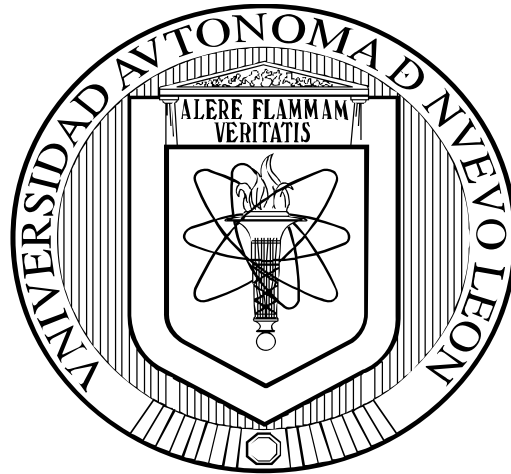


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**RELACIÓN DEL FLUJO PREFERENCIAL DEL GRANO CON LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS EN DISCOS FORJADOS DE UN
ACERO TIPO AISI 8630**

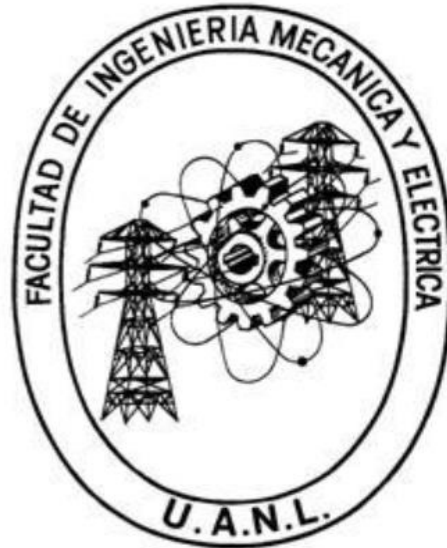
POR

ARTURO ISAI JUANGORENA LOZANO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDADES EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2016

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



TESIS

**RELACIÓN DEL FLUJO PREFERENCIAL DEL GRANO CON LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS EN DISCOS FORJADOS DE UN
ACERO TIPO AISI 8630**

POR

ARTURO ISAI JUANGORENA LOZANO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDADES EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de la tesis recomendamos que la tesis
“**RELACIÓN DEL FLUJO PREFERENCIAL DEL GRANO CON LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN DISCOS FORJADOS DE UN ACERO TIPO AISI 8630**” realizada por el alumno ARTURO ISAI JUANGORENA LOZANO, matricula 1282095, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidades en Materiales

El Comité de Tesis



Dra. Flor Esthela Palomar Pérez

Asesor



Dra. Martha P. Guerrero Mata

Coasesor



Dr. Diego E. Lozano de la Garza

Asesor Externo



Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L., Diciembre de 2016

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres quienes me dieron educación, apoyo y consejos, a mis hermanos y a mi novia quien siempre me alentó a continuar estudiando.

Para ellos es esta dedicatoria, por todo su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Este presente trabajo agradezco a mis padres, familiares y amigos que me brindaron apoyo moral para seguir estudiando y lograr el objetivo para un futuro mejor.

A FRISA por su apoyo económico, constante capacitación y asesoría.

A mis maestros, sinodales, compañeros de estudio y trabajo.

Agradezco a todos aquellos que me ayudaron directamente o indirectamente a la conclusión de esta tesis.

Muchas gracias.

RESUMEN

La anisotropía es la característica de los materiales en donde se aprecia un cambio en las propiedades dependiendo la orientación en la cual sean ensayados. Las forjas de acero al ser sometidas a un proceso de deformación exhiben este fenómeno y dependiendo los pasos de fabricación, las piezas tendrán diferentes flujos preferenciales por lo que tendrán diferentes propiedades para cierta orientación específica.

En esta tesis se examina como son afectadas las propiedades mecánicas en discos forjados de un acero tipo AISI 8630 al modificar el flujo de grano. De acuerdo con investigaciones sobre dicho fenómeno, los materiales deformados plásticamente presentan una anisotropía en donde el sentido paralelo a la deformación tiene los mejores resultados para ciertas propiedades.

Se produjeron una serie de discos modificando la orientación del grano, esto se logró aplicando distintas reducciones de deformación por compresión entre dos dados (*upsetting*) en un material previamente forjado en forma de barra.

Cada disco se examinó mecánica y micro estructuralmente en distintas posiciones por diversas técnicas de caracterización, como ensayo de tensión, impacto, dureza y estudios metalográficos.

Se realizaron una serie de simulaciones numéricas para predecir los flujos preferenciales del grano en las distintas zonas del disco.

El propósito de la investigación es conocer las variaciones que presenta el material debido a la anisotropía inducida por la deformación en caliente, identificando los flujos de grano y el grado de anisotropía para seleccionar de una mejor manera los pasos de forja.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE.....	vii
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	4
1.2 Hipótesis.....	4
CAPITULO 2 ANTECEDENTES.....	5
2.1 Anisotropía.....	5
2.1.1 Métodos para determinar texturas	8
2.1.2 Plasticidad en metales.....	9
2.1.3 Flujo de grano.....	10
2.1.4 Antecedentes de anisotropía	15
2.2 Efecto del proceso de forja en las propiedades mecánicas.....	18
2.3 Forjabilidad.....	19
2.4 Mecanismos de deformación a altas temperaturas	20
2.5 Operación de forjado como un sistema.....	22
2.6 Tipos de procesos de forja	25
2.7 Prensas para el proceso de forja.....	28
2.8 Fricción y lubricación en la interacción pieza/herramienta	32
2.9 Modelado numérico.....	35
2.9.1 Simulación por elemento finito.....	37
2.9.1.1 Información necesaria para la simulación	38
2.10 Acero AISI 8630	40
CAPITULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	44
3.1 Introducción.....	44
3.2 Diseño y desarrollo de discos.....	44

3.2.1 Material	45
3.2.2 Etapa de deformación.....	45
3.2.3 Tratamiento térmico	49
3.3 Extracción y preparación de probetas	50
3.3.1 Extracción de probetas para pruebas mecánicas	50
3.3.2 Pruebas químicas y microestructurales	53
3.4 Realización de ensayos.....	54
3.4.1 Pruebas mecánicas	54
3.4.2 Pruebas químicas y microestructurales	56
3.5 Modelado numérico	56
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1 Introducción.....	60
4.2 Ensayo de macroataque.....	60
4.3 Pruebas Mecánicas	64
4.3.1 Comparación anisotrópica por pieza.....	64
4.3.1.1 Disco número 1 (reducción de forja 1)	64
4.3.1.2 Disco número 2 (reducción de forja 1.25)	67
4.3.1.3 Disco número 3 (reducción de forja 1.5)	70
4.3.1.4 Disco número 4 (reducción de forja 2)	72
4.3.1.5 Disco número 5 (reducción de forja 3)	74
4.3.2 Comparación anisotrópica por posición	77
4.4 Simulación numérica	82
4.5 Comparación anisotrópica en posiciones adicionales	90
4.6 Análisis y caracterización de disco número 1	96
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
5.1 Conclusiones.....	103
5.2 Recomendaciones.....	105
Referencias bibliográficas	106
LISTA DE TABLAS	112
LISTA DE FIGURAS	114

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El término anisotropía, es la propiedad de la materia donde algunas propiedades físicas presentan una variación según la dirección del flujo preferencial del grano, en el caso de materiales deformados este fenómeno es conocido como anisotropía plástica.

