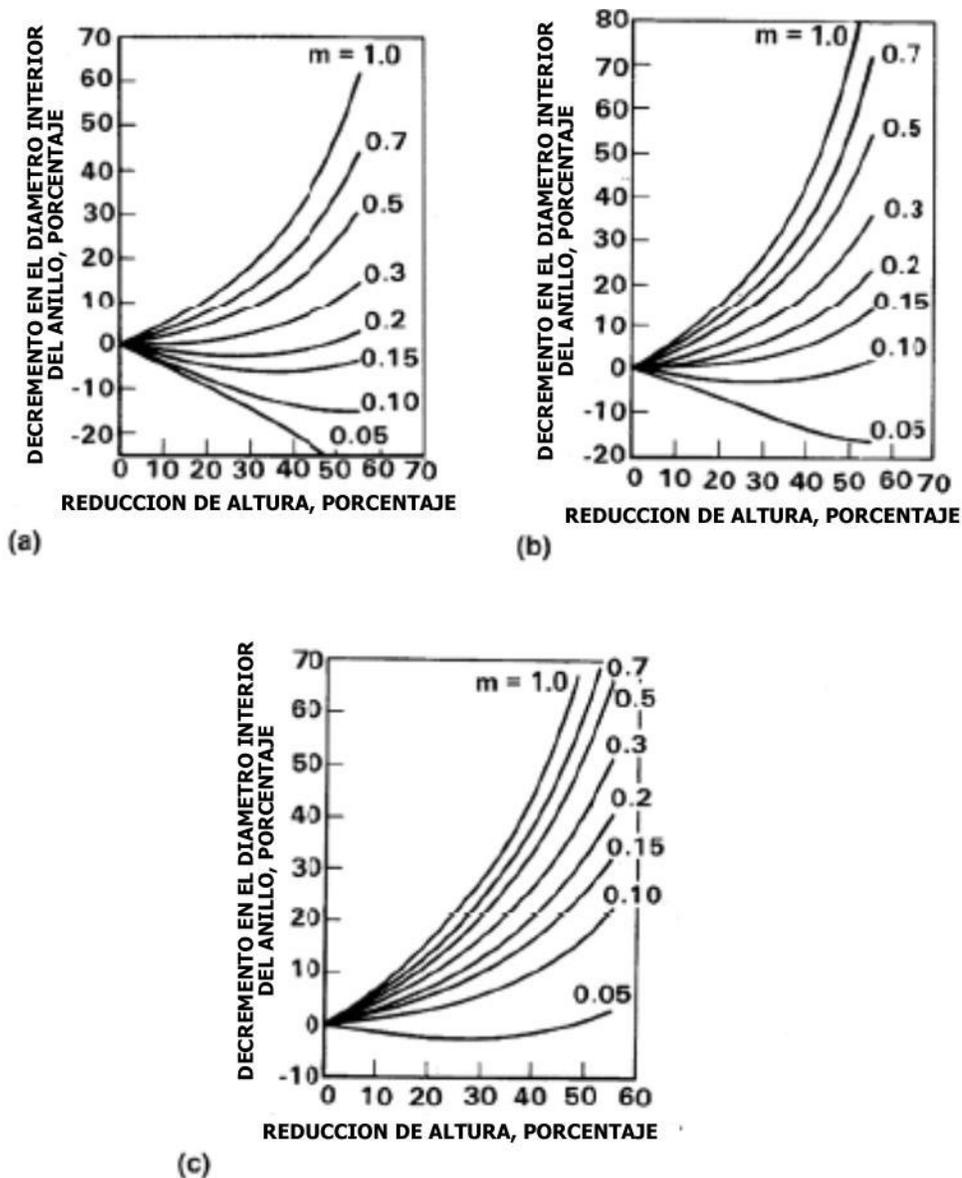


Figura 1.23. Curvas de calibración de fricción con proporciones: a) 6:3:2, b) 6:3:1, c) 6:3:0.5 [38].

### 1.3.3.2 Prueba de extrusión de doble copa

La prueba de extrusión de doble copa fue propuesta por Sánchez et al. [39] para medir la fricción del forjado en frío. Esta prueba se basa en la extrusión de una probeta en forma cilíndrica, que es empujada por un dado superior contra un dado inferior estacionario, siendo estos de menor diámetro que la probeta, para que se pueda producir la extrusión de doble copa. Un factor de fricción global puede ser estimado cuantitativamente relacionando las alturas de extrusión producidas después de la deformación,  $H_1/H_2$ , esta relación es

directamente proporcional al factor de fricción, por lo cual, si no existe fricción, las alturas de las copas son iguales, siendo  $H_1/H_2$  igual a 1.

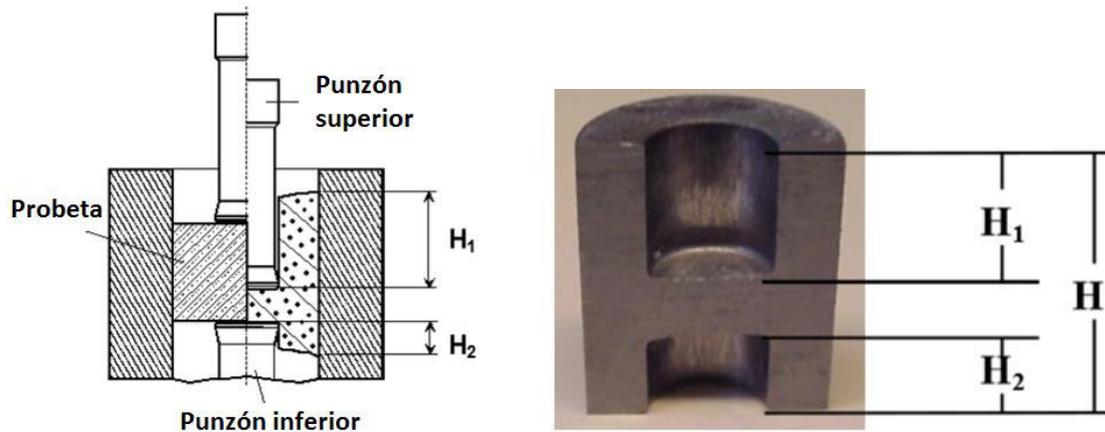


Figura 1.24. Diagrama representativo de la prueba de extrusión de doble copa (izquierda); probeta final después de la prueba de extrusión (derecha) [40].

Geiger [41] utiliza una probeta cilíndrica de acero AISI 1006 de un diámetro de 28 mm y una altura de 28 mm ó 56 mm; los dados tienen un diámetro de 14 mm, 20 mm ó 23.6 mm; el dado superior baja a una velocidad de 10 mm/s. Ghobrial et al. [42] usaron una probeta de aluminio 99.5%, de 20 mm de diámetro y 20 mm de altura; y utilizaron dados de distintos diámetros de 12, 14 y 16 mm.

## 2 Metodología experimental



Figura 2.1. Diagrama de parámetros experimentales

### 2.1 Definición de parámetros del espécimen

De la revisión del estado del arte, se puede observar que existen distintas metodologías de caracterización de la fricción de la prueba de compresión de anillo, como lo es la teórica – matemática, la de simulación numérica y/o la experimental. De acuerdo con los autores interesados en el estudio de este tema, existen varios parámetros a tomar en cuenta que definen el espécimen, como lo es, su forma, dimensiones, tolerancias, acabado superficial, material, temperatura de ensayo y características de lubricación. Así como también se han usado distintos parámetros de la misma prueba de compresión, como la capacidad de carga de la máquina o equipo de compresión, la cantidad de desplazamiento, la tasa de deformación y el tipo de herramental o dados.

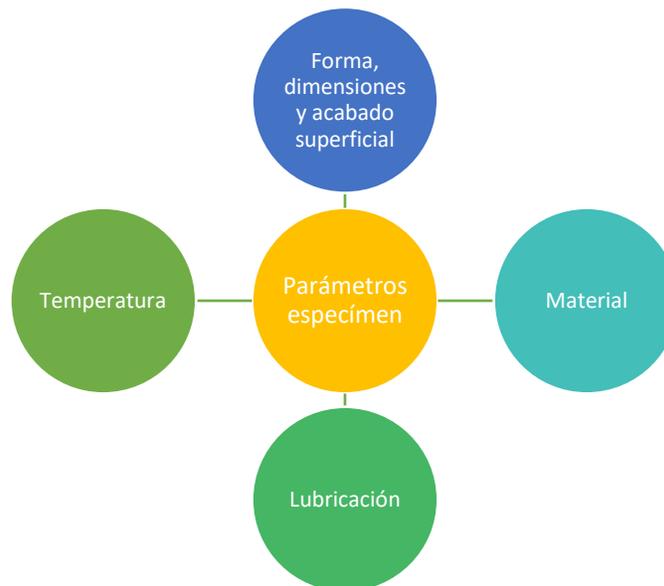


Figura 2.2. Diagrama de parámetros del espécimen.

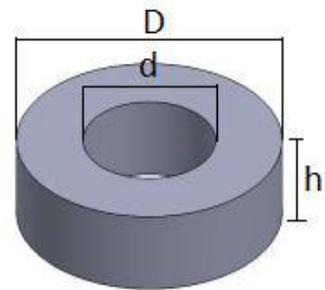
### 2.1.1 Selección de forma, dimensiones, tolerancias y acabado superficial del espécimen.

La geometría del espécimen para obtener el coeficiente de fricción usada por la mayoría de los investigadores es comúnmente en forma de anillo (disco cilíndrico perforado en su centro), aunque Douglas & Altan [37] lo usaron para obtener curvas de fluencia. Ebrahimi & Najafizadeh [43], Solhjoo [44], Yao et al. [45] han sido los únicos autores de los que se obtuvieron datos, que han implementado el uso del cilindro sólido para obtener curvas de calibración.

Cada forma y dimensionado de la probeta en forma de anillo tiene su propia serie específica de curvas, la cual se obtiene de acuerdo con las proporciones de la probeta usada en la prueba, siendo la más común la 6:3:2 (diámetro externo: diámetro interno: altura). Male & Cockcroft [24], Avitzur [16], Hawkyard & Johnson [17], Male & Depierre [22] y Abdul [46] utilizaron anillos de 19.05 mm de diámetro exterior, 9.525 de diámetro interior y 6.35 de altura; Male et al. [47] y Depierre & Gurney [28] usaron 76.2 x 25.4 x 12.7 mm; Wang & Lenard [48] y Li et al. [14] presentaron anillos de 15 x 7.5 x 5 mm; Hasan & Jahan [49] y Robinson et al. [50] realizaron sus experimentos en anillos de 50.8 x 25.4 x 16.93 mm.

Tabla 2.1. Distintas geometrías de anillo, propuestas por diversos autores.

	Diámetro exterior [D]	Diámetro interior [d]	Altura [h]
Male & Cockcroft [24]	19.05 mm	9.525 mm	6.35 mm
Avitzur [16]			
Hawkyard & Johnson [17]			
Male & Depierre [22]			
Abdul [46]			
Male et al. [47]	76.2 mm	25.4 mm	12.7 mm
Depierre & Gurney [28]			
Wang & Lenard [48]	15 mm	7.5 mm	5.0 mm
Li et al. [14]			
Hasan & Jahan [49]	50.8 mm	25.4 mm	16.93 mm
Robinson et al. [50]			



Kulkarni & Kalpakjian [51] en su investigación proponen un acabado de 0.05  $\mu\text{m}$  en la superficie del anillo, obtenido del pulido de la probeta con una lija fina de tamaño de grano 400, montada en el cabezal de un torno; DePierre & Gurney [52] obtuvieron un acabado final en torno de 0.8  $\mu\text{m}$ ; X. Tan et al. [53] trabajaron con una rugosidad en la superficie de 0.175

– 0.380  $\mu\text{m}$  obtenida de proceso de maquinado en sus tres formas propuestas, cóncava, rectangular y convexa (ver figura 2.3); Yanchun Zhu et al. [36] elaboraron una probeta de anillo con acabado superficial de 3.2  $\mu\text{m}$  y tolerancias de 0 – 0.03 mm en el diámetro exterior, de +0.02 – 0 mm en el diámetro interior y una tolerancia de concentricidad de 0.02 mm como se muestra en la figura 2.3.

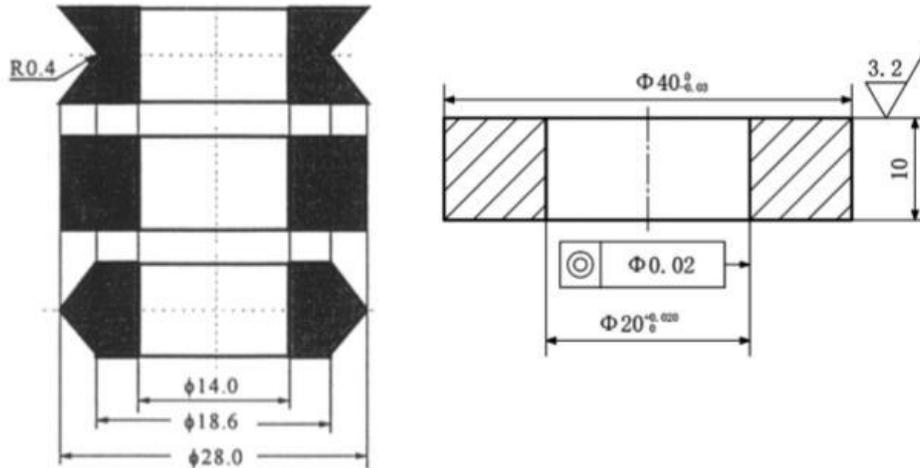


Figura 2.3. Anillos concavo, rectangular y convexo propuesto por X. Tan et al. [53] (Imagen izquierda); anillo con tolerancias y rugosidad propuesta por Yanchun Zhu et al. [36] (Imagen derecha).

De acuerdo con el estado del arte mostrado anteriormente, se propone un diseño propio para este trabajo de investigación los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.4 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

Figura 2.4. Dimensionado, tolerancias y acabado superficial de probeta de anillo propuesto para el presente trabajo de investigación.

### 2.1.2 Selección del material

Los autores que utilizaron aleaciones de Aluminio fueron Kulkarni & Kalpakjian [51], X. Tan et al. [53], Lee & Altan [29], Nagpal et al. [54] y Cho & Altan [55]; aleaciones de Acero fueron usadas por Kunogi [23], Kobayashi [56], Travis [57] y Male & DePierre [22]; las probetas de aleación de Titanio fueron implementadas por Dutton et al. [58] y Li et al. [14]; los especímenes de Plastilina fueron adoptados por Hasan & Jahan [49]; hubieron algunos autores que utilizaron diversos materiales en sus investigaciones como Male & Cockcroft [24], Saul et al. [47], DePierre & Gurney [52] y Douglas & Altan [37].

Tabla 2.2. Materiales del anillo usados por diversos autores.

Autor	Material de la probeta
Kulkarni & Kalpakjian [51]	Aleación de Aluminio
X. Tan et al. [53]	
Lee & Altan [29]	
Nagpal et al. [54]	
Cho & Altan [55]	
Kunogi [23]	Aleación de acero
Kobayashi [56]	
Travis [57]	
Male & DePierre [22]	
Dutton et al. [58]	Aleación de Titanio
Li et al. [14]	
Hasan & Jahan [49]	Plastilina
Male & Cockcroft [24],	Usaron varios materiales: Aluminio, acero, titanio, cobre, bronce.
Saul et al. [47]	
DePierre & Gurney [52]	
Douglas & Altan [37]	

En la presente investigación se utilizó una aleación de acero especial para la fabricación cigüeñales automotrices, provista por una empresa fabricante de autopartes, que por motivos de confidencialidad no se darán detalles de la composición del material. El estudio de este nuevo material de aleación de acero fue la motivación principal del presente trabajo de investigación, al cual llamaremos “**acero titular**”.

### 2.1.3 Selección de temperatura

La mayor parte de los autores han tratado las probetas de anillo a temperatura ambiente o también llamada forjado en frío, a menos del 30% de la temperatura de fusión del acero, estimada en 1375°C, siendo aproximadamente por debajo de los 412 °C, como Kunogi [23], Kulkarni & Kalpakjian [51], Kobayashi [56], DePierre & Gurney [52] y Nagpal et al. [54]; las pruebas de compresión en caliente por debajo de la temperatura de recristalización del acero, entre 412 °C y 688 °C, equivalentes entre 30% y 50% de la temperatura de fusión, fueron practicadas por Male & Cockcroft [24], Male & DePierre [22], Hyunjoong & Altan [55] y Lee & Altan [29]; los análisis a altas temperaturas por encima de la temperatura de recristalización, corresponden entre 688°C y 1031 °C, siendo equivalentes entre 50% y 75%

de la temperatura de recristalización, implementada por Travis [57], Saul et al. [47], Wang & Lenard [48] y Lee et al. [14].

Tabla 2.3. Temperatura implementada en distintos experimentos por diversos autores.

Autor	% $T_m$ (Porcentaje de la temperatura de fusión)	$T_a$ (Temperatura absoluta de ensayo)
Kunogi [23]	$T_a < 0.3 T_m$	$T_a < 412 \text{ }^\circ\text{C}$
Kulkarni & Kalpakjian [51]		
Kobayashi [56]		
DePierre & Gurney [52]		
Nagpal et al. [54]		
Male & Cockcroft [24]	$0.3 T_m < T_a < 0.5 T_m$	$412 \text{ }^\circ\text{C} < T_a < 688 \text{ }^\circ\text{C}$
Male & DePierre [22]		
Hyunjoong & Altan [55]		
Lee & Altan [29]		
Travis [57]	$0.5 T_m < T_a < 0.75 T_m$	$688 \text{ }^\circ\text{C} < T_a < 1031 \text{ }^\circ\text{C}$
Saul et al. [47]		
Wang & Lenard [48]		
Lee et al. [14]		

Debido que el propósito principal del presente trabajo de investigación es reproducir el proceso de forjado a altas temperaturas implementado por la empresa, para caracterizar el coeficiente de fricción en esas condiciones preestablecidas, se tomarán temperaturas de prueba de compresión de anillo por encima de la temperatura de recristalización del “acero titular” a 1000 °C.

#### 2.1.4 Selección de parámetros de lubricación

Existe una diversidad de lubricantes que han sido utilizados en pruebas de compresión para evaluación de la fricción, el investigador F. Fereshteh-Saniee et al. [59] en su investigación de análisis de fricción, implementó 18 distintos lubricantes en especímenes de plastilina y plomo, los lubricantes que utilizó fueron: crema de uso corporal, jabón tibio, aceite vegetal hidrogenado, jabón frío, parafina, vaselina, láminas plásticas, shampoo, talco en polvo, polvo abrasivo, acetona, resina, espuma de jabón, láminas de nylon, silicato de aluminio hidratado (Kaolin<sup>MR</sup>), papel de seda, lienzo de algodón, carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y combinaciones entre ellos, aunado a ello menciona el nivel de dificultad de aplicación antes de cada prueba y lo removible del espécimen después de la prueba; por su parte Rao & Sivaram [60] usaron

8 diferentes tipos de lubricantes: politetraflouroetileno (Teflón<sup>MR</sup>), grasa, aceite para motor, sebo, zinc, bisulfuro de molibdeno (Molykote<sup>MR</sup>), vidrio en polvo y grafito, a distintas temperaturas.