Este flujo es una orientación direccional de los granos y cualquier inclusión que haya sido deformada durante la forja, los granos individuales son elongados en la dirección de la deformación plástica y es muy importante considerar que las inclusiones no metálicas y otras imperfecciones que provienen del proceso de fundición también son elongadas en la dirección del flujo de grano [1] [2].

Las propiedades longitudinales son generalmente mayores que las propiedades transversales tales como: elongación, contracción, esfuerzo de impacto y esfuerzo de fatiga. Otras propiedades se ven afectadas en menor grado como el esfuerzo de tensión y esfuerzo de cedencia. La diferencia entre las distintas direcciones incrementa con el aumento en cantidad de deformación en el material.

La razón fundamental de la diferencia en las propiedades se debe a que la grieta preferentemente se propaga a través del flujo de grano, en una probeta longitudinal, la grieta sería perpendicular al flujo y esta iría a través de

numerosas desviaciones en la muestra, cada una de estas desviaciones requiere más energía, haciendo al material más resistente a la fractura [1] [3].

Cuando una probeta se ensaya en los sentidos transversales, la grieta se propaga más fácilmente a lo largo de las inclusiones a través del flujo, requiriendo menos energía para la fractura [1].

Se debe tener claro que no todas las propiedades varían significativamente con la orientación del grano o no en la misma proporción. Las más afectadas son las relacionadas con la propagación de la grieta [1] [3].

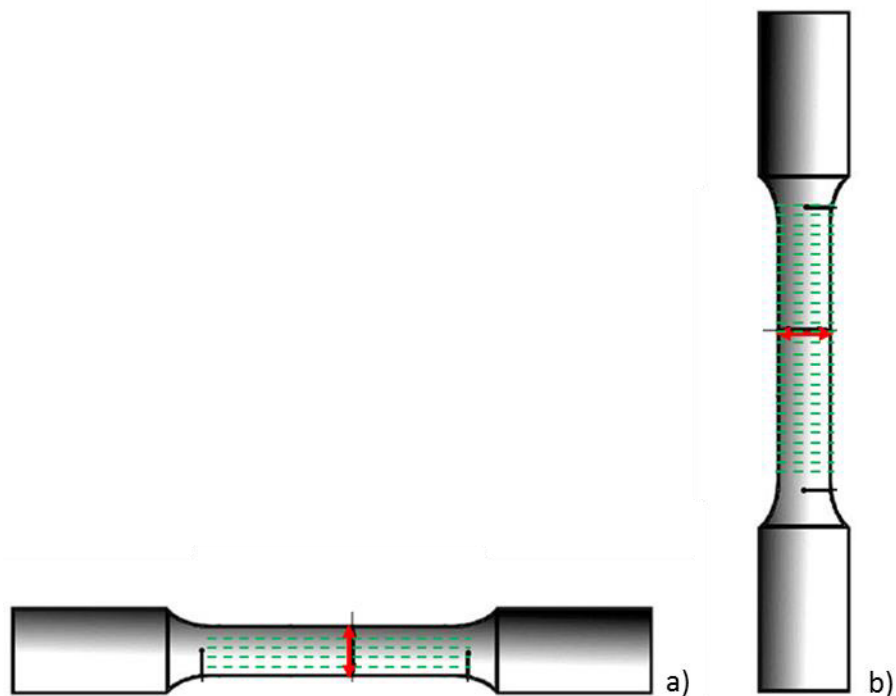


Figura 1.1. Ejemplo de flujo en una probeta de tensión, la flecha indica la propagación de la grieta a) longitudinal b) transversal.

Las figuras 1.2 y 1.3 muestran la deformación de un disco, donde el flujo en el eje axial-longitudinal es reducido por el *upsetting* y el metal es desplazado lateralmente en la dirección radial, disminuyendo las propiedades en el sentido axial y aumentando en el sentido radial proporcionalmente [3].

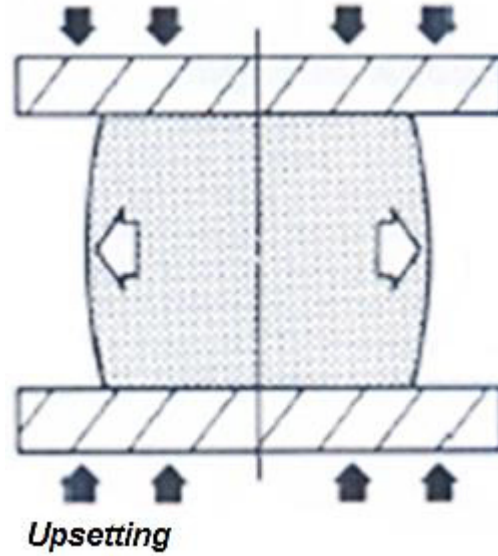


Figura 1.2. Dirección de material desplazado [3].

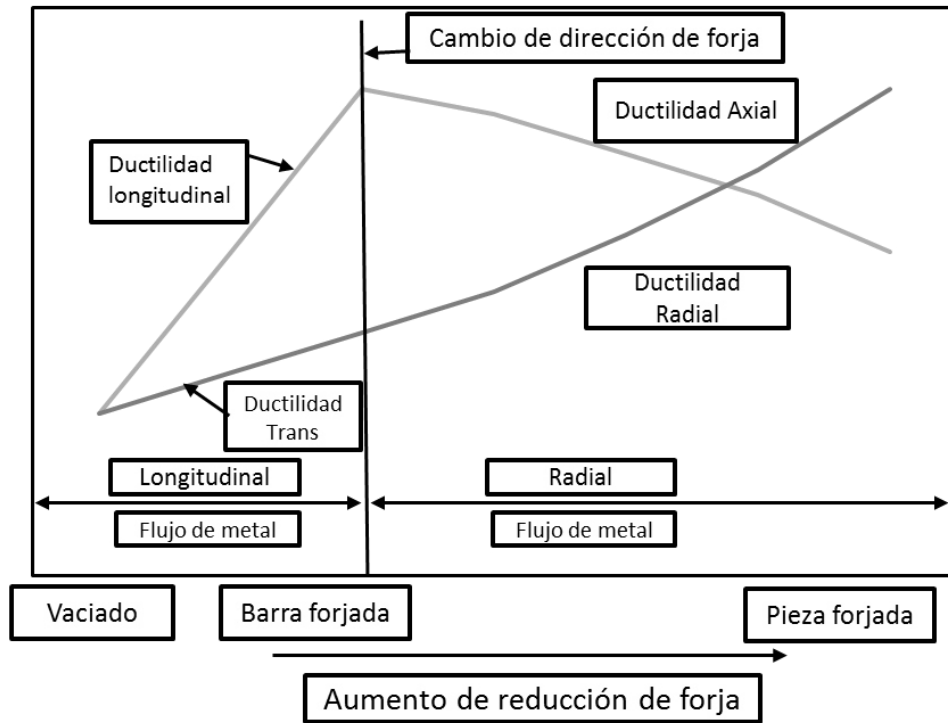


Figura 1.3. Comportamiento de propiedades mecánicas vs reducción de forja [3].

1.1 Objetivo general

Determinar si existe anisotropía y en qué grado afecta las propiedades mecánicas, en las distintas posiciones de los discos. Obteniendo la reducción de forja óptima para reorientar el flujo en un sentido radial, en la deformación de discos por compresión; Contribuyendo en el conocimiento del diseño de los pasos de forja para orientar el flujo en la dirección deseada.

1.2 Hipótesis

Es posible determinar las condiciones óptimas de reducción de forja para obtener el flujo de grano deseado en las distintas zonas de la pieza, reorientando el flujo de grano por compresión entre prensas de un sentido axial a un sentido radial o reorientándolo de tal forma que se reduzca la anisotropía.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Anisotropía.

Los materiales cristalinos son aquellos en los que los átomos se ordenan en forma periódica, pueden estar formados por un solo cristal, llamados monocristalinos o formados por muchos cristales, policristalinos; Estos materiales contienen granos con cristales de estructura idéntica, pero con diferentes orientaciones cristalográficas, cuando estas orientaciones son distribuidas al azar, el material es isótropo cristalográficamente, en la mayoría de los materiales los granos no están orientados al azar, en este caso el material tiene una textura cristalográfica. El material también puede mostrar una textura morfológica por ejemplo cuando todos los granos son elongados en una dirección en particular o cuando el material contiene precipitados que son orientados en una o más direcciones preferenciales [4] ver figura 2.1.

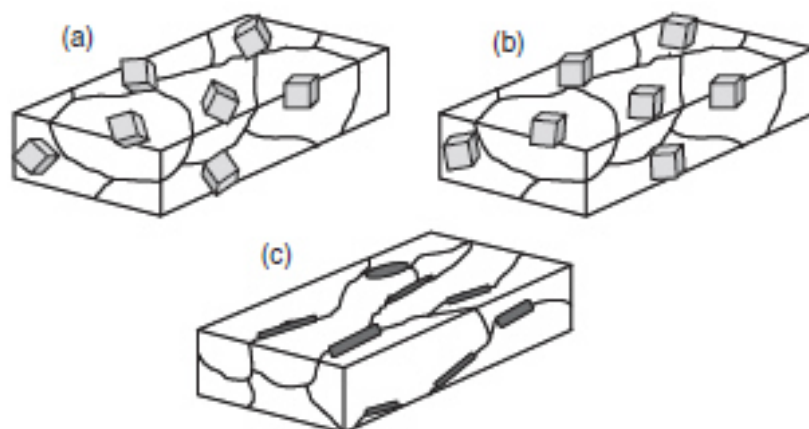


Figura 2.1. a) Material sin textura, b) material con textura cristalográfica, c) material con textura morfológica. (Los cubos representan las orientaciones cristalográficas) [4].

En ciencia de materiales se denomina textura a la distribución de orientaciones cristalográficas de una muestra. Una muestra en la cual estas orientaciones son completamente al azar se dice que no presenta ninguna textura, o que presenta una textura gris. Si las orientaciones cristalográficas no son al azar, sino que existe cierta orientación preferencial, entonces la muestra puede tener una textura débil, fuerte, o moderada. El grado depende de la fracción de cristales que tienen la orientación preferencial [4] [5].

La textura se presenta en casi todos los materiales cristalinos, y tiene una gran influencia sobre las propiedades de los mismos. También las rocas geológicas exhiben textura debido a su historia termomecánica consecuencia de los procesos de formación [4] [5].

Un caso extremo es la carencia de textura, por ejemplo un sólido con sus cristales completamente al azar, el cual tendrá características isotrópicas a escala macroscópica. El extremo opuesto es un mono cristal, que presenta características anisotrópicas debido a su geometría [4] [5].

Cuando las propiedades del material varían según la dirección en la que se ensaya el mismo se dice que el material es anisotrópico [2] [6].

Desde el punto de vista microestructural, la anisotropía en metales se produce por la forma y orientación preferente de los granos, así como de la orientación de las correspondientes estructuras cristalinas. La extensión y magnitud de los efectos anisótropos en materiales cristalinos están en función de la simetría de la estructura cristalina [2].

En la mayoría de los materiales policristalinos sin deformación previa, las orientaciones cristalográficas de los granos individuales son totalmente al azar. En estas circunstancias, aunque cada grano sea anisótropo, el material compuesto por un conjunto de granos, se comporta de forma isotrópica [2].

En un metal policristalino isotrópico, las deformaciones plásticas provocan dislocaciones en las estructuras cristalinas en función de las direcciones de carga del material. Estas dislocaciones provocan a su vez la deformación y reorientación de los granos de formas determinadas, de modo que aparecen direcciones preferentes en la microestructura, lo que se denomina como textura o flujo de grano [2].

El grado de variación anisotrópica varía con el metal y el procedimiento de trabajo empleado. La causa principal de la anisotropía se debe a la presencia de defectos como inclusiones, compuestos provenientes del proceso de fundición, segregaciones. También la presencia de grietas y cavidades es motivo de variación [6].

Otra característica que influye en el comportamiento direccional es el bandeo químico, que es también un fenómeno inherente al lingote. El bandeo químico (Figura 2.2) se encuentra en muchos metales deformados [6].

El estudio y cuantificación de la anisotropía plástica presente en los materiales es de gran importancia en procesos de conformado de metales, tales como laminado, estampado, extrusión o forjado, ya que son procesos de fabricación direccionales [2] [7].

Si un producto laminado se corta longitudinalmente y se examina el área con un microscopio óptico, en el cual la estructura consiste en bandas paralelas entre si y paralelas a la dirección del laminado, esto es debido a pequeñas diferencias en la composición química desde el borde al centro de cada banda, ver figura 2.2. Estas pequeñas diferencias en la composición tienen su origen en el fenómeno de solidificación del lingote. Los granos en el lingote primitivo no estaban alargados y paralelos, si no que si situaron así en el laminado. La recristalización espontánea que ocurre en el deformado del laminado en

caliente no afecta estas pequeñas segregaciones, por lo que subsiste en forma de bandas [6].



Figura 2.2. Bando químico de un acero bajo carbono, atacada con nital [8].