Tabla 2.4. Veinticuatro distintos lubricantes usados en prueba de compresión de anillo.

Lubricantes usados por F. Fereshteh - Saniee et al. [59] y Rao & Sivaram [60]			
Crema de uso corporal	Jabón tibio	Aceite vegetal hidrogenado	Jabón frío
Parafina	Vaselina	Láminas plásticas	Shampoo
Talco en polvo	Polvo abrasivo	Acetona	Resina
Espuma de jabón	Láminas de nylon	Kaolin <sup>MR</sup>	Papel de seda
Lienzo de algodón	Carbonato de calcio	Teflón <sup>MR</sup>	Grasa
Aceite para motor	Sebo	Zinc	Molykote <sup>MR</sup>
	Vidrio en polvo	Grafito	



Figura 2.5. Grafito disuelto en agua utilizado como lubricante.

De las buenas prácticas comúnmente utilizadas en la manufactura comercial de piezas forjadas se conoce que uno de los lubricantes usados en procesos de forjado es el grafito disuelto en agua, por lo que se utilizó dicho tipo de lubricante en la presente investigación, el cual se aplicará en forma de aerosol. Por cuestiones de confidencialidad no se describirán los componentes de la solución del grafito.

## 2.2 Definición de parámetros del equipo

En esta sección se definen los parámetros del equipo en donde se realizaron las pruebas de compresión de anillo, se determina la carga requerida para aplastar la probeta, así como los desplazamientos y las tasas de deformación, y la importancia de estas.

Male & Cockcroft [24] usaron una prensa hidráulica vertical de 60 toneladas, Kobayashi [56] utilizó una prensa hidráulica Lombard® con capacidad de 500 toneladas, Travis [57] realizó la prueba en una máquina universal Tinius Olsen® de 100 toneladas, Wang & Lenard [48] usaron una máquina universal Instron 1332® de 20,000 toneladas, L. X. Li [14] et. al. implementaron una máquina universal servo hidráulica Gleeble 1500® de 1500 toneladas.

*Tabla 2.5. Equipos con su respectiva capacidad de carga usada por algunos autores [24] [56] [57] [48] [14].*

<b>Autor</b>	<b>Equipo</b>	<b>Capacidad de carga</b>
Male & Cockcroft [24]	prensa hidráulica vertical	60 tons
Kobayashi [56]	prensa hidráulica Lombard®	500 tons.
Travis [57]	máquina universal Tinius Olsen®	100 tons.
Wang & Lenard [48]	máquina universal Instron 1332®	20 tons.
L. X. Li [14]	máquina universal servo hidráulica Gleeble 1500®	10 tons.

En el presente trabajo se utilizó una prensa hidráulica YL32 – 100 que se encuentra ubicada en el laboratorio de Manufactura de la DICIS – UG, cuya imagen se muestra en la figura 2.6.



*Figura 2.6. Prensa hidráulica YL32-100 ubicada en DICIS – UG.*

Las especificaciones técnicas de la prensa hidráulica se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la prensa YL32-100

ESPECIFICACIONES		Unidad	YL32-100
Presión de cierre		ton	100
Fuerza de expulsión		ton	19.6
Fuerza de retorno		ton	16.5
Carrera del carro		mm	560
Carrera del colchón de aire		mm	160
Máxima apertura		mm	800
Velocidad de prensado	Movimiento en vacío	mm/s	200
	Prensado	mm/s	8-30
	Retorno	mm/s	150
Velocidad del colchón de aire	Expulsión	mm/s	120
	Retorno	mm/s	250
Tamaño de la mesa	Largo	mm	630
	Ancho	mm	630
Dimensiones	Izquierda-derecha	mm	2,500
	Ancho – largo	mm	1,430
	Altura sobre el piso	mm	3,215
Motor		hp	15
Peso		kg	3,700

Como se puede observar en la tabla de especificaciones técnicas de la prensa YL32-100 la prensa hidráulica tiene una fuerza máxima de cierre a compresión de 100 Toneladas, suficientes para cubrir los requerimientos que demanda la prueba de compresión de anillo.

### 2.2.1 Análisis de la carga requerida

Para comprimir las probetas de anillo es posible estimar la carga requerida analíticamente, para poder seleccionar la máquina adecuada que comprima a la altura requerida, los siguientes cálculos son considerando volumen constante y deformación uniforme sin abarrilamiento como se puede ver en la figura 2.7.

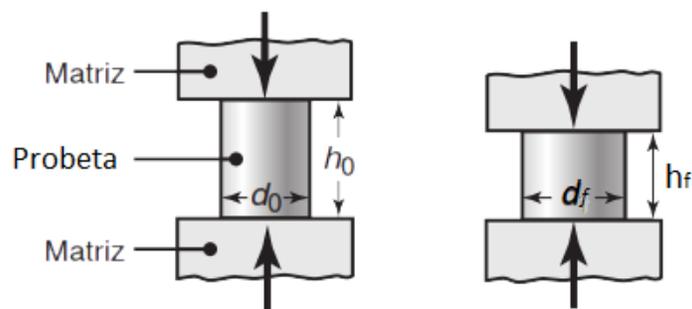


Figura 2.7. Consideración de volumen constante y deformación uniforme sin abarrilamiento. [7]

El esfuerzo verdadero es la relación de la carga aplicada entre el área transversal en ese instante

$$\sigma = \frac{P}{A_f} \quad (2.1)$$

Donde P y  $A_f$  son la carga y el área en un instante de la prueba. Por análisis de volumen constante, el área transversal final puede establecerse en términos del área inicial y la relación de alturas

$$A_f = \frac{h_0}{h_f} A_0 \quad (2.2)$$

Despejando la carga de la ecuación 2.1 y sustituyendo la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1 se tiene:

$$P = \frac{\sigma A_0 h_0}{h_f} \quad (2.3)$$

A partir de la ecuación 2.3 se puede obtener la carga demandada por la prueba de compresión en cualquier instante. Los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.8 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.8. Esfuerzo máximo obtenido de pruebas de compresión de cilindros @1000°C y 30s<sup>-1</sup> en probetas de acero titular por la TU Bergakademie Freiberg. [61]*

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación 2.3 se tiene que la carga crítica es de 21.924 mt.

Para asegurar fiabilidad en la determinación analítica de la carga máxima demandada para probetas en forma de anillo a continuación se muestra una verificación recíproca del resultado analítico *versus* resultados numéricos obtenidos mediante el MEF empleando para ello NX®, MSC.Patran® y MSC.Marc® los cuales son recursos que están disponibles en la red de IDT+i del proyecto. Este desarrollo fue elaborado por la empresa y se incluyen con fines de comparación.

**[La figura 2.9 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.9. Modelo geométrico simplificado de la probeta de anillo elaborado en NX® con superficies de compresión superior e inferior, así como planos de simetría (izquierda) y su correspondiente modelo de elementos finitos elaborado en MSC Patran (derecha). [61]*

**[La figura 2.10 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.10. Resultados de deformación unitaria verdadera en probeta de anillo sin efecto de fricción correspondiente al último incremento del paso de carga obtenida en MSC.Marc®. [61]*

**[La figura 2.11 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.11. Resultados de esfuerzos de von Mises en MPa para una probeta de anillo en condición sin fricción (izquierda) y en condición de fricción con lubricación de grafito 0.3 (izquierda) en el último incremento del paso de carga obtenido en MSC.Marc®. [61]*

Con estos resultados es posible establecer numéricamente las cargas demandadas por esta prueba en condiciones sin fricción y con fricción en forja en caliente con lubricación de grafito que se muestran gráficamente en la siguiente figura y resumidas en la tabla 2.7.

**[La figura 2.12 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.12. Gráfica de carga en mTon versus pasos de carga de la simulación de compresión de anillos con fricción cero y fricción de forja en caliente con lubricación de grafito. [61]*

*Tabla 2.7. Análisis comparativo de resultados de cargas máximas analíticas y numéricas, así como sus errores asociados al resultado analítico. [61]*

**[La tabla 2.7 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

## 2.2.2 Análisis del desplazamiento y tasa de deformación

En la sección anterior, para el cálculo analítico de la carga necesaria para comprimir la probeta se supuso un desplazamiento de la probeta del 84 %, siendo un valor exagerado ya que en la revisión bibliográfica no se encuentra a ningún autor que supere este valor de desplazamiento, por mencionar algunos, Male & Cockcroft [24] deformaron en un 60 % su espécimen hasta una velocidad unitaria de  $1200 \text{ s}^{-1}$  conseguida en una prensa hechiza tipo martillo, Travis [57] deformó hasta un 80 % su probeta de prueba a una tasa de deformación de hasta  $240 \text{ s}^{-1}$ , Wang & Lenard [48] desplazaron su probeta un 50 % a una velocidad de  $10 \text{ s}^{-1}$ , L. X. Li [14] deformó un 60 % a una velocidad de  $15 \text{ s}^{-1}$ , Shahriari et. al. [35] desplazó la altura de su probeta hasta un 55% a una tasa de deformación de  $1 \text{ s}^{-1}$ , Fereshteh et. al. [59] deformó un 50 % su probeta a una velocidad unitaria de  $30 \text{ s}^{-1}$ .

Tabla 2.8. Deformación y tasa de deformación usadas por algunos autores [24] [57] [48] [14] [35] [59].

Autor	Desplazamiento	Tasa de deformación
Male & Cockcroft [24]	60 %	$1200 \text{ s}^{-1}$
Travis [57]	80 %	$240 \text{ s}^{-1}$
Wang & Lenard [48]	50 %	$10 \text{ s}^{-1}$
L. X. Li [14]	60 %	$15 \text{ s}^{-1}$
Shahriari et. al. [35]	55%	$1 \text{ s}^{-1}$
Fereshteh et. al. [59]	50 %	$30 \text{ s}^{-1}$

El siguiente análisis de velocidad de deformación es considerando una tasa de deformación constante. La deformación es un cambio geométrico y en este caso la altura de la probeta es la que se hace cambiar mediante un herramental superior, la deformación en términos de la altura viene dada por la ecuación 2.4.

$$\delta = h_f - h_o \quad (2.4)$$

Que en términos de la deformación unitaria finita se puede expresar por la ecuación 2.5.

$$e = \frac{h_f - h_o}{h_o} \quad (2.5)$$

No obstante, el fenómeno de la deformación de la probeta durante la prueba es un proceso gradual o incremental, por lo que, ésta se puede estimar de una mejor manera si se consideran diferencias infinitesimales conduciendo ello al concepto de deformación verdadera dada por las ecuaciones 2.6 y 2.7

$$d\varepsilon = \frac{dh}{h} \quad (2.6)$$

O bien

$$\varepsilon = \int_0^\varepsilon d\varepsilon = \int_{h_0}^{h_i} \frac{dh}{h_0} = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (2.7)$$

Por otro lado, la tasa de deformación es por definición, la derivada de la deformación respecto al tiempo; es decir:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h dt} = \frac{V}{h} \quad (2.8)$$

Donde  $V$  es la velocidad con la que cambia la altura  $h$  y por lo tanto  $V$  es la velocidad que debe observar el actuador de la máquina de pruebas, y se puede calcular por la ecuación 2.9.

$$V = \dot{\varepsilon} h \quad (2.9)$$

Puesto que este análisis se realiza bajo condiciones de tasa de deformación constante entonces, en la ecuación 2.9 para cada  $\dot{\varepsilon}$  representará una línea recta y de esta manera el conjunto de rectas un campo de velocidades dependiente de la altura de la probeta al ser ensayada; los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.13 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.13. Perfiles de velocidades de las pruebas para cada tasa de deformación en relación con la altura de las probetas durante las pruebas hechas en Freiberg. [61]*

Y por lo tanto para cada tasa de deformación se tendrán los tiempos de duración de la prueba, a partir de que el herramental superior inicia la compresión del espécimen, en la tabla 2.9 se muestra la duración de las pruebas de compresión para cada tasa de deformación; los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales..

**[La figura 2.14 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.14. Perfiles de velocidad del herramental superior respecto al tiempo en escala logarítmica hechas en Freiberg. [61]*

Tabla 2.9. Duración de las pruebas de compresión para cada tasa de deformación. [61]

[La tabla 2.9 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]

Con el establecimiento de esta información se pueden definir las especificaciones para que se adecue la prensa YL32-100; o bien, revisar alternativas en el uso de otros equipos disponibles en la DICIS-UG para realizar las pruebas bajo condiciones de tasa de deformación constante.

Actualmente se continúa trabajando en la adecuación de la prensa existente y en el diseño de una nueva que permita alcanzar las tasas de deformación constante. En el presente proyecto se trabajarán con las velocidades disponibles de la prensa YL32-100, con un rango de velocidad de prensado de 8 a 30 mm/s, de acuerdo con sus especificaciones (ver tabla 2.6). Los perfiles de velocidades de las pruebas a velocidad constante para distintos valores dentro del rango de velocidades disponibles en la prensa YL32-100 son:

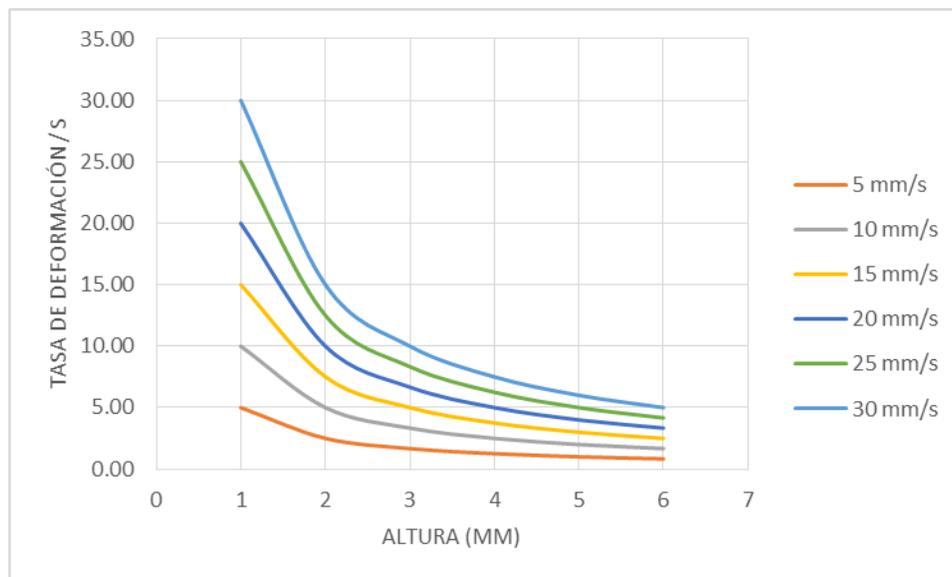


Figura 2.15. Perfiles de velocidades de las pruebas de tasa de deformación en relación con la altura a velocidades constantes para el presente proyecto.

### 2.2.3 Selección de herramental y dados

Male & Cockcroft [24] utilizaron dados maquinados de composición de 1% de carbono y 2 % de manganeso; Kulkarni & Kalpakjian [51] usaron dados acero para herramientas H12 de 7 in de diámetro por 1 in de espesor; Male et. al. [47] precalentaron los dados a 500 °F y los lubricaron con grafito; Hansen et. al. [61] implementaron dados de acero para herramientas AISI D2; Tan et. al. [53] aplicaron dados de acero rápido 2310 con un acabado superficial de 0.017 micrómetros; Dutton et. al. [58] utilizaron TZM con un acabado superficial de 0.2 micrómetros y nitruro de silicio con acabado superficial de 0.81  $\mu\text{m}$ ; Shariari et. al. [35] eligieron dados de una súper aleación GTD – 111; y Douglas & Altan [37] usaron dados con un acabado superficial de 25  $\mu\text{in}$ , precalentados a 350 °F y lubricados en grafito.

*Tabla 2.10. Tabla de materiales de los dados o matrices implementados por varios autores.*

<b>Autor</b>	<b>Material de dados</b>	<b>Tratamiento o acabado</b>
Male & Cockcroft [24]	Composición 1% C, 2% Mg	Dados maquinados
Kulkarni & Kalpakjian [51]	Acero para herramientas H12	7 in de diámetro y 1 in de espesor
Male et. al. [47]	Acero de herramienta	Precalentaron a 500 °F y lubricados con grafito
Hansen et. al. [61]	Acero para herramienta AISI D2	Lubricado en grafito
Tan et. al. [53]	Acero rápido 2310	Acabado superficial de 0.017 $\mu\text{m}$
Dutton et. al. [58]	TZM y Nitruro de silicio	Acabado superficial de
Shariari et. al. [35]	Súper aleación GTD-111	Lubricado en grafito
y Douglas & Altan [37]	Aleación de Acero	Acabado superficial de 25 $\mu\text{in}$ , precalentados a 350 °F y lubricados en grafito.

En la primera etapa de proyecto se propuso un herramental para la ejecución de las pruebas de compresión de cilindros, el cual se muestra en la figura 2.16.

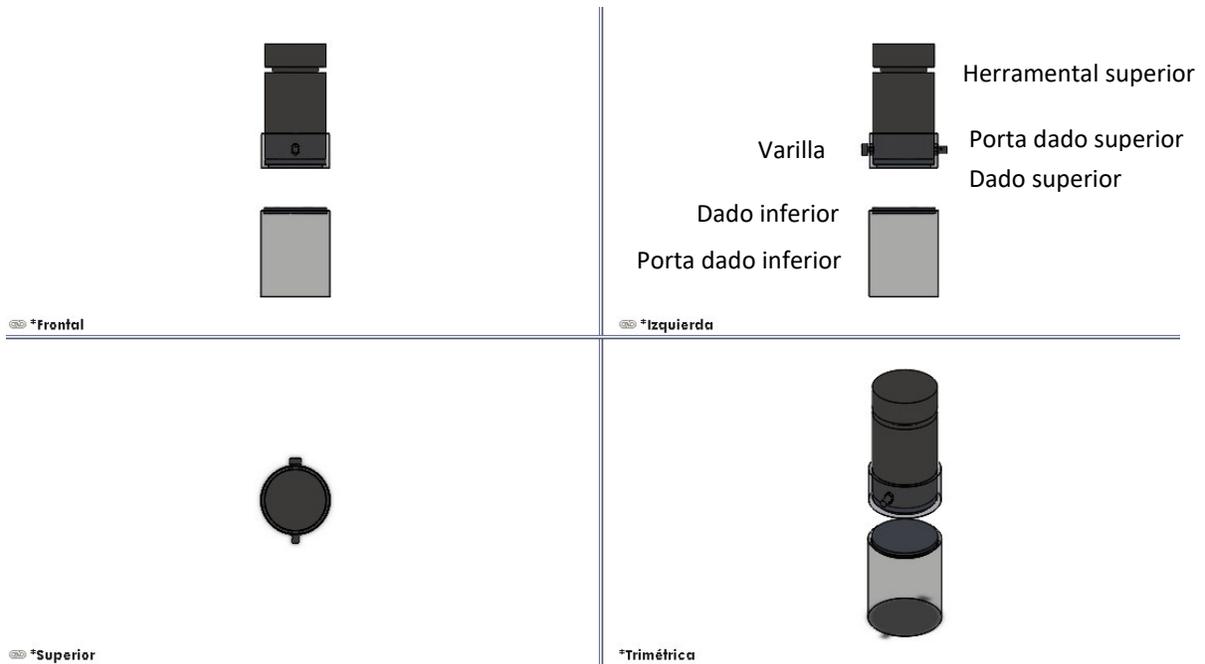


Figura 2.16. Vistas del herramental construido en la primera etapa del proyecto.