2.1.1 Métodos para determinar texturas

Las texturas cristalográficas se determinan generalmente utilizando técnicas de difracción, de electrones retro dispersados (EBSD), de rayos X o de neutrones. La técnica EBSD (Electron Back-Scatter Diffraction) provee información de la orientación de los cristales individuales con una resolución de unos pocos micrómetros, se efectúa en un microscopio electrónico de barrido. La difracción de rayos X o de neutrones, proveen información volumétrica de la orientación de distintos granos (información estadística de un número considerable de granos) [4] [5].

Dos tipos de orientaciones preferenciales se pueden distinguir: textura (*the lattice preferred orientation* - LPO), también conocida como orientación cristalográfica preferencial y la orientación de la forma preferencial u orientación morfológica preferencial que es la causada en los procesos de formado. En un rolado de un metal cubico el flujo depende más de la deformación que de la cristalografía [5].

Difracción de rayos X fue implementado por Wever (1924) para investigar la orientación preferencial en metales pero solo con la introducción del goniómetro figuras-polo y el uso de detectores electrónicos se convirtió en un método cuantitativo [9] [10].

Análisis de textura por difracción de neutrones es casi tan viejo como el goniómetro de figuras de polos y fue aplicado por primera vez por Brockhouse (1953) en un intento por determinar la estructura magnética de un acero [11].

A nivel macroscópico el método utilizado para determinar el flujo de granos es por el método de macro-ataque que es un ataque químico con la finalidad de revelar el flujo de grano y la interpretación es de forma visual, es descrito en la norma ASTM E-381 Método para ensayo de macro ataques, barras de acero, lingotes y forjas [12].

2.1.2 Plasticidad en metales

La deformación plástica se define como el cambio permanente en la forma de un metal por la aplicación de fuerzas. La habilidad de los metales para fluir de manera plástica sin fracturarse es la base fundamental para los procesos de formado [3] [13].

El fenómeno de plasticidad en el caso de los metales se produce fundamentalmente desde el punto de vista atómico, por la ruptura de enlaces entre los átomos más próximos y la regeneración de los mismos con los nuevos átomos vecinos; un gran número de átomos o moléculas se mueven unos

respecto de otros, y al eliminar la carga, no vuelven a sus posiciones originales [14].

En materiales cristalinos, como los metales, la deformación plástica tiene lugar mediante un proceso denominado deslizamiento de planos preferentes de átomos sobre otros planos paralelos. En este proceso está involucrado el movimiento de dislocaciones [14].

Las dislocaciones son defectos lineales o unidimensionales en torno a algunos átomos desalineados de la estructura cristalina. Las dislocaciones hacen que no sea necesario un movimiento simultáneo de todos los átomos en el plano, sino únicamente de aquellos átomos situados en la línea de dislocación, haciendo que la tensión necesaria para provocar el deslizamiento sea varios órdenes de magnitud inferior de la requerida para mover todos los átomos simultáneamente [14] [6].

2.1.3 Flujo de grano

Un producto forjado puede producirse con varios patrones de flujo de grano. El flujo de grano es caracterizado por la alineación de la estructura cristalina del metal base o del patrón de flujo de fases secundarias en la dirección del trabajo aplicado, sentido conocido como longitudinal. Las propiedades mecánicas varían de acuerdo a la dirección del flujo de grano, las propiedades transversales (perpendiculares a las fibras) como: elongación, contracción, esfuerzo de impacto y esfuerzo de fatiga son generalmente menores. La diferencia entre los valores en sentido transversal contra longitudinal incrementa conforme aumenta la cantidad de trabajo en el material. En el diseño de la forja esta anisotropía o direccionalidad puede ser usada como ventaja para orientar el metal en la dirección donde se requiere el máximo de resistencia y tenacidad [1] [2] [3] [13].

En la figura 2.3 se muestra un esquema del patrón de dirección de los cristales después de una deformación direccionada. El grado del flujo de grano produce características direccionales en las propiedades como resistencia, ductilidad, resistencia al impacto y fatiga. El proceso de forja utiliza esta direccionalidad para proveer una ventaja orientando el flujo en la dirección donde se requiere la máxima resistencia [1] [3] [15] [16].

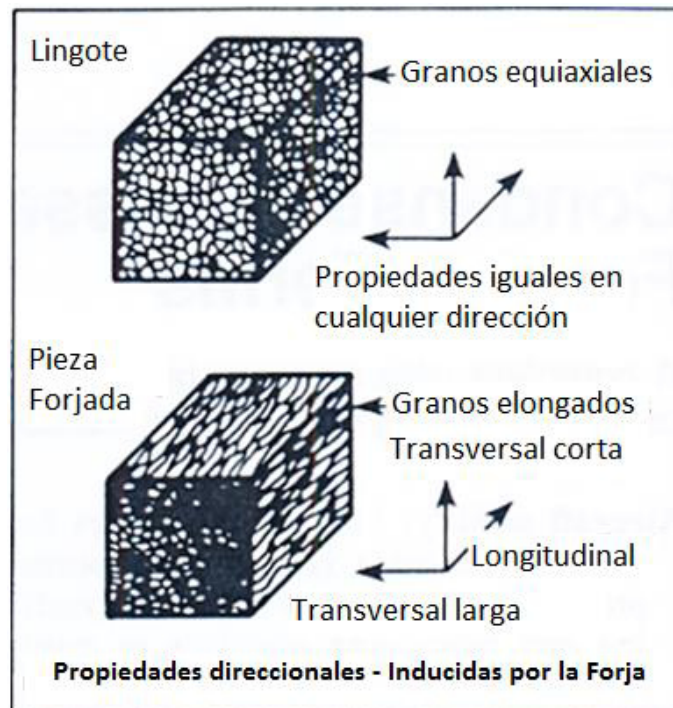


Figura 2.3. Comparación esquemática de la forma de los granos en una muestra con y sin deformación direccionada [3].

En el caso de aceros trabajados en caliente, las anisotropías más significativas se observan en la ductilidad, resistencia al impacto en las probetas con muesca y fatiga mecánica. La resistencia a la fisura por corrosión puede ser altamente direccional [1] [3].

Debido a que las piezas de forja son usualmente obtenidas a partir de barras forjadas ya tienen una considerable reducción, el metal fluye en varias direcciones durante el forjado, ejemplo en figura 2.4, donde se observa cómo se

comporta la propiedad de ductilidad al cambiar el sentido del flujo de deformación en la barra.