Estos herramentales se lograron fabricar en la primera etapa; en la siguiente imagen se pueden ver los herramentales montados en la prensa YL32-100, en posición inicial de efectuar una prueba de compresión a altas temperaturas de probeta cilíndrica.



Figura 2.17. Fotografía herramental construido en la primera etapa del proyecto efectuando una prueba de compresión de probeta cilíndrica a altas temperaturas.

En base al intercambio de información con miembros del grupo de trabajo participantes en la segunda etapa del proyecto, y después de realizar pruebas experimentales preliminares, se sabe que la prensa YL32-100 no cuenta con un control de precisión, ya que los sensores de posición se ajustan para que la probeta sea encogida a una altura determinada, pero esta no responde adecuadamente, variando considerablemente las reducciones de las alturas, perjudicando a la repetibilidad de las pruebas experimentales.

Después de pasar por un proceso de lluvia de ideas, pensando en ahorrar tiempos y costes, y usar el máximo número de herramientas existentes, se determinó que era posible seguir utilizando, el herramental superior, el porta dado superior, porta dado inferior y el perno superior, fabricando así, solo los dados tope superior e inferior, en material para herramientas D2 y en acero A1045, así como tres accesorios en forma de rondanas para lograr las alturas especificadas.

El dado tope superior e inferior son las piezas que estarán en contacto directo con la probeta de anillo, siendo un par en acero 1045 y el otro en acero para herramientas D2; las propiedades mecánicas de estos materiales son las de la tabla 2.11.

*Tabla 2.11. Propiedades mecánicas del acero D2 y acero AISI-SAE 1045. [62] [63]*

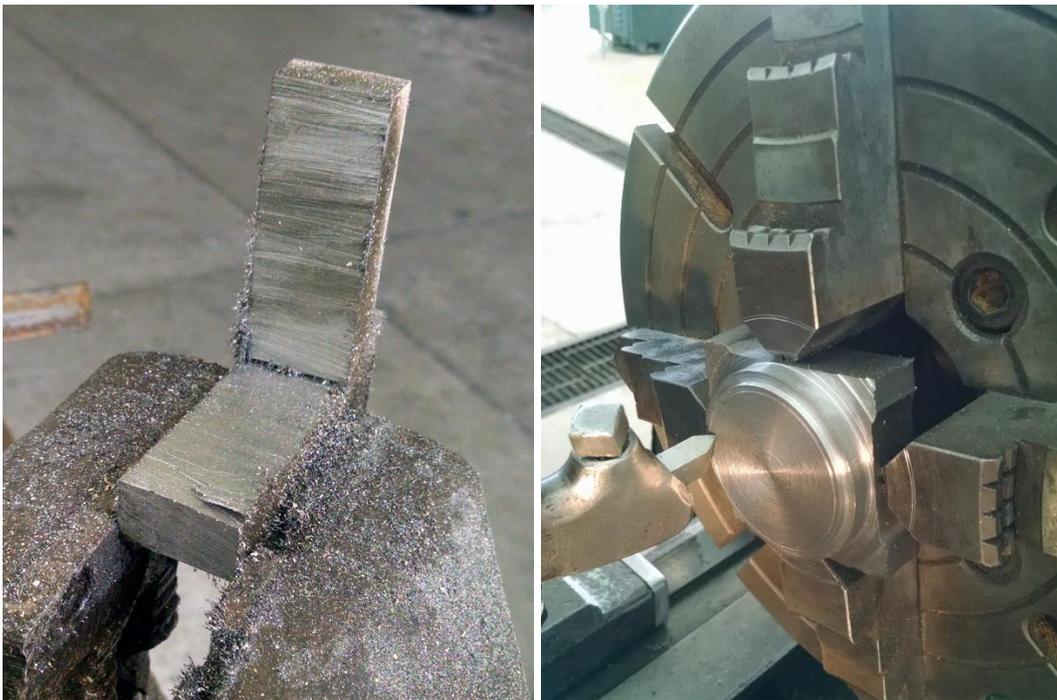
Propiedad Mecánica	Acero p/herramienta D2 [62]	Acero AISI-SAE 1045 [63]
Densidad	7.695 g/cm <sup>3</sup>	7.87 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	207 GPa	200 GPa
Dureza	255 HB	163 HB
Maquinabilidad	35%	57%

Se diseñó un sistema de herramientas con tope incluido, para no depender del control de desplazamientos de la prensa hidráulica y forzando a que se detenga en la posición específica para lograr las alturas de deformación de las probetas a las medidas especificadas, para de esta manera tener una mejor repetibilidad del proceso de compresión. Se diseñaron el dado superior, el dado inferior, 3 rondanas; una de 8 mm, de 7.5 mm y de 7 mm de altura para obtener anillos de 4 mm, 3.5 mm y 3 mm, después de la compresión. Dichos elementos se muestran en la figura 2.18. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.18 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.18. Herramentales diseñados para actuar como tope, para la prueba de compresión de anillo a altas temperaturas.*

El proceso de fabricación de los dados de Acero para herramienta D2 se realizó primeramente con un corte de placa con segueta, posteriormente se montó el bloque prismático rectangular en un torno mecánico convencional con unas mordazas especiales para sujetar piezas de ese tipo, ahí se dejó la pieza redonda, posteriormente se trabajó una cara y se cortó con segueta en el mismo torno, para voltearlo y carear por el otro extremo, después se pulió con 5 lijas finas de distintos tamaños de grano para conseguir una superficie de acabado de aproximadamente de 6  $\mu\text{m}$ . Las imágenes obtenidas del proceso de fabricación se muestran en la figura 2.21.



*Figura 2.19. Proceso de corte de placa (imagen izquierda) y redondeo (imagen derecha) de herramientas tope.*



*Figura 2.20. Proceso de corte de redondo (imagen izquierda) y pulido con lija (imagen derecha) de herramientas tope.*

Finalmente se obtuvieron satisfactoriamente los herramientas que actuaran como tope para alcanzar las alturas deseadas: Porta dado superior, porta dado inferior, dado tope inferior de acero D2 y acero 1045, dado superior de acero D2 y acero 1045, rondanas grande, mediana y chica para alcanzar las alturas de compresión de 4, 3.5 y 3 mm respectivamente; estas se pueden ver en la figura 2.22.



*Figura 2.21. Herramientales fabricados para actuar como tope, para la prueba de compresión de anillo a altas temperaturas.*



*Figura 2.22. Ensamble de dado inferior con las tres distintas rondanas que actuarán como topes.*

### 2.3 Proceso de fabricación de anillos

Para el corte de las probetas en forma de anillo se solicitaron los servicios de la empresa que cuenta con equipo para corte por chorro de agua, a la cual se le entregaron dos elementos redondos de un nuevo acero de prueba para el proyecto forja PEI en su etapa 2, con 100 mm de diámetro por 50 mm de altura (ver figura 2.23) obtenidos mediante proceso de fabricación por fundición por parte de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y se le proporcionó el plano con las dimensiones y tolerancias requeridas para obtener anillos; los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.23 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.23. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.*

- a) Proceso de corte por chorro de agua abrasiva: el corte del redondo de acero de prueba inicia con el montaje del mismo en la máquina de corte por chorro de agua abrasiva marca Dynamic Waterjet Flow XD como se muestra en la figura 2.24.



*Figura 2.24. Montaje de redondo de acero especial en cortadora por chorro de agua abrasiva marca Dynamic Waterjet.*

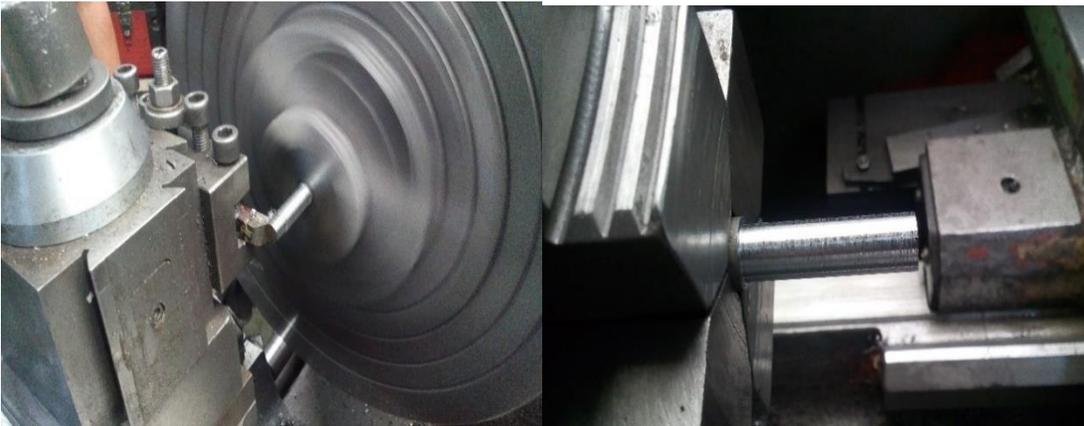
Sujetado el redondo de acero, se inició con el corte de la primera pieza cilíndrica de 22 mm de diámetro por 50 mm de altura (ver figura 2.25), cabe mencionar que la dimensión del diámetro tiene un excedente de material, requerido, para posteriormente darle un maquinado de acabado en el torno.



*Figura 2.25. Primera pieza cortada con chorro de agua abrasiva marca Dynamic Waterjet.*

Se trazaron los cortes de redondos de tal manera que se pudieran obtener el máximo de piezas para aprovechar el mayor material posible. En seguida se procede a realizar el proceso de torneado para dar las dimensiones requeridas a la pieza y mejorar el acabado superficial, siendo esta una característica de este proceso de maquinado.

- b) Montaje y sujeción en torno: Se montó y sujetó la pieza cilíndrica de acero, cuidando que se encontrara bien agarrada y alineada con un palpador de superficies para evitar problemas de excentricidad, y verificando sujetar solo el material necesario.
- c) Cilindrado: Se realiza un cilindrado de la pieza, esto es, un corte uniforme en toda la superficie circular del cilindro, haciendo varias pasadas longitudinales hasta llegar a las dimensiones y acabados necesarios (ver figura 2.26). En este paso se obtiene el diámetro externo de 20 mm.



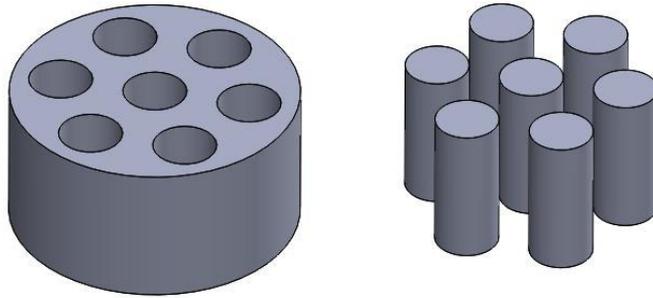
*Figura 2.26. Cilindrado de tocho cilíndrico en torno mecánico convencional.*

- d) Careado o refrentado: El careado es el corte de material en la superficie plana del extremo de la probeta, para garantizar la planicidad y mejorar el acabado superficial, ver figura 2.27.



*Figura 2.27. Careado de tocho cilíndrico en torno mecánico convencional.*

Para la obtención de la probeta cilíndrica con acabado superficial en rectificadora se contrataron los servicios de la empresa Ortiz Taller Mecánico Máquinas Herramientas, S. A. de C. V., a la cual se le entregaron las 7 piezas cilíndricas de 20 mm de diámetro por 45 mm de longitud, ya que se perdieron 5 mm en el proceso de careado, recordando que estos fueron cortados por chorro de agua y torneadas por la empresa Oleohidráulica Especializada de Irapuato S. A. de C. V.



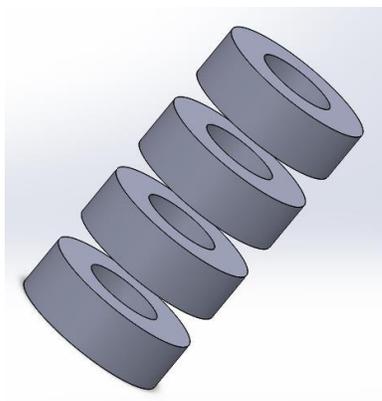
*Figura 2.28. Modelado de 7 tochos cilíndricos de 20 mm de diámetro por 45 mm de longitud.*

Taladrado: Se procede a obtener un cilindro en forma de perno; los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.29 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.29. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.*

- e) Tronzado: Finalmente se procede a realizar el cizallado o corte transversal de la pieza, obteniendo anillos de 7 mm de la altura en el mismo torno de alta precisión por CNC. Considerando la sujeción de la pieza, y sabiendo que se tiene una longitud de 45 mm, se espera que salgan 4 anillos de cada tocho cilíndrico perforado como el de la figura 2.30.



*Figura 2.30. Modelado de obtención de anillos de 7 mm de altura.*

Rectificación: Finalmente los 28 anillos fueron pasados a la rectificadora para dar un mejor acabado superficial en las caras de los anillos y dejarlos en su altura final; los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.

**[La figura 2.31 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

*Figura 2.31. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.*

Estos anillos cumplieron con las tolerancias especificadas, permitiendo proceder con las pruebas experimentales de compresión de anillo a altas temperaturas.

## 2.4 Diseño experimental de pruebas

El diseño experimental de pruebas se realiza con base en los 16 anillos disponibles (ver figura 2.32), las piezas sobrantes se utilizaron para pruebas de calibración. Debido a que se cuentan con 3 distintas medidas de altura [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] y a que se contaba con 2 materiales de dados acero D2 y acero 1045, se realizarán 2 pruebas de cada interacción, utilizando de esta manera 12 probetas de anillo, y quedando 4 anillos en reserva previniendo cualquier error técnico. Todas las pruebas serán a una temperatura de 1000 °C.



*Figura 2.32. Anillos que serán utilizados en las pruebas experimentales.*

En la siguiente tabla se describe el diseño experimental de las 12 pruebas de compresión de anillos a alta temperatura:

*Tabla 2.12. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.*

*Tabla 2.13. los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales.*

## 2.5 Ejecución de pruebas de compresión de anillo

La ejecución de pruebas es la etapa más importante del proyecto, porque una buena preparación y ejecución de pruebas proporcionará resultados confiables, siendo estos la referencia para el análisis de simulación numérica que se verá en el próximo capítulo. Se requiere de mucho cuidado en la preparación del sistema de pruebas: la prensa hidráulica, los herramientas, el lubricante, el horno, las cámaras fotográficas, los instrumentos de medición de temperatura, las probetas, etc. La metodología para el proceso experimental de pruebas de compresión que se siguió fue la siguiente:

- a) Adecuación de sistema general de pruebas: En la figura 2.33 se puede apreciar el sistema usado, el cual consta de un gabinete de adquisición de datos (derecha) unidad de potencia y control de la prensa YL-100 (centro), la prensa con sus herramientas (izquierda), el horno, ubicado en la parte posterior y el pirómetro.



*Figura 2.33. Sistema para ejecución de pruebas*

- b) Montaje y prueba de herramientas: El ensamble adecuado del sistema de herramientas que actuará como tope es fundamental, por lo que se montaron y probaron en la prensa para verificar los ajustes requeridos para evitar que se muevan o inclinen durante la prueba.



*Figura 2.34. Montaje de herramientas tope en prensa.*

- c) Selección del horno: En una búsqueda de hornos, analizando sus rangos de trabajo y sus costos, se seleccionó un horno Carbolite Gero 3000®, que alcanza hasta una temperatura de 3000 °C, suficiente para los requerimientos de la prueba.



*Figura 2.35. Horno Carbolite Gero 3000® para calentar los anillos.*

- d) Preparación de horno: Se acondiciona con un tabique refractario en su interior para que las piezas no estén en contacto directo con la superficie del horno y preservarlo mejor. El tabique se unta con un lubricante en pasta [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] para evitar que se adhieran las probetas en forma de anillo tabique refractario.



*Figura 2.36. Tabique refractario untado con pasta lubricante [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] dentro del horno.*

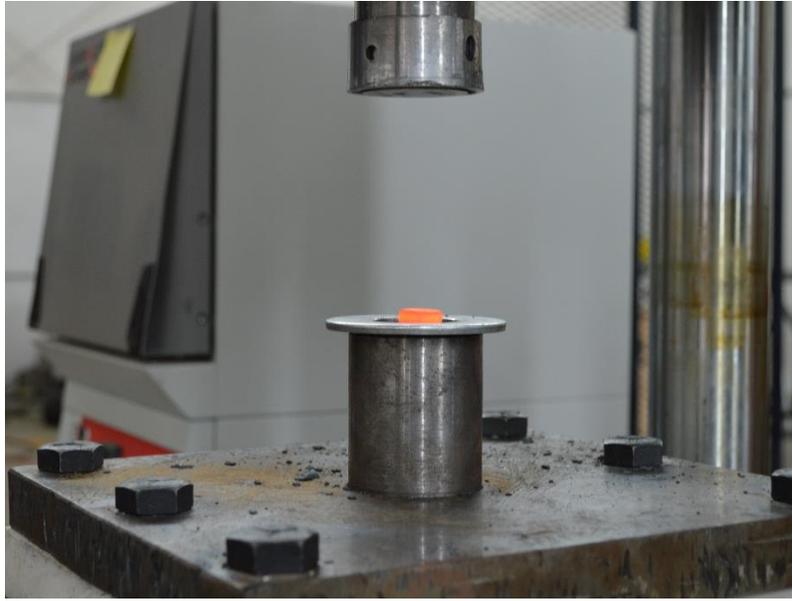
- e) Calentamiento de probetas: Ya con las probetas en forma de anillo dentro del horno se procede a calentarlo a 1300 °C, esperando un gradiente de temperatura que lo bajará a 1000 °C, la temperatura adecuada de la prueba, este dato constatado con el pirómetro montado en el sistema usado. Una vez alcanzada la temperatura deseada se mantiene durante 30 minutos para asegurar homogeneidad en toda la probeta.



Figura 2.37. Horno con anillos calentados a 1300°C.

Es indispensable asegurar la temperatura de prueba; el pirómetro usado para verificarla es de la marca EXTECH® Instrumenta, modelo VIR50®, el cual tiene un rango de medición entre 50 y 2200°C. Cuenta con dos indicadores laser visibles que indican la convergencia de la medición infrarrojo, por lo que es necesario ajustar la distancia de convergencia. Una vez ajustada esta distancia se fija y conecta a una computadora.

- f) Compresión de anillo en prensa: Se procede a sacar cada uno de los anillos al rojo vivo del horno y se coloca en el centro del dado tope inferior, y se acciona la bajada del pistón de la prensa para que ejecute la operación de compresión.



*Figura 2.38. Prueba de compresión de anillo a 1000°C.*

Se ha usado un lubricante a base de grafito, mostrado en el capítulo 2 del estado del arte (ver figura 2.5), con el objetivo de lograr procesos de caracterización cercanos a los presentados en el proceso productivo de la empresa. Los anillos obtenidos después de las pruebas se mostrarán más adelante en la sección de análisis de resultados.