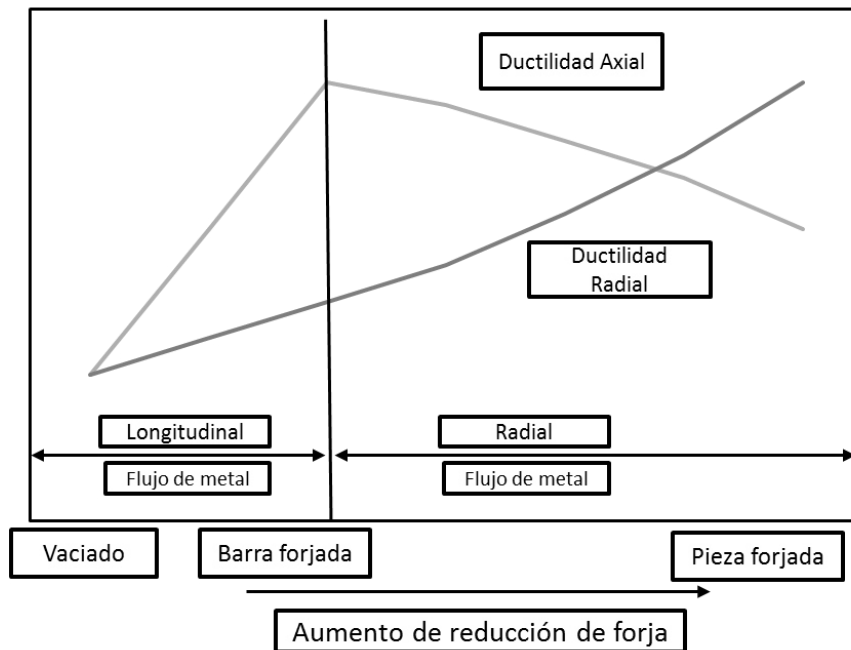


Figura 2.4. Típica Influencia en la ductilidad axial y radial durante la reducción por *upsetting* [3].

En la figura 2.4, se observa como al someter la pieza a una deformación de tipo *upsetting*, el eje axial es reducido y el metal es desplazado lateralmente en la dirección radial provocando que incremente la propiedad de ductilidad en dicho sentido y disminuyendo en el sentido axial, cuando las reducciones de forja de tipo *upsetting* exceden alrededor del 50% de la altura inicial, la ductilidad en la dirección radial generalmente sobrepasa la dirección axial [3].

La mayoría de los métodos para alterar los flujos de grano son complejos y pueden presentar múltiples flujos en diferentes orientaciones y proporciones dependiendo del contacto mecánico. Técnicas de forjado y lubricación son utilizadas para controlar el flujo de grano, por ejemplo un disco que es forjado por martillo entre dos dados, la superficie superior de la forja es generalmente mejor lubricada que la superficie inferior. Esto causa que el flujo de grano no sea uniforme, esencialmente el flujo de metal está en contra del dado superior

pero es virtualmente indeformable cerca de la superficie del dado inferior, condición que se corrige al cambiar el disco en la posición opuesta o proveer de una mejor lubricación en el dado inferior [3].

El flujo de grano de una pieza en particular puede ser modificado. Cuando la materia prima es una barra forjada ya cuenta con un flujo preferencial, durante el proceso de forjado este flujo puede ser cambiado de dirección, al modificar el tamaño de la barra inicial, el diseño de la forja, diseño de la preforma y los pasos del proceso de forjado [16].

El flujo de grano en la pieza puede ser completamente diferente en la misma pieza dependiendo del método de manufactura [13] [16].

La reducción de forja se acumula conforme se le van agregando procesos de deformación. El proceso final de forjado modifica el principal flujo de grano, aunque operaciones previas pueden tener una significativa influencia en el flujo de grano final del producto [17].

En la figura 2.5 se muestra como una preforma cilíndrica puede tener diferentes flujos, cortándola directamente de una placa, cortándola de una barra extruida, o si es obtenida mediante un proceso de forjado con deformación por *upsetting*. En los 3 casos la preforma tiene esencialmente la misma forma externa pero la geometría no revela mucho acerca del proceso de deformación, la historia de deformación puede ser muy importante [17].

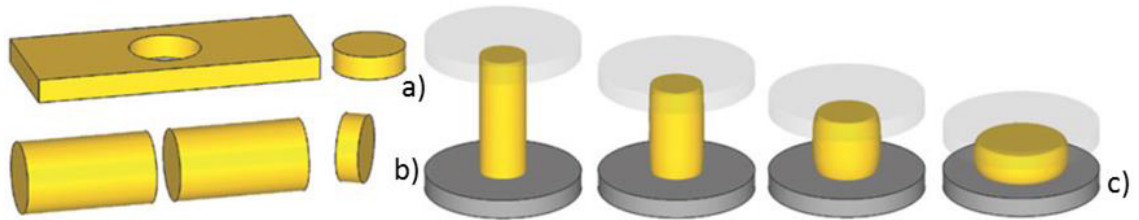


Figura 2.5. Obtención de pieza cilíndrica mediante distintos métodos de fabricación a) placa, b) barra, c) forjado entre prensas [17].

En la figura 2.6 esquematiza los flujos de grano que tendría cada disco dependiendo el método de fabricación; el inciso c, muestra la evolución del flujo de grano al ser deformado por *upsetting*, donde inicialmente está en el sentido de la barra forjada y conforme va aumentando la deformación va cambiando en un sentido radial, y se aprecia un flujo más complejo que el obtenido en el disco proveniente de la placa (a) o la barra (b) [17].

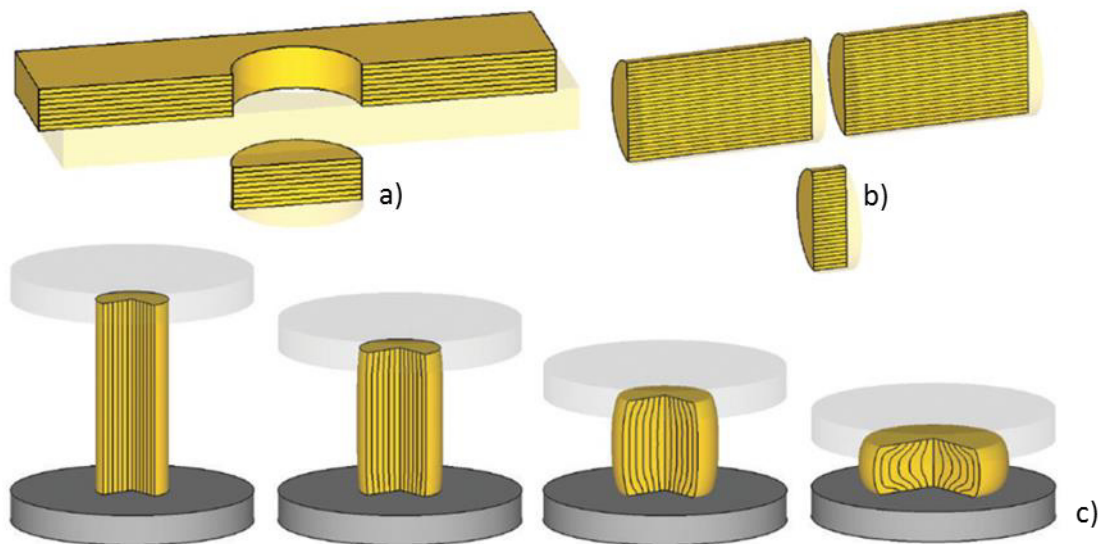


Figura 2.6. El flujo de grano en la pieza puede ser completamente diferente en la misma pieza dependiendo el método de manufactura a) placa, b) barra, c) forjado entre prensas [17].

Es deseable que la industria entienda el uso final del componente para que el diseño de los pasos de forja puedan ser optimizados orientado el flujo en la dirección donde se someterán los mayores esfuerzos en la aplicación [17].

2.1.4 Antecedentes de anisotropía

La anisotropía es un gran fenómeno en las operaciones de forjado y ha recibido mucha importancia desde que Hill publicó su artículo pionero en 1947: "*A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*", donde describe el flujo de los metales anisotrópicos en una escala macroscópica [2].

Diversos estudios han sido publicados acerca de la anisotropía, flujo de metal y apoyados con simulaciones por elemento finito por ejemplo:

Altan (1973) indicó la importancia de la temperatura de deformación en los metales, identificó la velocidad de deformación como un parámetro significativo y la deformación en sí como el parámetro más significativo para el flujo del metal [18]. Mataya (1990) mostró que la velocidad de deformación contra la prensa, tiene una muy importante influencia en las propiedades del acero 304L [19].

Dudra (1990) demostró como varía el flujo de metal variando la geometría de los dados y las geometrías iniciales del lingote [20].

Montmitonnet (1995) acopló el criterio Hill's quadratic y el de viscoplasticidad de Norton-Hoff para construir un modelo de deformación en metales y ver los efectos prácticos de la anisotropía en operaciones de forjado en caliente, en dicho estudio muestra la importancia de los coeficientes de anisotropía del criterio Hill's quadratic teniendo gran influencia en el contorno superficial de la forja [21].

Kada (1998) mediante un estudio, calculó los esfuerzos de fluencia en forja isotérmica en combinación con elemento finito [22]. Sinczak (1998) determinó el trabajo mínimo requerido en piezas de grandes secciones para obtener propiedades mecánicas de forja (cambiando la estructura de vaciado) en busca

eliminar pasos de reducción de forja. Utilizando diferentes tipos de dados e identificando las principales variables para desarrollar un modelo de elemento finito, variables tales como temperatura, deformación, velocidad de enfriamiento ya que tienen una importante influencia sobre la microestructura y propiedades mecánicas [23]. Serajzadeh (2004) estudio la evolución de la microestructura durante el forjado en caliente por medio de simulación en elemento finito [24].

Altan y Shirgaokar (2005) reconocieron las causas potenciales para la variación entre parte y parte por ejemplo tipo de proceso de forja, velocidad de deformación, tiempo de contacto con el dado y temperatura de trabajo [25].

La FIA (2007) ha documentado que dependiendo el tipo de metal se tendrá diferente sensibilidad al flujo de grano y esta variación depende de ciertos factores como la recristalización y otras características microestructurales como inclusiones, bandeo químico, y fases sin disolver.

Además clasifica esta sensibilidad en los siguientes grados:

- Baja: metales de alta microlimpieza, de una sola fase, sin micro o macro segregaciones (ejemplos: aluminio, cobre, níquel y plata)
- Media: aleaciones con precipitados, aleaciones que contengan diferentes fases, estructura recristalizada (aceros aleados, inoxidable, aleaciones base cromo, níquel, y aleaciones de aluminio)
- Alta: aleaciones con alguna fase insoluble después del tratamiento térmico, aleaciones no completamente recristalizadas después del tratamiento térmico (súper-aleaciones de base níquel o cobalto como INCO 901, Waspalloy, aleaciones de titanio como Ti_6Al_4V , aleaciones de molibdeno [26].

Aksakal (2008) determinó la cantidad de volumen desplazado en sus diferentes sentidos en piezas de forja abierta [27]. Serajzadeh (2008) Realizo un estudio para predecir el comportamiento termo mecánico por *upsetting* durante el

forjado en caliente con diferentes parámetros como deformación, velocidad de deformación y temperaturas [28].

Zhang (2009) realizó estudios para determinar el flujo de grano en formas complejas con dados cerrados, para evitar bajas propiedades mecánicas en zonas críticas en el uso de la pieza fabricada debido a defectos en el flujo [29].

La FIA (2009) indicó que el proceso de forja tiene la mínima variación en propiedades entre parte y parte en comparación con otros procesos de manufactura [30], pero no discutió los diferentes niveles de variación en el proceso de forja.

Switzner (2010) estudia la variación entre parte y parte variando la temperatura, equipo de forja, añadiendo un recocido intermedio, también observa la variación en las propiedades dentro de la misma pieza variando su proceso de producción, con diferentes velocidades de deformación y flujo preferencial en la misma pieza [31].

Ghassemali (2013) estudió el efecto interactivo del tamaño de grano con las dimensiones de las piezas sobre el flujo del material y la evolución de la microestructura en una microforja abierta. Se le dio particular interés en el efecto de número de granos sobre el espesor de la pieza, y en la evolución de la zona muerta del metal en los microcomponentes finales [32].

J. Walters y C.J. Van Tyne (2014) publican una tabla ejemplificando las variaciones en ciertas propiedades como resistencia a la tensión, elongación y reducción de área, dependiendo del sentido en el cual se extraída la probeta pero no se hace mención al tipo de material utilizado, también explican los motivos por los cuales existe esta variación, donde la grieta preferentemente se propaga en la dirección del flujo de grano, cuando la grieta está perpendicular va a través de numerosas desviaciones haciendo el material más resistente a la fractura, por lo tanto las propiedades mecánicas son mayores en el sentido longitudinal, e inversamente en el sentido transversal tendrá propiedades

mecánicas menores debido a que la grieta se propaga a través de los defectos provenientes del proceso de fundición [1] [15] [33].

J. Walters y C.J. Van Tyne (2015) publican información acerca del uso de simulaciones para predecir el flujo de grano y como una misma pieza puede ser obtenida con diferentes flujos desde la preforma de la forja [16] [17].

2.2 Efecto del proceso de forja en las propiedades mecánicas.

La forja usualmente afecta importantes propiedades mecánicas de acero como la ductilidad, resistencia al impacto y resistencia a la fatiga mientras la dureza y resistencia son controladas por composición y tratamiento térmico, las razones para estas mejoras son:

- Rompe segregaciones.
- Sana porosidades e incrementa la homogenización.
- Produce una estructura fibrosa en granos, que incrementa las propiedades mecánicas paralelas al flujo de grano [3].

En la figura 2.7 se muestra el típico incremento en la ductilidad y resistencia al impacto de aceros tratados térmicamente obtenidos incrementando la reducción de forja, el valor máximo ocurre en la dirección de la deformación debido a la estructura fibrosa altamente orientada. Después de cierta cantidad de reducción sanando porosidades, los incrementos en las propiedades de tenacidad y ductilidad son poco significantes [3].