## 3 Metodología de la simulación

### 3.1 Descripción del software LS-DYNA®

LS-DYNA® es un solucionador de Elementos Finitos originalmente desarrollado para el análisis no-lineal de estructuras sometidas a cargas de impacto. Actualmente, es un código multi físico capaz de resolver problemas muy complejos que incluyen interacción estructural con: Transferencia de calor, fluidos compresibles e incompresibles, electromagnetismo, etc. DYNA 3D fue desarrollado en 1976 por el Dr. John O. Hallquist en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore (LLNL®) con el objetivo de simular colisiones y explosiones. En 1978 fue solicitado por Francia, originando a que fuera puesto, sin restricciones, en el dominio público. En 1979 se da a conocer la primera versión disponible para la súper computadora CRAY-1®. Desde entonces, DYNA 3D era vectorizado y explícito.

En 1981 captó el interés en Japón y Europa. Grandes empresas como Rolls-Royce®, comenzaron a usarlo. En 1982 se imparten los primeros seminarios para usuarios en Japón y Europa. LLNL® comienza a recibir solicitudes de empresas para comercializarlo. En 1984 el Dr. David Benson se une al equipo de desarrolladores, a cargo del Dr. John O. Hallquist; juntos desarrollan el auto-contacto superficial, dinámica de cuerpo rígido acoplada a FEM y otras muchas mejoras.

En 1988, más de 600 cintas conteniendo DYNA3D, DYNA2D, NIKE2D, NIKE3D (códigos FEM implícitos), TAURUS (post-procesador) e INGRID (mallador) habían sido distribuidos en el mundo. El Dr. Hallquist da consultoría relacionada con el uso de DYNA3D en más de 60 organizaciones; en ese mismo año fue fundado Livermore Software Technology Corporation (LSTC®), con el objetivo de comercializar y continuar el desarrollo de LS-DYNA®.

Actualmente el código DYNA3D es el código FEM más avanzado en análisis dinámicos transitorios. [64]

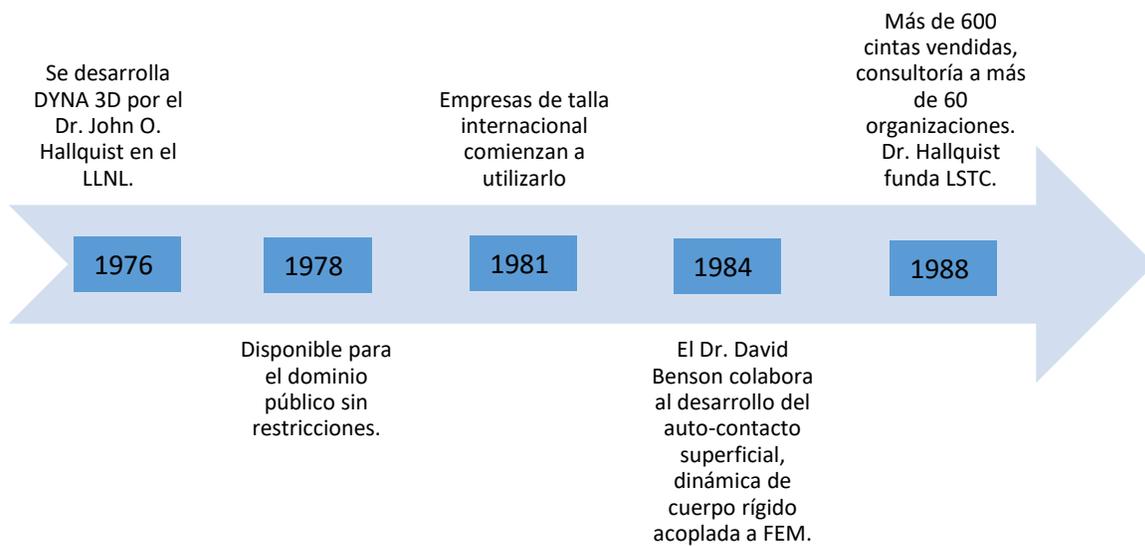


Figura 3.1. Línea de tiempo de LS-DYNA®.

Algunas aplicaciones de LS-DYNA® son la automotriz, Aeroespacial, Manufactura, Estructural, Electrónica, Defensa, entre otras.

Automotriz	Aeroespacial	Manufactura	Estructural	Electrónica	Defensa
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bolsa de aire</li> <li>•Seguridad del ocupante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Impacto de aves</li> <li>•Contención de álabes</li> <li>•Colosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Forja</li> <li>•Estampado</li> <li>•Fundición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Seguridad ante terremotos</li> <li>•Estructuras de hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Análisis de caída</li> <li>•Diseño de empaques</li> <li>•Efectos térmicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Diseño de armas</li> <li>•Desempeño ante explosivos</li> <li>•Penetración</li> </ul>

Figura 3.2. Algunas aplicaciones de LS-DYNA®.

### 3.2 Generación de la geometría del espécimen

El modelo del anillo se genera por medio de puntos, líneas, superficies y volúmenes. El Software LS-Prepost tiene la capacidad de generar los modelos en 3D, sin necesidad de utilizar otro software CAD para hacerlo. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]; solo se modelará un cuarto de la probeta de anillo por su axi-simetría, ahorrando así, tiempo de cómputo.

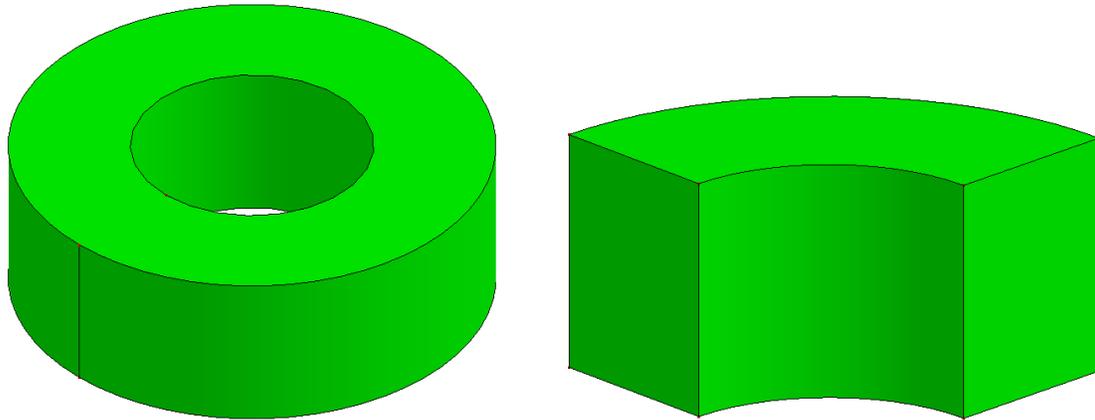


Figura 3.3. Modelado de probeta de anillo en LS-Prepost.

### 3.3 Discretización del modelo

El auto mallado crea elementos de medida uniforme, mixtos entre elementos cuadrados y triangulares, el tamaño seleccionado fue de 0.2 mm como se muestra en la figura siguiente; se hicieron algunas pruebas disminuyendo y aumentando el tamaño de malla, considerando que, si se deja elementos grandes, los resultados pueden ser sesgados, y si la malla se hace muy fina, se sacrifica el tiempo de cómputo.

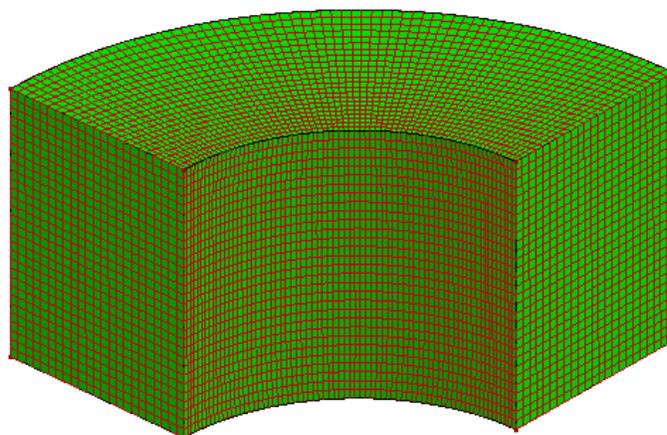
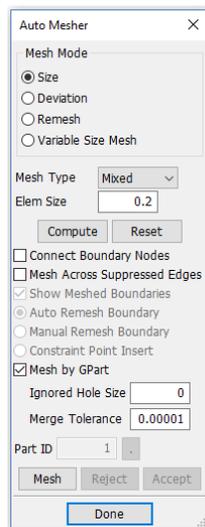


Figura 3.4. Discretizado de probeta de anillo en LS-Prepost.

Para simular los datos que realizarán la función de compresión de la probeta, se crea una malla cascarón, con la forma de un cuarto de círculo plano, considerando que la probeta quede completamente cubierta durante la compresión, la densidad de mallado se selecciona

de forma similar al tamaño de elementos de la probeta de anillo para que no existan singularidades. En la siguiente figura se pueden ver la discretización de la capa de los dados de compresión.

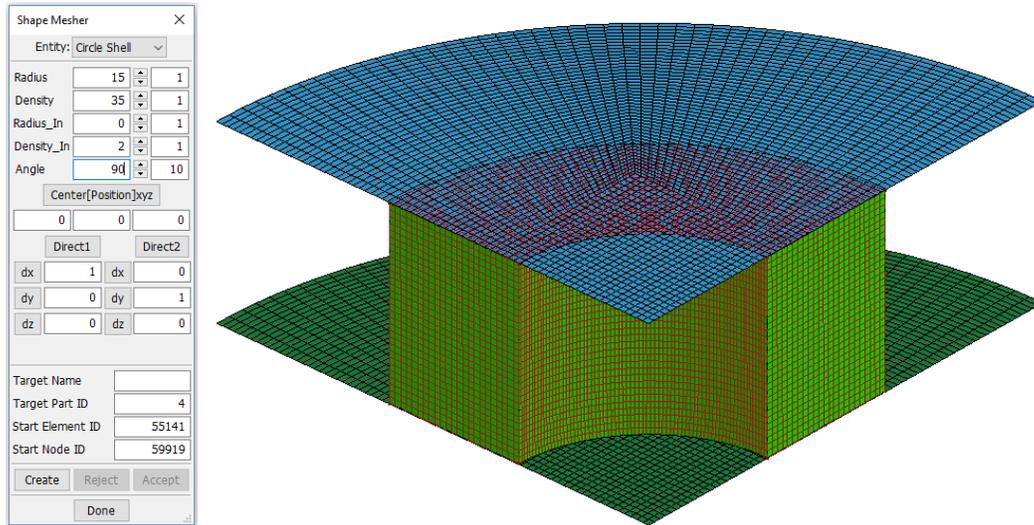


Figura 3.5. Discretizado de capas de dados de compresión en LS-Prepost.

### 3.3.1 Formulación de los elementos

En la sección se define la formulación del elemento, las reglas de integración, el espesor nodal, y las propiedades de la sección transversal. Cada una de las secciones son únicas, ningún elemento puede tener el mismo ID. Considerando que se está aplicando la sección a la probeta, se selecciona el tipo 1, de formulación de elemento sólido de esfuerzo constante, para análisis implícitos. No se selecciona ningún tipo de elemento ambiente.

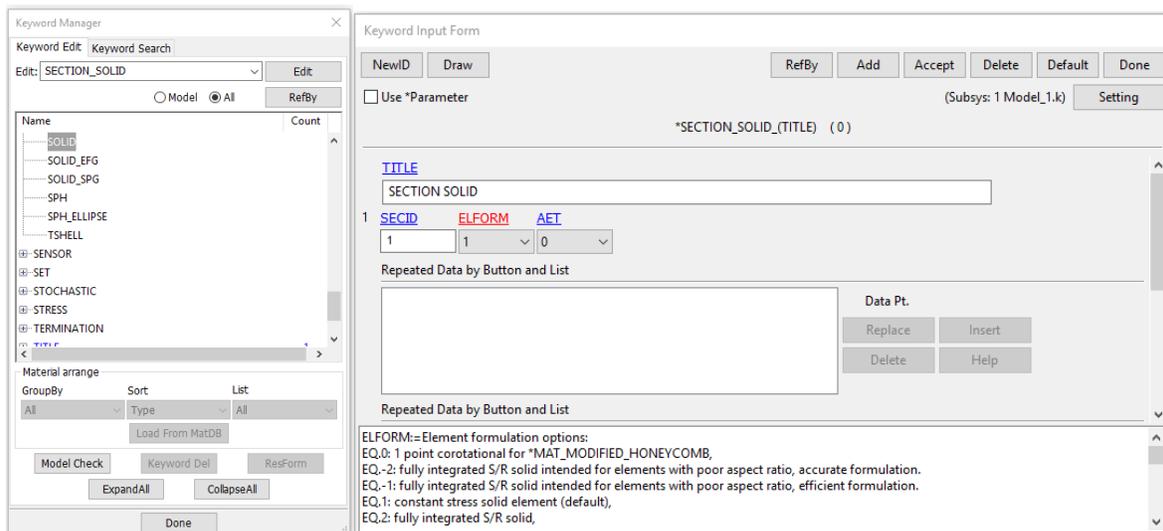


Figura 3.6. Formulación del elemento de sección sólida para probeta en LS-Prepost.

En la entrada de sección de capa, se selecciona el elemento tipo 2 de formulación Belytschko-Tsay, esta es la que aparece por defecto y corresponde a un análisis implícito. Sí se solicita otra formulación de elementos para un análisis implícito, LS-DYNA® sustituye uno de los anteriores en lugar del elegido. Se selecciona un factor de esfuerzo cortante de 1 por considerarse una superficie rígida; se consideran una formulación con dos puntos de integración, y se considera un espesor de capa de 0.5 mm.

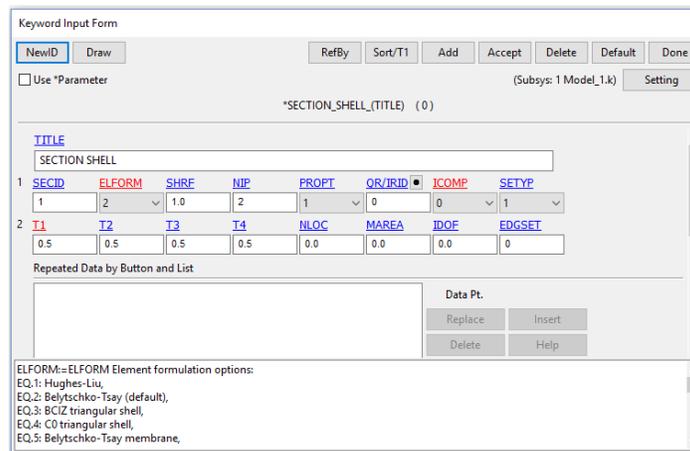


Figura 3.7. Formulación del elemento de sección capa para dados en LS-Prepost.

### 3.4 Asignación de las propiedades de los materiales.

La consistencia de unidades se define:

1 unidad de fuerza = 1 unidad de masa \* 1 unidad de aceleración

1 unidad de aceleración = 1 unidad de longitud / 1 unidad de tiempo al cuadrado

1 unidad de densidad = 1 unidad de masa / 1 unidad de longitud cúbica

La siguiente tabla muestra ejemplos de consistencia de sistema de unidades:

Tabla 3.1. Consistencia de Sistema de Unidades.

Masa	Longitud	Tiempo	Fuerza	Esfuerzo	Energía
Kg	m	s	N	Pa	J
kg	mm	ms	kN	GPa	kN-mm
g	mm	ms	N	MPa	N-mm
<b>ton</b>	<b>mm</b>	<b>s</b>	<b>N</b>	<b>MPa</b>	<b>N-mm</b>
Lbf-s <sup>2</sup> /in	in	s	Lbf	Psi	Lbf-in
slug	ft	s	Lbf	Psf	Lbf-ft

Las propiedades mecánicas se tomaron de la tabla 2.11, densidad de  $7.695 \text{ g/cm}^3$ ,  $207 \text{ GPa}$  de módulo de Young y  $0.27$  de relación de Poisson. Se debe considerar la consistencia de las unidades según el sistema en que se trabaje; en el presente trabajo se consideró el Sistema de Unidades que se encuentra sombreado en color amarillo como se muestra en la tabla 3.1. En la selección del material se elige un material se selecciona un material tipo rígido para las capas inferior y superior; la capa inferior simula el dado inferior que permanecerá fijo y la capa superior asemeja al dado superior, que se moverá para ejercer la presión de la probeta contra el dado inferior.

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 h1f03d2E4.k) Setting

\*MAT\_RIGID\_(TITLE) (020) (2)

TITLE  
mat placa superior

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	2	7.695e-009	2.070e+005	0.2700000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
	-1.0	0	110111

3	LCO_OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:  
E=Young's modulus. Reasonable values have to be chosen for contact analysis (choice of penalty).

Figura 3.8. Asignación de propiedades mecánicas de los dados en LS-Prepost.

La selección de propiedades mecánicas de la probeta de anillo también se definió, [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

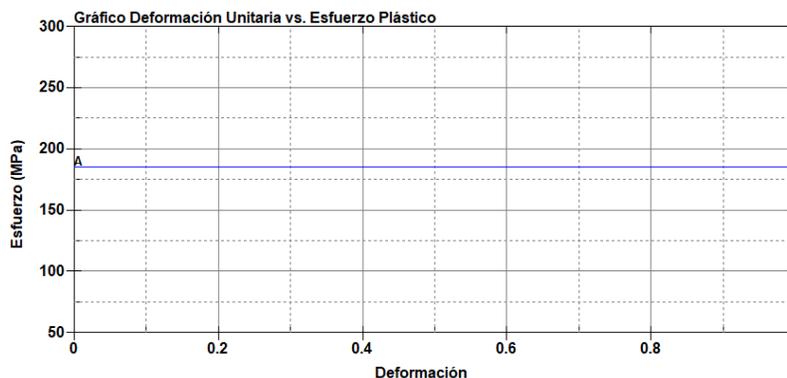


Figura 3.9. Curva de flujo plástico de la probeta de anillo.

El modelo de material seleccionado para la probeta de anillo es el Plástico Isotrópico Lineal, este modelo es similar al modelo Hidrodinámico Plástico Elástico, pero con la inclusión de efectos de la tasa de deformación y no usa una ecuación de estado. Las desviaciones de esfuerzos son determinadas para satisfacer la función de fluencia:

$$\phi = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0, \quad (3.1)$$

Donde

$$\sigma_y = \beta[\sigma_0 + f_h(\epsilon_{eff}^p)], \quad (3.2)$$

Donde la función de endurecimiento  $f_h(\epsilon_{eff}^p)$  puede ser especificada en forma tabular. O se puede representar de la forma:

$$f_h(\epsilon_{eff}^p) = E_p(\epsilon_{eff}^p) \quad (3.3)$$

El parámetro  $\beta$  considera los efectos de la tasa de deformación. Para generar una curva que defina el esfuerzo de fluencia versus la deformación plástica puede ser definida considerando los niveles de tasa de deformación efectiva.

En la implementación de este modelo de material, la desviación de esfuerzo es actualizada elásticamente, la función de fluencia es checada, y si se satisface, la desviación de esfuerzos es aceptada. Y si no se satisface, un incremento en la deformación plástica es calculada:

$$\Delta\epsilon_{eff}^p = \frac{\left(\frac{3}{2}s_{ij}^*s_{ij}^*\right)^{1/2} - \sigma_y}{3G + E_p}, \quad (3.4)$$

G es el módulo cortante y  $E_p$  es el módulo de dureza plástica. La desviación de estado de esfuerzo se reduce a:

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y}{\left(\frac{3}{2}s_{ij}^*s_{ij}^*\right)^{1/2}} s_{ij}^*. \quad (3.5)$$

Las ecuaciones aplican para elementos cascaron o de capa, pero con la adición de un bucle iterativo para resolver el incremento de deformación normal, de forma que la componente de esfuerzo normal de la superficie media del elemento se acerca a cero.

Tres opciones consideran los efectos de la tasa de deformación:

1. La tasa de deformación puede ser considerada para usar el modelo de Cowper-Symonds, el cual se reduce al esfuerzo de fluencia con el factor

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/p} \quad (3.6)$$

Donde  $\dot{\epsilon}$  es la tasa de deformación.

2. Para una curva de carga general, definiendo  $\beta$ , el límite elástico se adaptaría. En esta curva el factor de escala versus la tasa de deformación está definida.
3. Si distintas curvas de esfuerzos versus deformación pueden ser provistas por tasas de deformación, la opción de usar una tabla de referencia puede ser posible.

Una formulación de visco plasticidad completa es opcional con la incorporación de distintas opciones en la superficie de fluencia.

Si una tabla es especificada a una curva es dada para cada tasa de deformación. Valores intermedios son encontrados por interpolación entre curvas. La deformación plástica efectiva versus el esfuerzo de fluencia es esperada. Si la tasa de deformación cae fuera del rango, no se usa la extrapolación; más bien, la primera o la última curva determina el esfuerzo de fluencia, dependiendo si la tasa es baja o alta, respectivamente.

*Figura 3.10. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

En el tipo de control hourglass, hay 6 opciones disponibles para elementos sólidos. Para elementos de capa cuadriláteros y elementos membrana, el hourglass se basa en la formulación de Belytschko y Tsay, por ejemplo, las opciones 1 a la 3 son idénticas, y las opciones 4 a 6 también lo son. El tipo de control de hourglass seleccionado fue la formulación viscosa estándar de LS-DYNA®. El control de hourglass viscoso es recomendado para problemas con altas velocidades de deformación. El control de rigidez es a menudo preferible para bajas velocidades, especialmente cuando los pasos de tiempo son largos. Para elementos sólidos, la integración de volumen proporciona algunas ventajas en elementos altamente distorsionados.

*Figura 3.11. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

Después que se ha definido los tipos de secciones, las propiedades de los materiales y el hourglass, se procede a la asignación de estos a cada una de las partes del modelo. Se asignan propiedades a las capas que representan las superficies de los dados que están en contacto con el espécimen, y se asignan los parámetros correspondientes a la probeta de anillo.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 Model\_1.k) Setting

\*PART\_(TITLE) (4)

1 TITLE  
SOLID PART

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID

1	1	1	0	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

HGID:=Hourglass/bulk viscosity ID defined in \*HOURLASS section.  
EQ,0: default values are used.

Figura 3.12. Asignación de propiedades a cada una de las partes en LS-Prepost.

### 3.5 Aplicación de cargas y condiciones de frontera

Recordando que en el capítulo experimental se usó la velocidad máxima de carga disponible en la prensa hidráulica, por semejanza del análisis del proceso de compresión, se aplicará una carga de velocidad similar de 30 mm/s, como se puede ver a continuación.

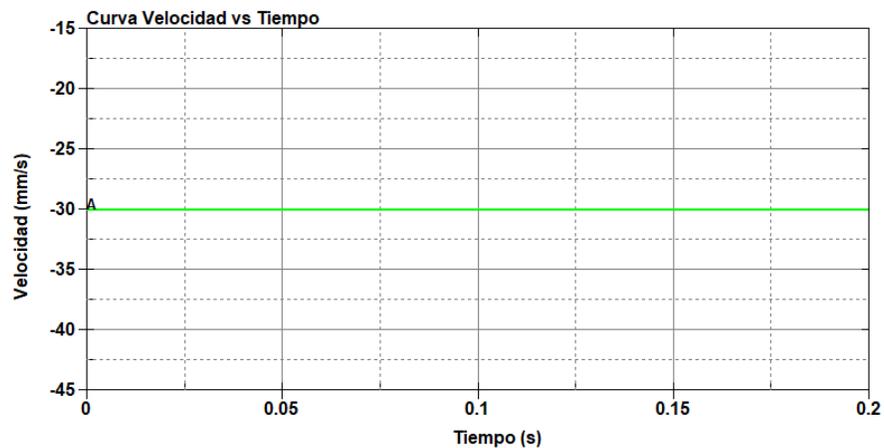


Figura 3.13. Curva de velocidad del dado superior.

La curva de velocidad se asignó en el formulario de movimiento rígido prescrito, en este caso, solo del dado superior, porque es el que se moverá; al dado inferior permanece fijo.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 h1f03d2E4.k) Setting

\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID\_(ID) (1)

ID	TITLE
	Velocidad Dado Superior

1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	2	3	0	8	1.0000000	0	1.000e+028	0.0

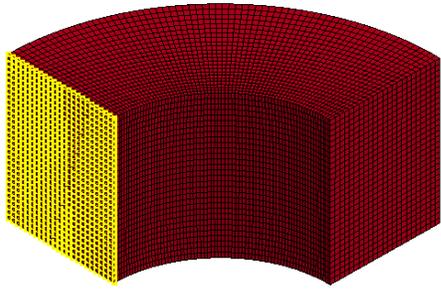
COMMENT:

New Default id = 2

Figura 3.14. Asignación de velocidad del dado superior en LS-Prepost.

### 3.5.1 Asignación de restricciones de movimiento

En esta parte, se asignan propiedades de restricción al cuarto de anillo, definiendo que cada una de sus caras cortadas permitirá el movimiento de desplazamiento de los nodos en sus ejes planares, y requerirán la rotación de cada uno de sus nodos de su eje normal; por el contrario, su eje normal al plano no permitirá desplazamientos, y sus ejes del plano de la superficie cortada, no permitirán rotaciones.



Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 h1f03d2E4.k) Setting

\*BOUNDARY\_SPC\_SET\_(ID) (2)

ID	TITLE
	Restricciones de Desplazamientos y Rotaciones en Nodos

1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	1	0	1	0	0	0	1	1

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Figura 3.15. Restricción de nodos del modelo de anillo en LS-Prepost.

### 3.5.2 Contactos en LS-DYNA®

El tratamiento del desplazamiento y el impacto a lo largo de las interfases siempre ha sido una capacidad importante en LS-DYNA®. Existen tres métodos para controlar los contactos:

- a) Método de restricción cinemática
- b) Método de penalización
- c) Método de parámetros distribuidos.

El método de restricción cinemática se usa para vincular interfases. Las interfases se pueden definir en tres dimensiones, al enumerar en orden arbitrario, cada segmento triangular y cuadrilátero que comprende cada lado de la interfaz. Un lado de la interfaz se designa como el lado esclavo, y la otra se designa como el lado maestro. Los nodos que se encuentran en esas superficies se denominan, nodos esclavos y maestros, respectivamente.

En el método de la penalización simétrica, esta distinción es irrelevante, pero en los otros métodos, los nodos esclavos están obligados a deslizarse sobre la superficie maestra después del impacto y deben permanecer en el dominio de la superficie, hasta que se desarrolle una fuerza de tracción entre el nodo y la superficie.

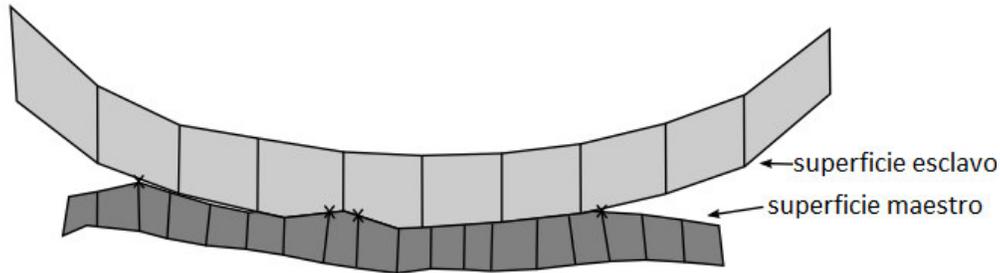
Hoy en día, los contactos automáticos se usan muy comúnmente. En este enfoque, el esclavo y las superficies maestras se generan internamente dentro de LS-DYNA a partir de las ID de las partes dadas para cada superficie. En los modelos de impacto automotriz, es bastante común incluir todo el vehículo en una sola definición de contacto superficial, donde todos los nodos y elementos pueden interactuar.

#### 3.5.2.1 Método de restricción cinemática

El método de restricción cinemática utiliza las condiciones de impacto y liberación de Hughes et. al. [65], se implementó inicialmente en DYNA2D por Hallquist [66] y finalmente se extendió a tres dimensiones en DYNA3D. Las restricciones se imponen a las ecuaciones globales mediante una transformación de los componentes de desplazamiento de los nodos esclavos, esta transformación tiene el efecto de eliminar grados de libertad.

Para preservar la eficiencia de la integración de tiempo explícita, la masa se agrupa para acoplar los grados de libertad globales de cada nodo maestro. Las condiciones de impacto y liberación se imponen para asegurar la conservación del impulso.

Los problemas de este método surgen cuando la discretización de la superficie maestra es más fina que la superficie esclava, como se muestra a continuación:



*Figura 3.16. Contacto inadecuado entre superficie maestra y esclava en el Método de Restricción Cinemática. [64].*

En este enfoque los nodos maestros pueden penetrar a través de la superficie esclava sin resistencia y crear un pliegue en la línea de deslizamiento; tales dobleces son relativamente comunes en esta formulación cuando existen presiones altas en la interfaz. Se puede argumentar, por supuesto, que una mejor discretización minimizaría tales problemas, pero algunos problemas pueden considerar una buena discretización inicial pero después puede considerarse deficiente, como en el caso de un elemento gaseoso explosivo se expande contra la superficie de un elemento estructural.

### 3.5.2.2 Método de penalización

El método de penalización también se usa en los programas de análisis explícitos DYNA2D y DYNA3D, así como en los programas de análisis implícito NIKE2D y NIKE3D. El método consiste en acomodar a su normal, los nodos penetrantes y la superficie de contacto, con la excepción de la matriz de rigidez de resorte, que debe colocarse en la matriz de rigidez global. En este método los programas de análisis explícitos e implícitos son similares. Un buen conocimiento y control sobre el método aumenta las posibilidades del éxito de los resultados obtenidos.

En contraste con el método de restricción cinemática, este enfoque influye muy poco en el hourglass. El Momentum se conserva sin la necesidad de imponer condiciones de impacto y liberación, además, no se requiere de algún tratamiento especial en la superficie de contacto, lo que simplifica enormemente su implementación.

Actualmente hay tres implementaciones de algoritmo en el método de penalización:

- Formulación de penalización estándar
- Formulación de penalización de restricción suave: Se ha implementado para tratar el contacto entre cuerpos con propiedades mecánicas diferentes. El cálculo y actualización de la matriz de rigidez difiere de la formulación de penalización estándar.
- Formulación de penalización basada en segmentos: Es un poderoso algoritmo de contacto, cuya lógica es un enfoque de segmento maestro – segmento esclavo. Este contacto es muy útil para el análisis de auto contacto de la bolsa de aire durante la inflación y las complejas condiciones de contacto.

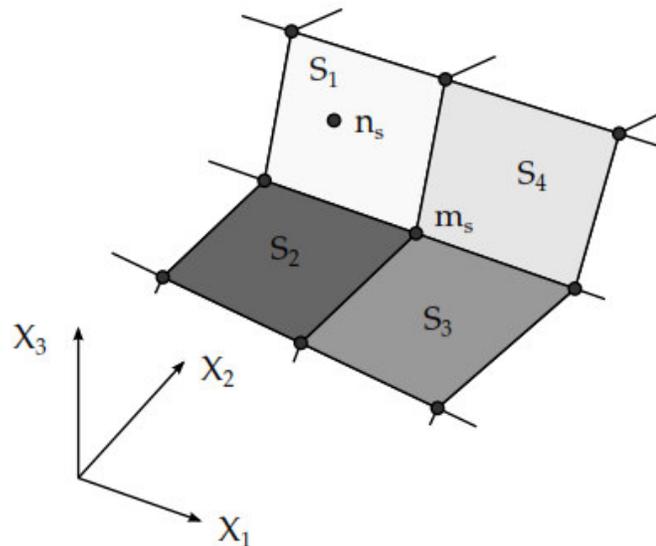


Figura 3.17. Cuatro segmentos maestros albergando un nodo esclavo y un nodo maestro [64].

En la formulación de penalización estándar, se elige una matriz de rigidez del mismo orden de magnitud que la rigidez del elemento normal a la interfaz. En consecuencia, el tamaño de paso de tiempo calculado ni se ve afectado por la existencia de interfases, sin embargo, si las presiones en la interfaz son demasiado grandes, puede ocurrir una penetración inaceptable. Al aumentar la rigidez y reducir el tamaño de paso del tiempo, se puede resolver tales problemas. Dado que esto aumenta la cantidad de pasos de tiempo, se ha implementado una opción de deslizamiento para tratar estructuras explosivas; esta opción se basa en el tercer método descrito a continuación.

### 3.5.2.3 Método de parámetros distribuidos

Este método se usa en DYNA2D, y su especialización es la opción deslizante en DYNA3D. La motivación para este enfoque provino del TENSOR de Burton et. al. [67] y el HEMP de Wilkins [68], programas que mostraba menos inestabilidad de malla que DYNA2D con el algoritmo

de restricción nodal. Posteriormente este algoritmo fue implementado en DYNA2D por Hallquist [69], desde esta publicación, el método ha sido moderadamente mejorado, pero las ideas principales siguen siendo las mismas.

En la formulación de parámetros distribuidos, la mitad de la masa de cada elemento esclavo en contacto se distribuye en el área superficial maestra, además, el esfuerzo interno de cada elemento determina una distribución de presión para el área de superficie maestra. Las restricciones, velocidades y aceleraciones se imponen en el nodo esclavo, para asegurar su deslizamiento a lo largo de la superficie maestra. A diferencia de los otros métodos, en este no se permite que los nodos esclavos penetren, por lo tanto, se evita la lógica de sobre poner, en otras palabras, el volumen relativo del elemento esclavo ignora cualquier intrusión de las superficies maestras.

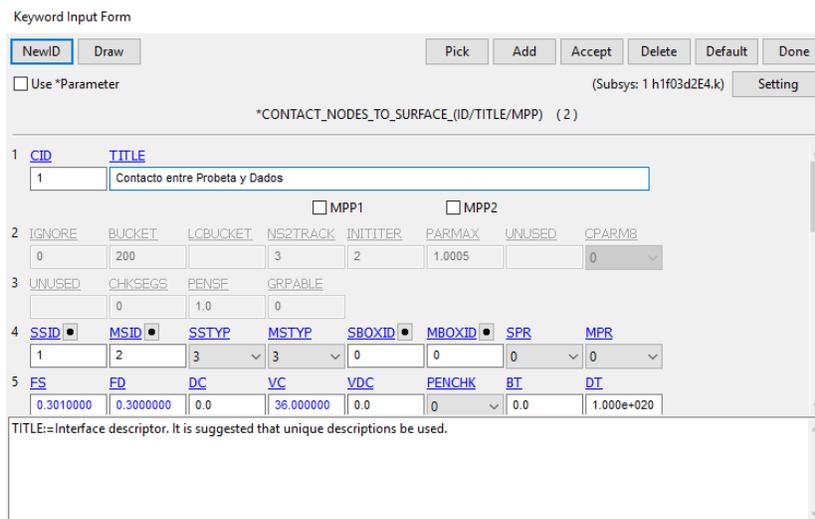


Figura 3.18. Asignación de propiedades de contacto de la interfase en LS-DYNA®.

### 3.5.2.4 Coeficiente de fricción estática, dinámica y decaimiento exponencial

Si el Coeficiente de Fricción Estática es mayor que Cero y no es igual a 2, se asume que el coeficiente friccional es dependiente de la velocidad relativa entre las superficies de contacto:

$$\mu_c = FD + (FS - FD)e^{-DC|v_{rel}|}$$

Donde  $\mu_c$  es el coeficiente de fricción, FD es el coeficiente de fricción dinámica, FS es el coeficiente de fricción estática, DC es el coeficiente de decaimiento exponencial, y  $v_{rel}$  es la velocidad relativa.

### 3.5.2.5 Coeficiente de fricción viscosa

El coeficiente de fricción viscosa (VC) es necesario para limitar la fuerza máxima de fricción ( $F_{lim}$ ). La fuerza límite es calculada:

$$F_{lim} = VC \times A_{cont} \quad (3.7)$$

Donde  $A_{cont}$  es el área de contacto de los nodos. El valor sugerido para el coeficiente de fricción viscosa es el esfuerzo cortante de fluencia:

$$VC = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

Donde  $\sigma_o$ , es el esfuerzo de fluencia del material impactado.

### 3.5.2.6 Coeficiente de amortiguamiento viscoso

El coeficiente de amortiguamiento viscoso (VDC) se expresa en porcentaje del valor crítico o el porcentaje del coeficiente de restitución, con la finalidad de evitar una oscilación indeseable, e. g. para la simulación de formación de láminas, se aplica una amortiguación de contacto perpendicular a las superficies de contacto. Cuando ICOR, la sexta columna de la tarjeta opcional E, no está definida en 0, el coeficiente de amortiguamiento ( $\xi$ ) aplicado viene dado por

$$\xi = \frac{VDC}{100} \xi_{crit} \quad (3.9)$$

Donde VDC es un entero (en unidades de porcentaje) entre 0 y 100. La fórmula del coeficiente de amortiguamiento crítico ( $\xi_{crit}$ ) es

$$\xi_{crit} = 2m\omega \quad (3.10)$$

Donde m está determinada por las masas nodales como

$$m = \min(m_{esclavo}, m_{mestro}) \quad (3.11)$$

Y  $\omega$  está determinada por la rigidez en la interfase (k), de acuerdo con:

$$\omega = \sqrt{k \frac{m_{esclavo} + m_{maestro}}{m_{maestro} + m_{esclavo}}} \quad (3.12)$$

[70]

## 3.6 Generación de solución de simulación

### 3.6.1 Control

El comando de CONTROL es opcional y puede ser usado para activar por default opciones de solución, como el remallado adaptativo al cambio de volumen y la solución implícita, sin embargo, es aconsejable definir el CONTROL\_TERMINATION. Los órdenes de los comandos de control son arbitrarios. Para evitar ambigüedades, es importante definir no más de un comando de control de cada tipo.

Este comando provee opciones de control sobre la energía disipada. Contiene la opción de cálculo de energía de hourglass, con la opción de que esta no sea calculada o si sea calculada e incluida en el balance de energía. La energía de hourglass es reportada en ASCII, archivos GLSTAT y MATSUM.

La energía de pared rígida RWEN puede ser no calculada o calculada e incluida en el balance de energías. La energía de pared rígida es reportada en ASCII, archivo GLSTAT.

La energía de disipación de deslizamiento SLNTEN, de la misma forma que las anteriores, puede ser no calculada o calculada e incluida en el balance de energías. La energía de disipación de deslizamiento es reportada en ASCII, archivos GLSTAT y SLEOUT.

La energía de disipación de Rayleigh RYLEN o también llamada energía de disipación de amortiguamiento, puede ser no calculada o calculada e incluida en el balance de energías. La energía de disipación de amortiguamiento es reportada en ASCII, archivos GLSTAT y MATSUM.