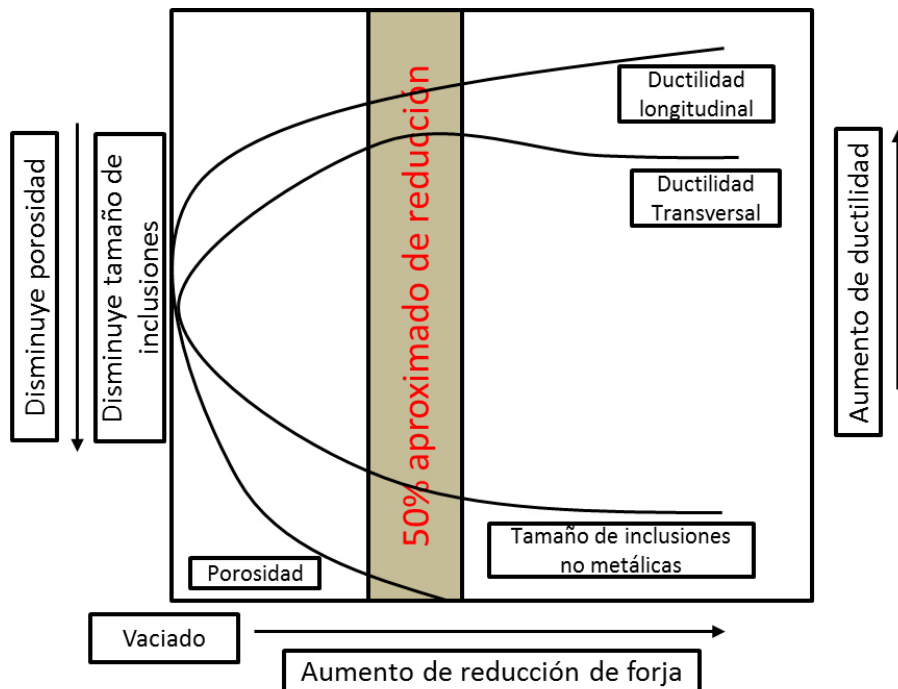


Figura 2.7. Diagrama que muestra el incremento en la ductilidad de aceros como resultado de la reducción de porosidad y el tamaño de las inclusiones durante el forjado [3].

La figura 2.7 muestra como al incrementar la reducción de forja además de incrementar las propiedades como ductilidad y energía al impacto, reduce porosidades y el tamaño de las inclusiones presentes en el lingote [3].

2.3 Forjabilidad

Se puede definir la forjabilidad como la plasticidad de los metales y aleaciones al deformarse sin ruptura durante la forja [3] [34].

Es conveniente discutir la deformación en términos de dos rangos de temperatura por que la facilidad para deformar está relacionada con la temperatura: trabajo en frío en donde las temperaturas están por debajo de $1/3$ del punto de fusión (K) del material y temperaturas de trabajo en caliente son aquellas por arriba de $1/2$ del punto de fusión (K) [3].

En temperaturas de trabajo en frío, la deformación plástica sucede por procesos dentro el grano y las curvas de esfuerzo-deformación exhiben un endurecimiento por esfuerzo; en contraste a temperaturas tibias o calientes, el proceso de deformación en los granos ocurre en las fronteras de grano, y entre más alta sea la temperatura de trabajo mayor será la disminución en dureza que acompaña la deformación. Esta baja de dureza puede balancear el endurecimiento por deformación [3].

Para el forjado, son necesarias propiedades como un bajo esfuerzo de cedencia y una alta ductilidad, la cuales son afectadas por la temperatura y la velocidad de deformación, conforme la temperatura de trabajo aumenta de igual forma se incrementa la ductilidad y el esfuerzo de cedencia es disminuido [13].

2.4 Mecanismos de deformación a altas temperaturas

El rango de alta temperatura ha sido definido por diversos autores como los rangos mayores a $\frac{1}{2}$ de la temperatura de fusión (K). La temperatura a $\frac{1}{2}$ del punto de fusión ha sido llamada la temperatura equicohesiva, debajo de esta temperatura las fronteras de grano son más resistentes a la deformación por deslizamiento de fronteras [3].

Probablemente los factores más significativos a la temperatura equicohesiva es que la velocidad de la autodifusión en metales se convierte en significativa (se refiere al hecho que los átomos se mueven en el arreglo por intercambio de vacancias o sitios vacíos). Este intercambio hace posible el fenómeno de escalar dislocaciones fuera de sus planos de deslizamiento, como se ilustra en la figura 2.8 [3].

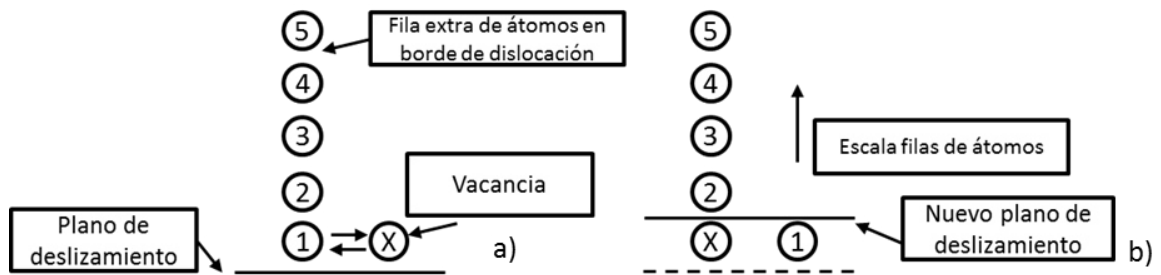


Figura 2.8. Concepto de escalar dislocaciones fuera del plano de deslizamiento. a) Antes, b) después del intercambio de vacancias [3].

Este proceso de escalar permite que las dislocaciones escalen obstáculos y que se recuperen del endurecimiento por deformación [3].

Los procesos que ocurren en el rango de alta temperatura son:

- Rompimiento de granos en subgranos a través de dislocaciones
- Deslizar fronteras de grano y migraciones de fronteras de grano
- Deslizamientos finos, difíciles de resolver por técnicas ordinarias de microscopios ópticos [3].

Las características de este rango son:

- Recuperación de endurecimiento por deformación causado por la deformación plástica
- Recristalización, la cual es la formación de una nueva estructura de grano libre de deformación, que puede por lo tanto crecer en tamaño por la migración de las fronteras de grano.
- Flujo viscoso en el cual la velocidad sensitiva se convierte apreciable (la dependencia del esfuerzo de fluencia con la velocidad de deformación).
- El grado de flujo viscoso incrementa conforme la temperatura de deformación alcanza el punto de fusión [3] [13].

2.5 Operación de forjado como un sistema.

El sistema de forjado comprende muchas variables como la barra forjada o el lingote, la herramienta, condiciones de fricción, la carga de la deformación plástica, el equipo utilizado y las características del producto final.