El comando de control de terminación tiene el propósito de detener la tarea que se esté ejecutando. ENDTIME define el tiempo de terminación, la orden de este comando esta sobre las demás. ENDCYC define el ciclo de terminación, este es opcional y puede ser usado si el tiempo de ciclo especificado es alcanzado antes del tiempo de terminación ENDTIME. El factor de reducción DTMIN, determina el mínimo paso de tiempo.

El comando CONTROL\_TIMESTEP tiene como propósito controlar la medida del paso de tiempo. El comando DTINIT determina la medida del paso inicial de tiempo. El comando TSSFAC es el factor de escala para calcular el paso de tiempo; 0.9 es usado para simulación de explosivos, aunque lo recomendable es usar 0.67. El comando ISDO calcula el tiempo de elementos capa de 4 nodos. Para capas de 3 nodos se usa la altitudes y lados más cortos. Esta opción es irrelevante en elementos sólidos.

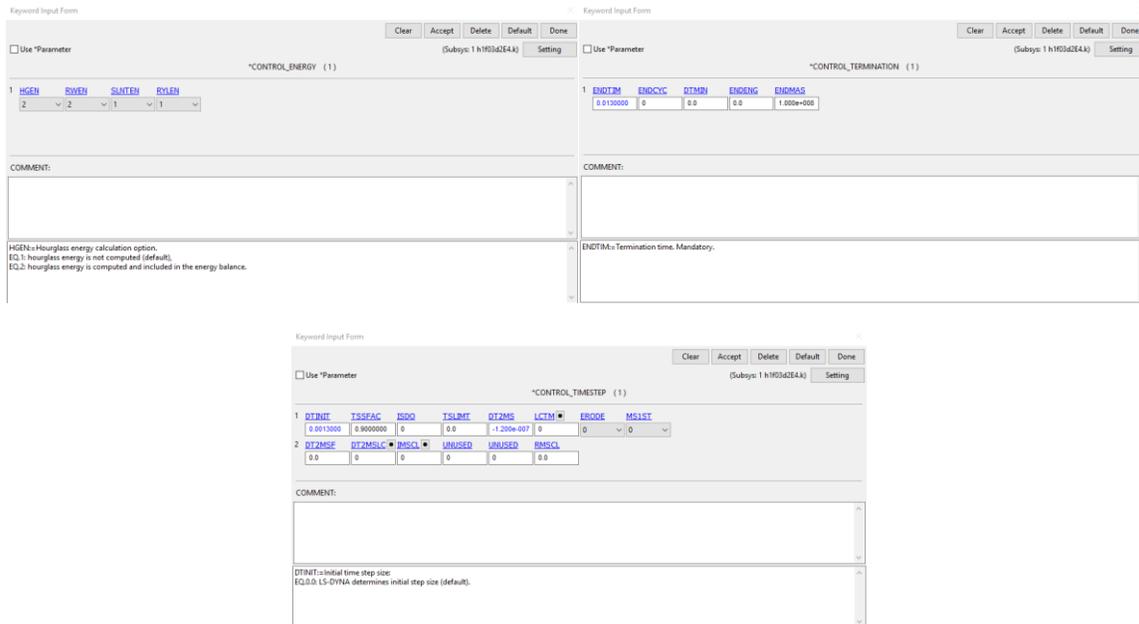


Figura 3.19. Asignación de propiedades de control en LS-DYNA®.

### 3.6.2 Database

La definición del comando DATABASE es opcional, pero es necesaria para obtener archivos que contienen la información de los resultados. El orden de asignación de los subcomandos del comando DATABASE es completamente arbitrario.

LS-DYNA® no crea una base de datos ASCII, a menos que se especifiquen las opciones de comandos de ASCII. Se asigna un valor de intervalo de tiempo entre salidas de 0.002 segundos a los comandos de salida: GLSTAT, MATSUM, RBDOUT y RCFORC.

El comando DATABASE\_BINARY\_D3PLOT muestra resultados generales del modelo completo.

El comando DATABASE\_BINARY\_D3THDT contiene el historial de tiempo de elementos y nodos, este comando no considera la geometría del modelo.

El comando DATABASE\_EXTEND\_BINARY controla contenido de extensión de salidas de resultados específicas. Este comando genera una base de datos binaria a los comandos D3PLOT, D3THDT, y D3PART. En el caso de la base de datos D3PART, las variables usadas en D3PART sobrescriben las opciones correspondientes a la opción binaria.

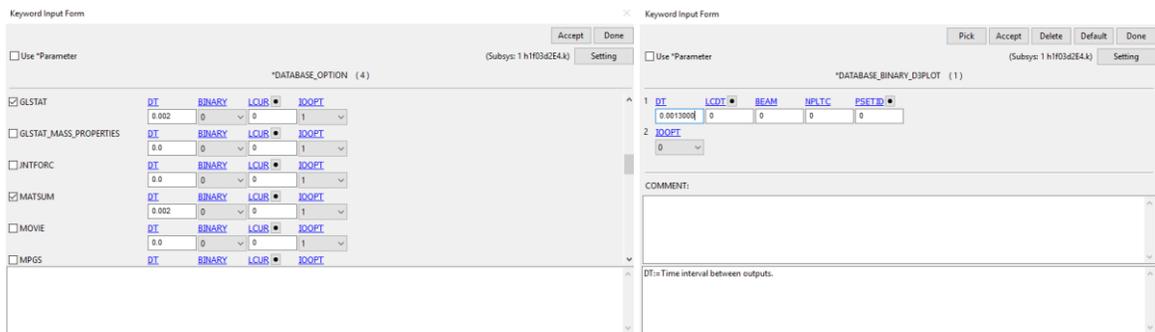


Figura 3.20. Asignación de comandos de archivos de salida de resultados DATABASE\_ASCII y DATABASE\_BINARY\_D3PLOT en LS-DYNA®.

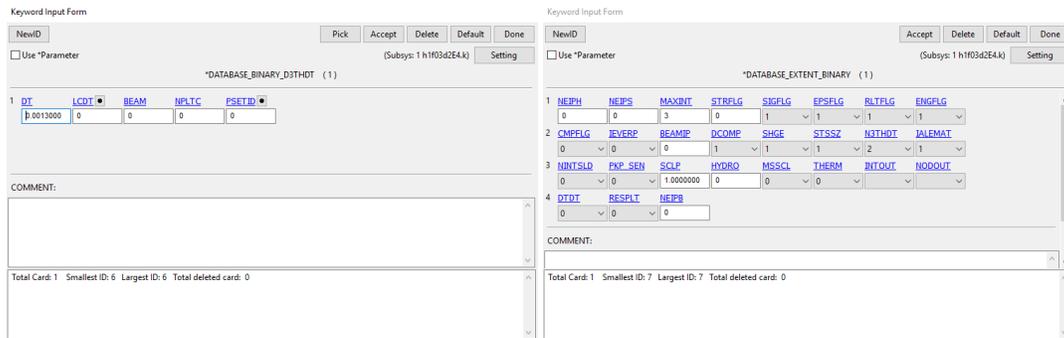


Figura 3.21. Asignación de comandos de archivos de salida de resultados DATABASE\_BINARY\_D3THDT y DATABASE\_EXTENT\_BINARY en LS-DYNA®.

### 3.6.3 Generación de solución por FEM.

La entrada del solucionador LS-DYNA® es un archivo ASCII, que se abre desde el gestor del programa, llamando el archivo .K (Archivo tipo Keyword) para generar la solución. De manera similar se puede generar la solución en el software de análisis de elemento finito ANSYS®; donde se selecciona un ambiente de solución LS-DYNA®, con una licencia precargada de

ANSYS® LS-DYNA®, con un tipo de análisis típico de LS-DYNA®, seleccionando el archivo .K desde el directorio que se encuentra.

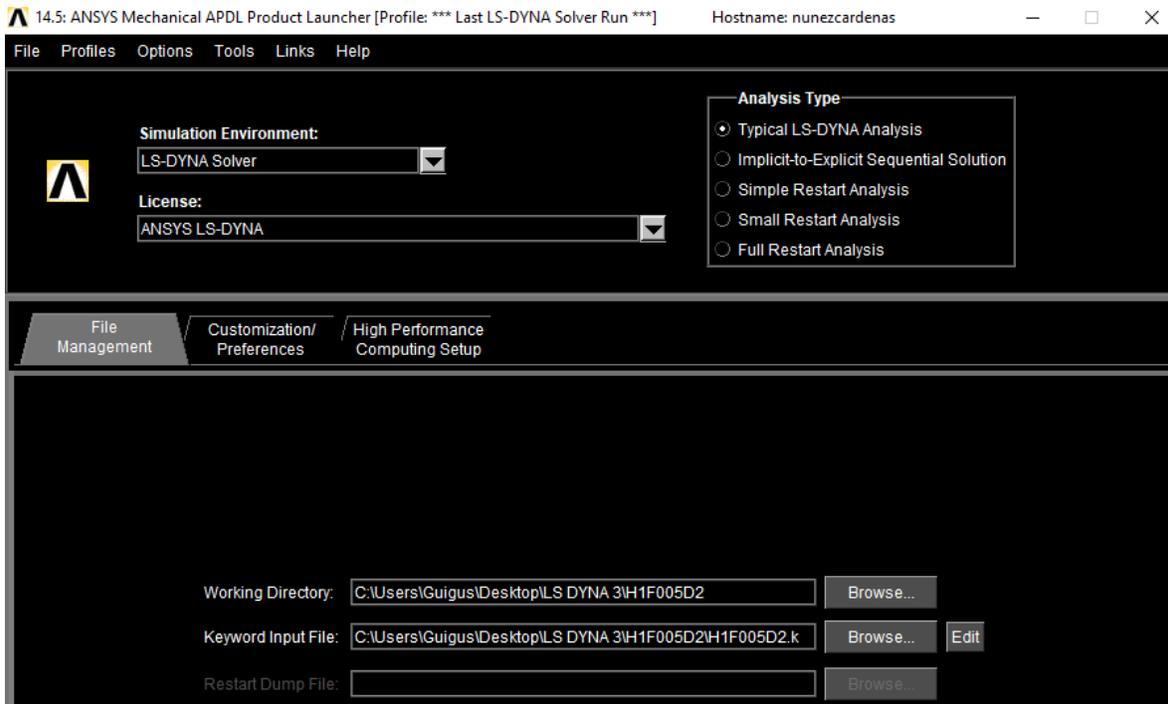


Figura 3.22. Generación de la solución del FEM con ANSYS®.

Después de ejecutar el solucionador de elemento finitos ANSYS®, se generan archivos de salida, como imágenes, gráficas, tablas de datos, donde se pueden calcular, desplazamientos, deformaciones, esfuerzos, cargas, reacciones, etc. Todos estos datos de resultados se mostrarán y analizarán en el siguiente capítulo.

Name	Date modified	Type	Size
adptmp	09/08/2017 05:31 ...	File	14,419 KB
binout0000	09/08/2017 05:44 ...	File	49 KB
d3dump01.0000	09/08/2017 05:45 ...	0000 File	5,825 KB
d3dump01.0001	09/08/2017 05:45 ...	0001 File	5,047 KB
d3dump01.0002	09/08/2017 05:45 ...	0002 File	5,592 KB
d3dump01.0003	09/08/2017 05:45 ...	0003 File	5,192 KB
d3dump01.0004	09/08/2017 05:45 ...	0004 File	5,352 KB
d3dump01.0005	09/08/2017 05:45 ...	0005 File	5,330 KB
d3dump01.0006	09/08/2017 05:45 ...	0006 File	6,649 KB
d3full01	09/08/2017 05:45 ...	File	11,849 KB
d3hsp	09/08/2017 05:45 ...	File	12,714 KB
d3plot	09/08/2017 05:31 ...	File	2,996 KB
d3plot01	09/08/2017 05:45 ...	File	48,998 KB
d3plot02	09/08/2017 05:45 ...	File	4,456 KB
d3thdt	09/08/2017 05:45 ...	File	2,996 KB
glstat	09/08/2017 05:44 ...	File	8 KB
h1f03d2E4.k	09/08/2017 05:30 ...	K File	8,656 KB

Figura 3.23. Archivos generados por el solucionador de Elementos Finitos ANSYS®.

## 4 Análisis de resultados

En este capítulo se analizarán los resultados experimentales y los resultados de simulación numérica de LS-DYNA®. Se medirán las probetas obtenidas de las pruebas experimentales de compresión de anillo y se generará una serie de datos que se contrastaran con el estudio de simulación numérica para obtener un rango de coeficientes de fricción de cada caso.

Los datos de material de Acero AISI-SAE 1045 resultaron seriamente marcados por las probetas de anillo como se puede ver en la figura 4.1, aun así, se logró realizar completas cada una de las pruebas de compresión de anillo.



*Figura 4.1. Imagen de dados de Acero AISI-SAE 1045 dañados al final de las pruebas de compresión de anillo.*

### 4.1 Análisis estadístico de resultados de pruebas experimentales

A continuación, en la figura 4.2., se pueden ver las probetas de anillo resultantes de las pruebas experimentales de compresión de anillo, cabe señalar que, en esta etapa la probeta generó un tipo de cáscara de carbón en su superficie, generada por el cambio brusco de temperatura y la exposición del material al medio ambiente; esta cascarilla de carbón se quitó cuidadosamente para quitar imperfecciones superficiales y poder efectuar las mediciones correspondientes.



*Figura 4.2. Anillos después de la prueba de compresión experimental.*

Cabe señalar que las probetas obtenidas de las pruebas de compresión se midieron con un vernier digital de marca Mitutoyo®, generando 5 medidas en distintas posiciones por parámetro para posteriormente sacar un promedio y generar los rangos superiores e inferiores. En la figura 4.3 se puede ver una muestra de medición del diámetro interno y de la altura de la probeta de anillo.



*Figura 4.3. Medición de altura y diámetro interno de anillo con Vernier Digital Mitutoyo®.*

En las tablas 4.1 y 4.2, se observan las medidas finales superiores e inferiores obtenidas de los promedios de las 5 medidas obtenidas por parámetro de medición, obteniendo los correspondientes rangos de medida y calculando su porcentaje de variación.

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

*Tabla 4.1. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

*Tabla 4.2. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

*Figura 4.4. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

*Figura 4.5. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]*

## 4.2 Análisis estadístico de resultados de simulación por MEF

Al explorar los archivos resultantes de la solución de ANSYS® de la figura 3.23, se pueden obtener resultados estructurales mecánicos, como lo son los desplazamientos, deformaciones, velocidades, tasa de deformación, aceleraciones, tasas de velocidad, esfuerzos, etc. Se puede analizar un punto en específico, una superficie de área, una sección de volumen o el volumen completo del modelo. A continuación, se puede observar el comportamiento de desplazamiento en Z del modelo; denotando un desplazamiento máximo de -2.894 mm en la interfase de contacto anillo-dado superior (ver figura 4.6).

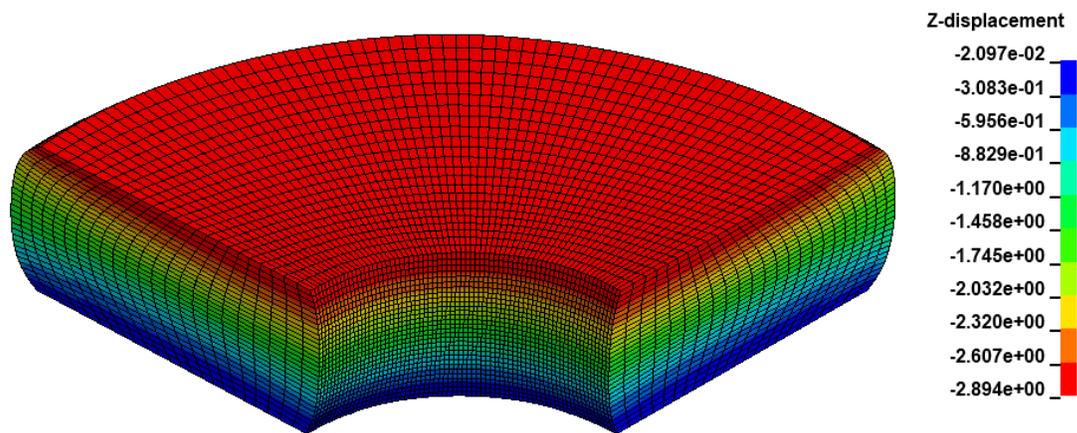


Figura 4.6. Resultados de desplazamiento en Z (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA®.

La velocidad máxima se puede observar en la interfase anillo-dado superior, siendo de esperarse, ya que se sabe que el dado superior genera una trayectoria de velocidad en la probeta para aprisionarla.

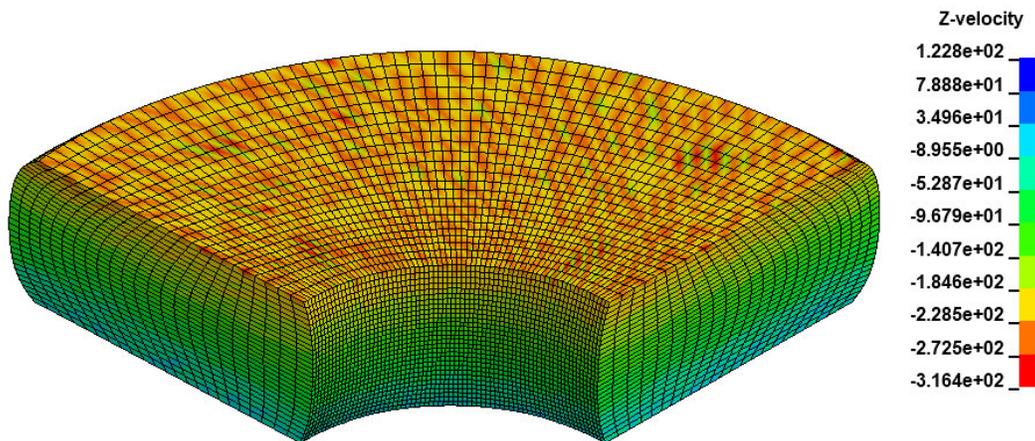


Figura 4.7. Resultados de velocidad en Z (mm/s) de modelo de anillo en LS-DYNA®.

La deformación plástica efectiva mayor de 0.9946 se presenta en la zona transversal central interior y en la zona superior externa, y la menor deformación de 0.4143 se presenta en la superficie de circunferencia superior muy cercana al vértice (ver figura 4.8).

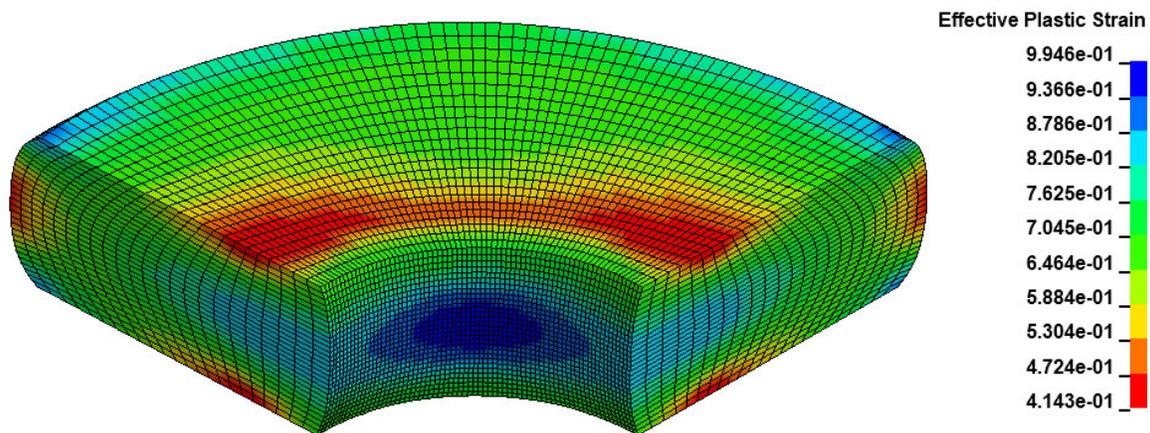


Figura 4.8. Resultados de deformación plástica efectiva de modelo de anillo en LS-DYNA®.

Los resultados de esfuerzos de Von Mises muestran su valor máximo de 187.79 MPa en la superficie circunferencial exterior media, en la zona superficial superior, cerca del vértice superior interno y en la superficie radial inferior cercana al vértice inferior interno, como se puede observar en la figura 4.9.

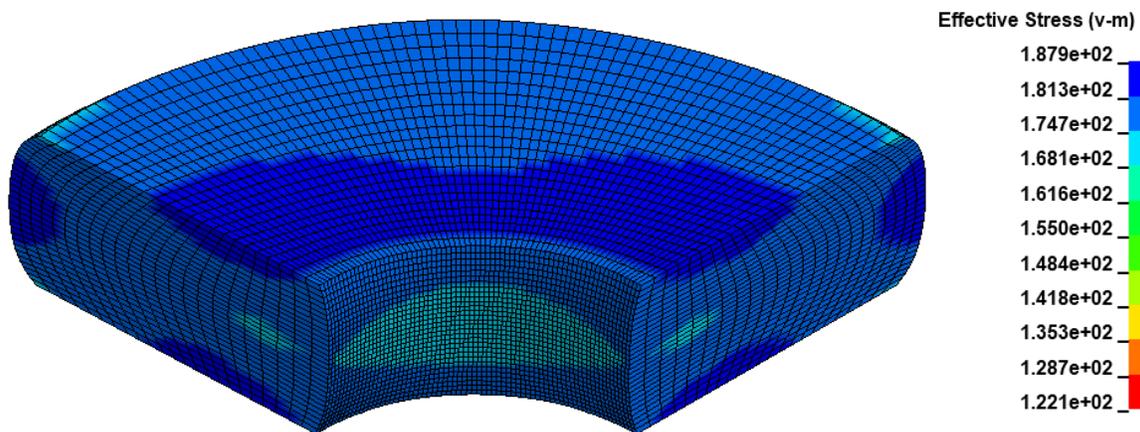


Figura 4.9. Resultados de esfuerzo efectivo de Von Mises (MPa) de modelo de anillo en LS-DYNA®.

Como se explicó en el estado del arte, la metodología de obtención del coeficiente de fricción por prueba de compresión de anillo involucra una relación de los parámetros del diámetro interno y la altura de la probeta en forma de anillo. Fue primordial en el análisis numérico computacional, especificar el nodo adecuado para obtener las correspondientes medidas

que me arroja el software mismo, como se puede ver en la figura 4.10, se toma un nodo interno medio y se hace un tratamiento de los datos que también proporciona LS-PrePost.

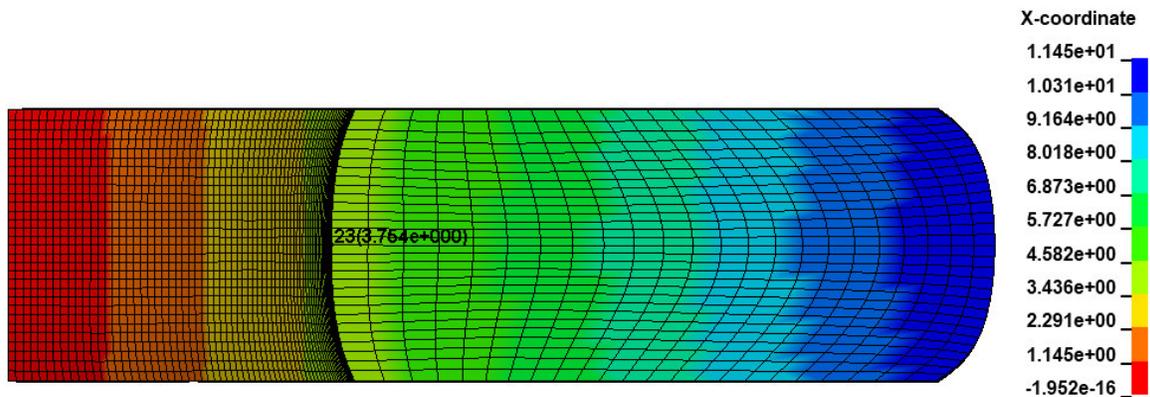


Figura 4.10. Análisis nodal de desplazamiento de radio interno (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA®.

Para obtener las alturas adecuadas, se tomó un nodo de la superficie superior del modelo, a sabiendas que esta superficie es la que tiene el desplazamiento máximo, y por tanto, también sus nodos, como se puede ver en la figura 4.11, se pueden obtener los desplazamientos de cualquier nodo en cualquiera de sus direcciones coordenadas cartesianas.

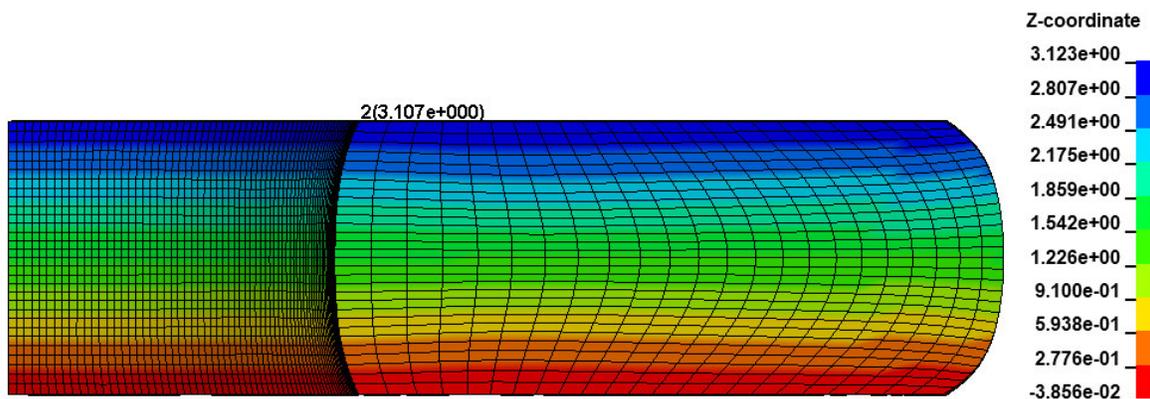


Figura 4.11. Análisis nodal de reducción de altura (mm) de modelo de anillo en LS-DYNA®.

El software LS-PrePost de LS-DYNA®, permite obtener hojas de cálculo con datos de posición, que para el presente proyecto son valiosos, ya que se puede obtener el comportamiento de posicionamiento de cualquier punto de la probeta en cualquier instante de tiempo, y de esta manera generar cada una de las curvas de calibración de fricción; en la figura 4.12 se

encuentra el análisis de la curva de calibración correspondiente a un coeficiente de fricción de 0.4, en particular, con las matrices de compresión de material de Acero para herramienta D2.

x	y	Columna1
0	6	9
0.001299996	5.729275227	8.77682972
0.002599992	5.437781334	8.48058796
0.003899988	5.146308899	8.18272018
0.005199984	4.855062008	7.88490725
0.00649998	4.564282417	7.57015181
0.007799976	4.273030281	7.23991871
0.009099972	3.981741428	6.90178919
0.010399967	3.68987298	6.55354881
0.011699963	3.398437262	6.19035912
0.012999959	3.106899977	5.77399254
0.013000067	3.106875897	5.77395344

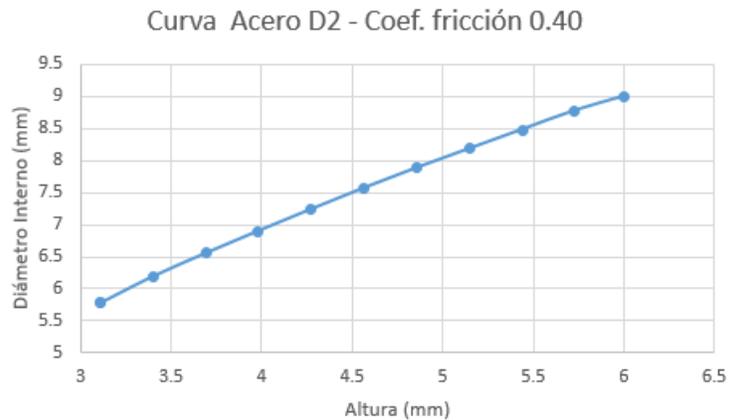


Figura 4.12. Tratamiento de resultados numéricos para generar las curvas de calibración en LS-DYNA®.

En la figura 4.13 se observa la serie de curvas de calibración de fricción, que permitirá predecir los índices de fricción de las pruebas experimentales de compresión de anillo; el eje coordinado de las abscisas contiene los valores de altura de la probeta en milímetros versus el eje coordinado de ordenadas que contiene los valores del diámetro interno en milímetros. Cada una de las curvas de calibración de fricción es identificada con una gama de colores referido a su respectivo valor de coeficiente de fricción en particular de unidades adimensionales. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

[La figura 4.13 se encuentra a resguardo en el reporte interno de la academia del posgrado de Ingeniería Mecánica]

Figura 4.13. Curvas de calibración de fricción en LS-DYNA®.

### 4.3 Análisis y validación de resultados.

Según el grupo de trabajo Aeroespacial de LS-DYNA® [71], los controles de energía se deben llevar a cabo como parte del proceso de post-procesamiento. La suma de energías del modelo debe ser igual a la suma de las energías iniciales según la ecuación:

$$E_K + E_I + E_S + E_H + E_{rw} + E_{damp} = E_K^0 + E_I^0 + W_{Ext} \quad (4.1)$$

Donde  $E_K$  es la energía cinética,  $E_I$  es la energía interna,  $E_S$  es la energía de deslizamiento en la interfase (contacto),  $E_H$  es la energía de hourglass,  $E_T$  es la energía total,  $E_{rw}$  es la energía de pared rígida,  $E_{damp}$  es la energía de amortiguamiento,  $E_K^0$  es la energía cinética inicial,  $E_I^0$  es la energía interna inicial y  $W_{Ext}$  es el trabajo externo. La energía total es la suma de las energías:

$$E_T = E_K + E_I + E_S + E_H + E_{rw} + E_{damp} \quad (4.2)$$

Para que los resultados del presente trabajo tengan cierta certidumbre, se validaron a través del análisis de cumplimiento de energías y sus relaciones respectivas como se puede ver en la tabla 4.3 que se muestra a continuación. [71]

Tabla 4.3. Validación del modelo numérico a través del análisis de sus energías. [71]

<b>Validación del modelo numérico a través del análisis de energías</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Límite aceptable</b>
Relación de energía	>0.9 y <1.1
Max. Relación de energía de deslizamiento (energía de deslizamiento/energía total)	<0.1
Max. Relación de energía cinética (energía cinética/energía total)	<1.0
Max. Relación de energía interna (energía interna/energía total)	<1.0
Max. Relación de energía de Hourglass (energía de Hourglass/energía total)	<0.1

La relación de energía es la relación de la energía total con la energía total inicial y el trabajo externo. El balance de energía es perfecto si la relación es igual a 1.

$$ER = \frac{E_T}{E_I^0 + E_K^0 + W_{Ext}} \quad (4.3)$$

Sí la energía total  $E_T$  se eleva por encima del lado derecho de la ecuación anterior, la energía se estaría induciendo artificialmente, por ejemplo, por inestabilidad numérica o por la detección repentina de penetración a través de la superficie de contacto. La última condición se presenta a menudo por saltos repentinos en la energía total. Si el lado izquierdo de la

ecuación cae por debajo del lado derecho, significa que la energía está siendo absorbida artificialmente, tal vez por un exceso de hourglass o por paredes rígidas o un contacto excesivo entre superficies.

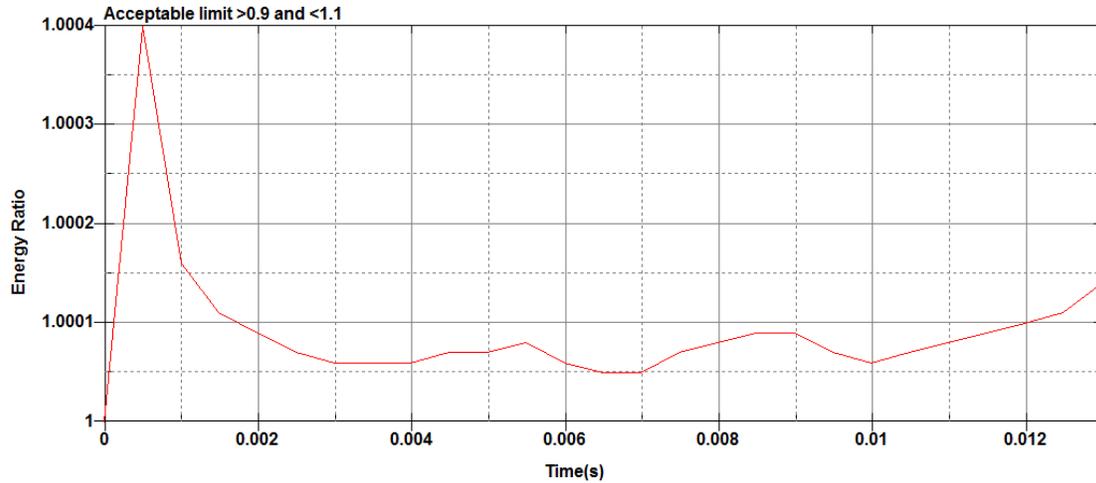


Figura 4.14. Curva de validación de Relación de Energía en LS-DYNA®.

La energía de deslizamiento es el trabajo hecho por las interfases de deslizamiento, y es la suma de la energía del elemento esclavo, energía del elemento maestro, y energía por fricción, donde la energía del elemento esclavo y maestro son asociadas con la energía de deslizamiento de las partes esclavas y maestras del modelo durante el impacto. La energía de deslizamiento es positiva cuando la fricción entre las superficies está definida. Una energía de contacto negativo a veces es generada cuando las partes se deslizan relativamente respecto de otra. Cuando un nodo deslizante penetra desde su segmento maestro a un segmento maestro adyacente, aunque estén desconectados, la penetración es inmediata al ser detectado, produciendo una energía de contacto negativa.

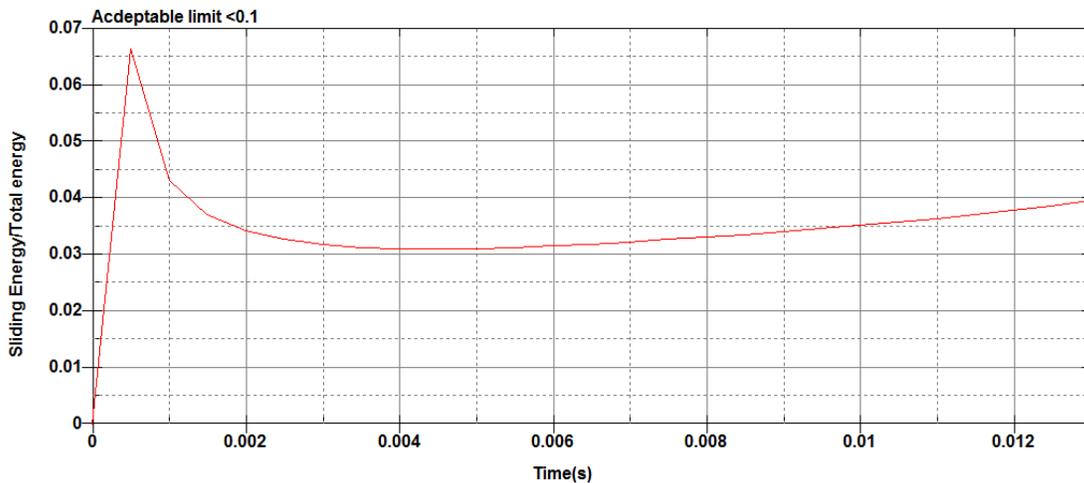


Figura 4.15. Curva de validación de Relación de Energía de Deslizamiento en LS-DYNA®.

La energía cinética es el trabajo hecho debido al movimiento de los nodos o elementos con cierta velocidad

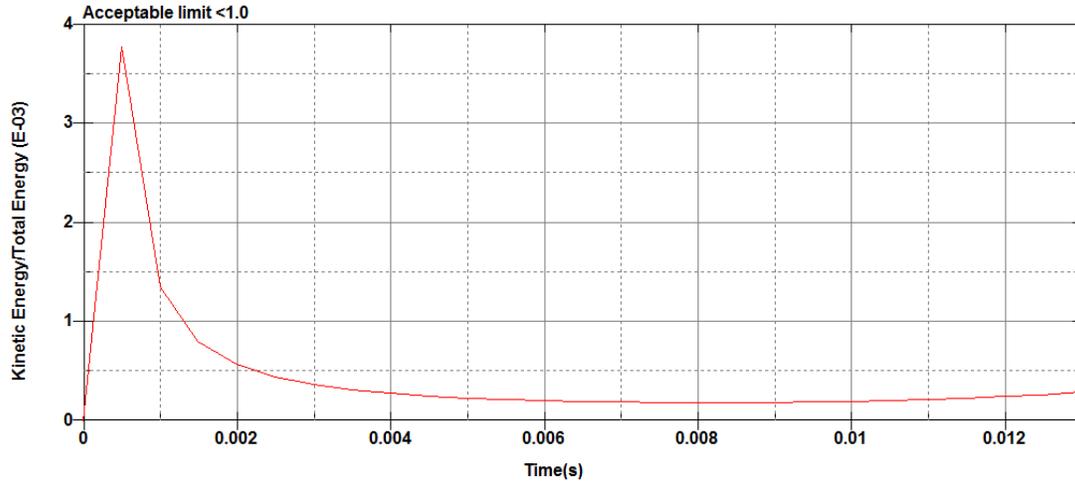


Figura 4.16. Curva de validación de Relación de Energía Cinética en LS-DYNA®.

La energía interna está asociada con la energía de deformación elástica y el trabajo hecho en deformación permanente.

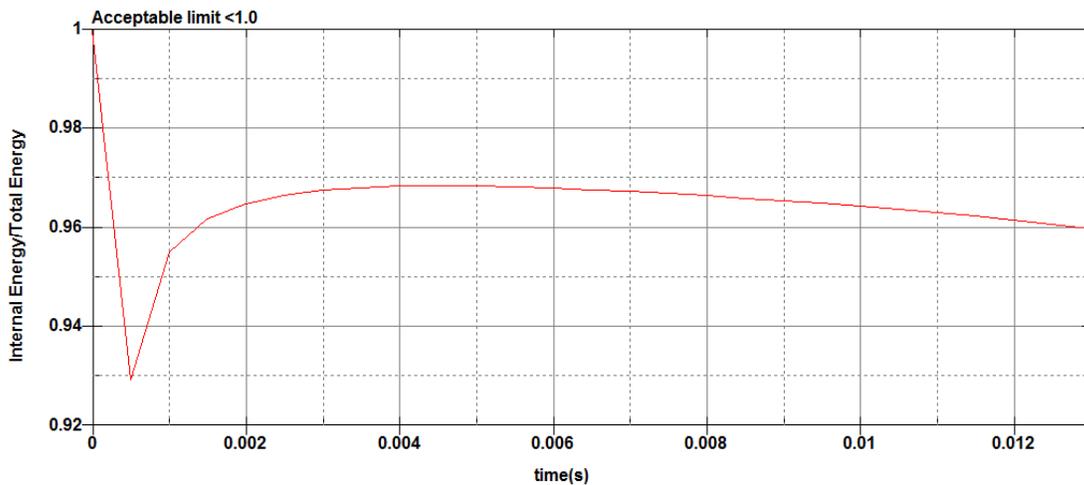


Figura 4.17. Curva de validación de Relación de Energía Interna en LS-DYNA®.

La energía de hourglass utiliza elementos de bajo nivel de integración para aumentar la eficiencia y precisión computacional. Sin embargo, en ciertos problemas, los modos de deformación pueden resultar asociados con los modos de energía cero de deformación y esfuerzo. Para combatir este problema, las técnicas de estabilización de hourglass pueden

ser requeridas. LS-DYNA proporciona varias opciones de control de hourglass y la energía asociada con estas técnicas de estabilización se pueden calcular. La energía de hourglass no se percibe físicamente, ya que esta es relativamente pequeña en comparación con la energía interna máxima para cada parte del modelo.

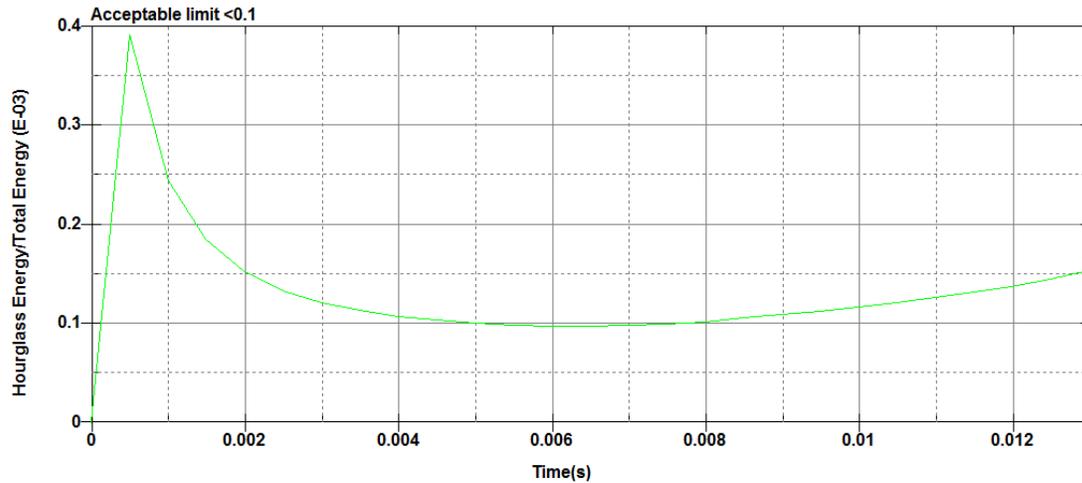


Figura 4.18. Curva de validación de Relación de Energía de Hourglass en LS-DYNA®.

Finalmente se transponen los resultados experimentales dentro del gráfico de curvas de calibración obtenido por el Método de Elemento Finito como se muestra en la figura 4.19

**[La figura 4.19 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por ser información confidencial]**

Figura 4.19. Presentación de resultados en curva de calibración de fricción. (Ver Anexo 1 para ver en tamaño más amplio)

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

Tabla 4.4. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

[los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]

Tabla 4.5. [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales]



## Conclusiones

- Se logró simular el proceso de compresión a alta temperatura del material titular comprimido por medio de datos de diferentes materiales por medio de FEM y se obtuvieron datos de los valores de fricción para los diferentes casos por medio de la prueba del anillo.
- Se fabricaron e hicieron pruebas experimentales de prueba de anillo para diferentes materiales por medio de la prensa de 100 t que se tiene en el Laboratorio de Manufactura de DICIS.
- Se compararon los valores obtenidos teórica (FEM) y experimentalmente obteniéndose valores aceptables.
  
- En la prueba de compresión de anillo con dados de Acero AISI-SAE 1045 se presenta un coeficiente de fricción en un rango de 0.128 a 0.185, con una variación máxima de 27.03 % en una de sus réplicas;
  
- en la prueba de compresión con dados de acero para herramienta D2 se observa un coeficiente de fricción de 0.13 a 0.169, con una variación máxima de 12.08 %, por lo cual,
  
- se puede decir que las pruebas con los dados de acero D2 son más consistentes y en consecuencia existieron algunos errores de precisión en algunos parámetros de calibración de la prueba.
  
- La variación superior con los dados de Acero 1045 se debe a la notable deformación de estos (ver figura 4.4), por la diferencia de propiedades mecánicas con la probeta de anillo, indicando que este es más rígido que el material de los dados de Acero 1045.

De acuerdo con lo observado durante el proceso de pruebas de compresión de anillo, los principales parámetros que influyeron en la variación de resultados fueron:

- La formación de cascarilla de carbón en la superficie de la probeta de anillo, la cual se forma debido al gradiente de temperatura elevado, al extraer las probetas de anillo a 1200 °C del interior del horno y exponerlas súbitamente a la temperatura del medio ambiente; las irregularidades dimensionales, dificultó la toma de mediciones de las probetas de anillo.

- La calibración de los topes de desplazamiento de la prensa hidráulica, ya que las alturas definidas de [los datos específicos son confidenciales y se encuentran en reportes a la empresa y en las tesis de los sinodales] no se pudieron obtener, afectando la repetibilidad de las pruebas experimentales, aunque esto no es justificante para descartar los resultados obtenidos, ya que las curvas de calibración son adecuadas para cualquier altura.
- Existieron algunos otros parámetros que pudieron afectar los resultados, como lo es el acabado superficial de las probetas y los dados, la correcta calibración de la temperatura, la aplicación adecuada del lubricante de grafito o el desgaste de los herramientas después de cada prueba, pero se consideran menores.

## Trabajo futuro

- se propone reemplazar los dados por unos del material de las matrices que se usa en el forjado de cigüeñales, así como ajustar las tasas de deformación reales de compresión, ya que la prensa actual se encuentra limitada en ese aspecto.
- Para disminuir la variación resultados, se propone diseñar una cámara de vacío o el uso de gases inertes para evitar la formación de la cascarilla de carbón en la probeta;
- mejorar el control de desplazamiento y velocidad de la prensa hidráulica disponible YL32-100 o la adquisición de una que contenga los parámetros técnicos que requiere la prueba de compresión.
- Respecto a la obtención de las curvas de flujo, también se contribuyó, gestionando la compra de piezas cilíndricas de cuarzo para usarse como dados y evitar el indeseable abarillamiento en la probeta de prueba;

- se propuso un diseño de sujeción de los dados cilíndricos de cuarzo (ver apéndice 2), considerando los herramientas que ya se tenían, para modificarlos, ahorrando costes y tiempo.

## Bibliografía

- [1] P. Mayen, «Asociación Mexicana de la Industria Automotriz A. C. (AMIA),» 2011. [En línea]. Available: <http://www.amia.com.mx/index.html>. [Último acceso: 2017].
- [2] G. Bergquist, «International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA),» 2017. [En línea]. Available: <http://www.oica.net/>. [Último acceso: 2017].
- [3] G. d. I. E. U. Mexicanos, «Pro México: Inversión y Comercio,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/promexico>. [Último acceso: 2017].
- [4] J. A. Schey, *Metal Deformation Process: Friction and Lubrication*, New York: Marcel Dekker Inc., 1970.
- [5] Schuler, *Metal Forming Handbook*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [6] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna (Materiales, procesos y sistemas)*, New York: Mc Graw Hill Interamericana, 3ra. ed. , 2007.
- [7] S. R. S. S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Estado de México, México: Pearson Education, 5ta. ed., 2008.
- [8] D. Velázquez, *Artist, La fragua de Vulcano*. [Art]. Museo del Prado, Madrid, España, 1630.
- [9] I. B. S. Martin, «La forja moderna en Maragateria,» *Tierras de León*, vol. Instituto Leonés de Cultura.
- [10] G. N. G. S. Taylan Altan, *Cold and hot forging: Fundamentals and applications*, Ohio, USA: ASM International, 1ra. ed. , 2005.
- [11] D. d. I. Mecánica, «Grupo de fabricación de alto rendimiento,» Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea, [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/manufacturing/cadocencia-segundo-tecnologias.php>.
- [12] P. A. Cabillas del Caz, *Estudio y análisis numérico 3D del proceso de aplanado de cables por laminación*, Sevilla, España: Universidad de Sevilla, 2004.
- [13] T. A. K. V. L. P. Boisse, *Flow Stress in forming and cutting*, Virginia, USA: Penton Science, 1ra. ed., 2001.
- [14] D. S. P. J. A. L. Z. Q. L. L. X. Li, «An experiment study of the lubrication behavior of graphite in hot compression test of Ti-6Al-4V alloy,» *Journal of materials processing technology* , vol. 112, pp. 1-5, 2001.
- [15] K. S. Nachtman E. S., *Lubricants and lubrication in metalworking operations*, New York: Marcel Dekker, 1985.

- [16] B. Avitzur, «Forging of hollow disk,» *Israel Journal of technology*, vol. 2, nº 3, p. 295, 1964.
- [17] a. J. W. Hawkyard J. B., «An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during compression,» *International J. of Mechanical Sciences*, vol. 9, p. 163, 1967.
- [18] a. B. W. A. Van Rooyen G. T., «A study of Interface friction in plastic compression,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 8, p. 761, 1966.
- [19] P. M. B. a. L. F. F., «Friction and Lubrication at extreme pressures,» *American Society of Mechanical Engineers*, p. 39, 1966.
- [20] K. Y. a. Y. K., «Friction and lubrication in the deformation processing of metals,» *JSME Semi - International Symposium. Tokio.*, 1967..
- [21] F. S. B. Avitzur, «Limit analysis of hollow disk forging,» *The american society of mechanical engineers*, vol. 100, nº 77, pp. 304-344, 1977.
- [22] V. D. Alan T. Male, «The validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test,» *Journal of lubrication technology*, p. 389, 1970.
- [23] K. M., «On plastic deformation of hollow cylinders under axial compressive loading,» (*en Japonés*), *Journal of Scientific Research Institute*, vol. 2, nº 30, 1954.
- [24] a. C. M. G. Male A. T., «A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation,» *Journal of the Institute of Metals*, vol. 93, p. 38, 1964-65.
- [25] K. H., «An analysis of plastic compressive deformation of lamella between rough plates by energy method,» *Proceeding of the 5th Japan National Congress for Applied Mechanics*, p. 75, 1955.
- [26] B. M., «Investigation of friction values for metal-forming processes by ring compression method,» (*en Aleman*) *Industrie-Anzeiger*, vol. 89, p. 799, 1967.
- [27] A. B., «Bulge in hollow disk forging,» *Technical report, AFML=TR-69-261*, 1969.
- [28] G. M. DePierre V., «Mathematical Calibration of the ring test with bulge formulation,» *Technical Report, AFML=TR=72-37*, 1972.
- [29] L. C. H. a. Altan, «Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders,» *Journal of Engineering Industry, Trans. ASME, Series B*, vol. 94, nº 3, p. 775, 1972.
- [30] L. J. Y., «An analysis of deformation characteristics and interfacial friction condition in simple upsetting of rings,» *Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Serie B*, vol. 94, nº 4, p. 1149, 1972.

- [31] L. G. D. a. K. S., «On Hill's General Method of Analysis for metalworking processes,» *Institute International Journal of Mechanical Science*, vol. 16, p. 521, 1974.
- [32] M. S. Y. H. R. Yamada, «Application of finite element method to ring compression test,» *Nuclear Engineering and design*, nº 44, pp. 75-85, 1977.
- [33] P. H. I. P. D. P. N. T. Rudkins, «Friction modelling and experimental observations in hot ring compression test,» *Journal of Materials Processing Technology*, nº 60, pp. 349-353, 1996.
- [34] C. E. N. S. P. H. a. I. P. G. W. Rowe, *Finite Element plasticity and metal forming analysis*, Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [35] A. A. M. H. S. D. Shahriari, «Study on hot ring compression test of Nimonic 115 Superalloy using experimental observations and 3D FEM simulation,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 19, nº 5, pp. 633-642, 2010.
- [36] W. Z. X. M. Q. T. Z. L. X. L. Y. Zhu, «Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM,» *Tribology International*, nº 44, pp. 2074-2080, 2011.
- [37] J. R. Douglas y T. Altan, «Flow stress determination for metals at forging rates and temperatures,» *ASME*, pp. 66 - 76, 1975.
- [38] T. Altan, S. Oh y H. Gegel, *Metal Forming Fundamentals and Applications*, American Society for Metals, 1983.
- [39] K. J. W. a. J. M. S. L. R. Sanchez, «A friction test for extrusion based on combined forward and backward flow,» *Proc. the 13th North American Manufacturing Research Conference*, pp. 110-117, May 1985.
- [40] M. S. T. A. Timothy Schrader, «A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants,» *ERC for Net Shape Manufacturing*, 1990.
- [41] R. Geiger, «Metal flow in combined cup extrusion,» de *Reports from the Institute for Forming Technology of the University Stuttgart*, Girardet, Essen, Germany, p. 36.
- [42] J. Y. L. T. A. N. B. M. I. Ghobrial, «Factors affecting the double cup extrusion test for avaluation of friction in cold and warm forging,» *Annals of the CIRP*, vol. XLII, nº 1, pp. 347-352, 1993.
- [43] R. Ebrahimi y A. Najafizadeh, «A new method for evaluation of friction in bulk metal forming,» *Material Processing Technology*, vol. 152, pp. 136-143, 2004.
- [44] S. Solhjoo, «A note on "Barrel compression test": A method for evaluation of friction,» *Computational Materials Science*, vol. 49, pp. 435-438, 2010.

- [45] Z. Yao, D. Mei, H. Shen y Z. Chen, «A friction evaluation method based on barrel compression test,» *Springer Science*, vol. 51, pp. 525-535, 2013.
- [46] N. A. Abdul, «Friction Determination During Bulk Plastic Deformation of Metals,» *Annals of the CIRP*, vol. 30, nº 1, 1981.
- [47] A. M. a. V. D. G. Saul, «A new method for the determination of material flow stress values under metalworking conditions,» *Metal forming: Interrelation between theory and practice*, vol. 293, 1971.
- [48] F. Wang y J. G. Lenard, «An Experimental Study of Interfacial Friction - Hot Ring Compression,» *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 114, pp. 13-18, 1992.
- [49] S. Hasan y R. Jahan, «On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test,» *Tribology International*, vol. 32, pp. 327-335, 1999.
- [50] T. T. Robinson, H. Ou y C. G. Armstrong, «Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation,» *Journal of Material Processing Technology*, Vols. %1 de %2153-154, pp. 54-59, 2004.
- [51] K. M. Kulkarni y S. Kalpakjian, «A study of barreling as an example of free Deformation in plastic working,» *Journal of Engineering for Industry*, pp. 743-754, 1969.
- [52] V. DePierre y F. Gurney, «A method for determination of constant and varying friction factors during ring compression tests,» *Journal of Lubrication Technology*, pp. 482-487, 1974.
- [53] X. Tan, P. A. F. Martins, N. Bay y W. Zhang, «Friction studies at different normal pressures with alternative ring-compression tests,» *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. %1 de %280-81, pp. 292-297, 1998.
- [54] G. L. T. A. V. Nagpal, «A numerical method for simultaneous prediction of metal flow and temperatures in upset forging of rings,» *Journal of Engineering for Industry*, vol. 100, pp. 413-420, 1978.
- [55] H. Cho y T. Altan, «Determination of flow stress and interface friction at elevated temperatures by inverse analysis technique,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, pp. 64-70, 2005.
- [56] S. Kobayashi, «Deformation characteristics and ductile fracture of 1040 steel in simple upsetting of solid cylinders and rings,» *Journal of engineering for industry*, pp. 391-398, 1970.
- [57] F. Travis, «The inhomogeneous deformation of hollow cylinders subjected to static and dynamic axial compression,» *The International Journal of Production Research*, vol. 8, nº 2, 1970.
- [58] R. E. Dutton, V. Seetharaman, R. L. Goetz y S. L. Semiatin, «Effect of flow softening on ring test calibration curves,» *Materials Science and Engineering*, vol. A270, pp. 249-253, 1999.

- [59] F. Fereshteh-Saniee, I. Pillinger y P. Hartley, «Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes,» *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. %1 de %2153-154, pp. 151-156, 2004.
- [60] K. P. Rao y K. Sivaram, «A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 37, pp. 295-318, 1993.
- [61] D. d. I. Mecánica, Forja moderna de cigüeñales con aceros especiales para motores de alto rendimiento. Etapa II, Salamanca: UG, diciembre, 2016.
- [62] P. H. Hansen, N. Bay y P. Christensen, «Analysis of the ring compression test using a general friction model and the upper bound elemental technique,» *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 41-47, 1988.
- [63] A. SISA, «<http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20D2.pdf>,» Servicio Industrial S. A. de C. V. . [En línea].
- [64] SUMITEC, «<http://www.deinoxidable.mx/AISI%201045.pdf>,» Suministros Tecnicos S. A. . [En línea].
- [65] D. B. Gladman, LS-DYNA: Theory Manual, Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2017.
- [66] T. Hughes, R. Taylor, J. Sackman, A. Curnier y W. Kanoknukulchai, «A Finite Element Method for a Class of Contact-Impact Problems,» *J. Comp. Meths. Appl. Mechs. Eng.* , vol. 8, pp. 249-276, 1976.
- [67] J. Hallquist, «A Procedure for the Solution of Finite Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method,» Rept. UCRL-52066, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 1976.
- [68] D. e. a. Burton, «Physics and numerics of the Tensor Code,» Internal Document UCID-19428, Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.
- [69] M. Wilkins, «Calculations of Elastic Plastic Flow,» *Meth. Comp. Phys. (Academic Press)*, vol. 3, pp. 211-263, 1964.
- [70] J. Hallquist, «A Numerical Treatment of Sliding Interfaces and Impact,» de *Computational Techniques for Interface Problems*, New York, K. C. Park and D. K. Gartling, 1978, p. 30.
- [71] L. S. T. Corporation, LS-DYNA: Keyword User's Manual, Livermore California 94551-0712: Volumen I, 2017.
- [72] L.-D. A. W. Group, Modeling Guidelines Document, Livermore, California: Version 16-2, 2016.

[El apéndice 1 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por se información confidencial]

Apéndice 1: Dispersión de resultados en Curvas de Calibración

[El apéndice 2 se encuentra en un reporte interno del Departamento de Ingeniería Mecánica por se información confidencial]

Apéndice 2: Ensamble porta dados de cuarzo (vista explosionada)