La clave para una operación de forja exitosa para obtener las propiedades y forma deseadas, es el entendimiento y control del flujo del metal [13].

La dirección del flujo de metal, la magnitud de la deformación y la temperatura que envuelve el proceso son de las variables que más influyen en las propiedades de los componentes forjados [3] [13].

El flujo de metal es influenciado por distintas variables como [13]:

1. Materia prima (barra/lingote)
2. Herramientas y dados
3. Condiciones de fricción
4. Zona de deformación
5. Equipo
6. Producto

1. Materia prima (barra / lingote)

- El esfuerzo de fluencia depende de la composición química, estructura metalúrgica, tamaño de grano, segregación, historial de deformación, temperatura de deformación, grado de deformación, velocidad de deformación y microestructura.
- La forjabilidad en función de la velocidad de deformación, temperatura y el grado de deformación.
- La textura de la superficie.

- Propiedades físicas y térmicas (densidad, punto de fusión, calor específico, conductividad térmica, expansión, resistencia a la corrosión y oxidación).
- Anisotropía plástica.
- Tamaño de la barra y espesor [13].

En general incrementando la temperatura de la forja incrementa la ductilidad y decrece el esfuerzo de fluencia del metal o aleación.

La selección de temperaturas de forja de aceros al carbono y aleados está basado en el contenido de carbono, la composición de la aleación, el rango de temperatura para la plasticidad óptima y la cantidad de reducción. Generalmente la máxima temperatura permisible es seleccionada debido a que asegura las menores presiones de forja [3] [13].

El límite superior de temperaturas de forja en aceros está influenciado notablemente por el contenido de carbono y las cuales son aproximadamente 165 °C por debajo de la temperatura de línea solidus de cada composición. Cerca de estas temperaturas los aceros están sujetos a daños posibles por sobrecalentamiento o fundiciones incipientes [3].

En general la forjabilidad de los aceros incrementa conforme la velocidad de deformación aumenta [3].

2. Herramientas y dados

- Geometría de las herramientas.
- Condiciones de la superficie, lubricación.
- Material, tratamiento térmico, dureza.
- Temperatura de los dados.

El uso de dados calentados reduce las presiones de forja, beneficia a evitar defectos por cambios bruscos de temperatura en las superficies de la pieza. Este efecto mejora cuando la temperatura de los dados es muy cercana a la de las piezas, lo cual es factible en metales como aluminio o magnesio pero mucho más difícil para aceros o aleaciones de titanio [3].

3. Condiciones de la interacción material prima y herramienta.

- Tipo de lubricante y temperatura.
- Aislante y características de enfriamiento de la capa que hace la interacción.
- Esfuerzos de corte de lubricación.
- Características relacionadas con aplicar y remover el lubricante.

Los lubricantes para dados se utilizan principalmente para reducir las cargas de forja y controlar o mejorar la uniformidad en el flujo de metal. En general la selección de lubricantes de forja usualmente representa varios atributos deseables: cualidades de aislamiento, bajo coeficiente de fricción, que sea poco corrosivo y toxico. El grafito en varias preparaciones aparece como el lubricante para forja más usado [3].

4. Zona de deformación

- La mecánica de la deformación.
- Flujo de metal, velocidades, deformación.
- Esfuerzos (variación durante la deformación).
- Temperatura (generación y transferencia de calor).

5. Equipo

- Velocidad de la máquina, velocidad de producción.

- Capacidades de fuerza / energía.
- Exactitud.

6. Producto

- Geometría.
- Exactitud dimensional /tolerancias.
- Acabado superficial.
- Propiedades mecánicas y micro estructurales.

2.6 Tipos de procesos de forja

La diferencia en los procesos de forjado, es el grado en que los dados restringen el flujo de metal de trabajo. Los procesos de forjado se clasifican en tres tipos: a) forjado en dado abierto, b) forjado en dados cerrados, c) forjado sin rebaba. Los diagramas de estos tres tipos se presentan en la figura 2.9. En el forjado en dado abierto el trabajo se comprime entre dos dados planos (o casi planos), permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies del dado. En el forjado con dados cerrados, las superficies del dado contienen una forma o impresión que se imparte al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo de metal. En este tipo de operación una parte del metal fluye hacia los lados laterales del dado impresor formando una rebaba, la rebaba es un exceso de metal que debe recortarse más tarde. En el forjado sin rebaba, el dado restringe completamente el material de trabajo dentro de la cavidad y no se produce rebaba excedente. Es necesario controlar estrechamente el volumen de la pieza inicial para que iguale el volumen de la cavidad del dado. Si el volumen del material de trabajo es demasiado pequeño no llenara la cavidad del molde, y si es demasiado grande puede dañar el dado o a la prensa [35].

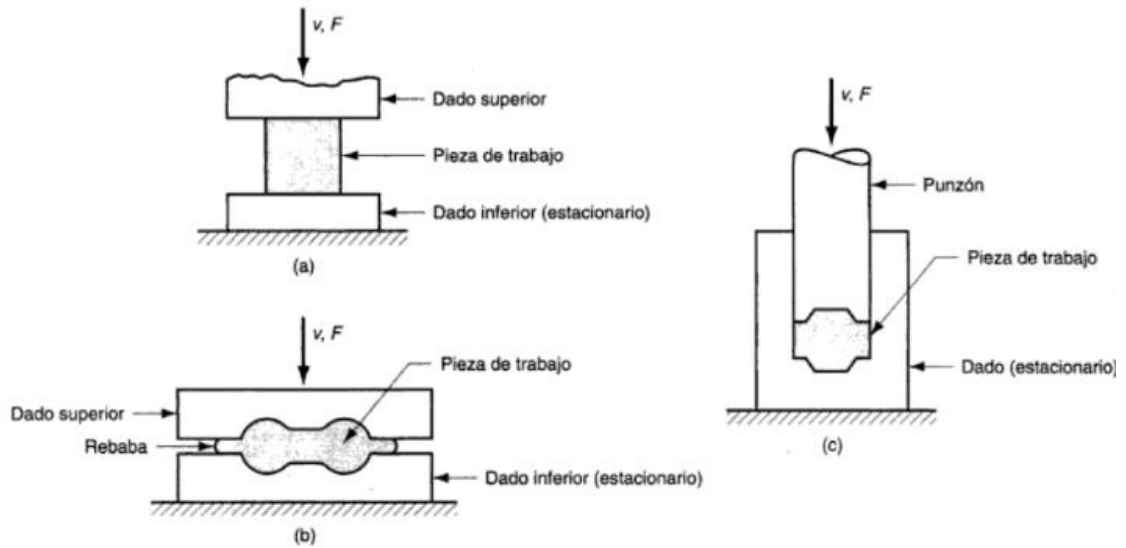


Figura 2.9. a) Forjado abierta, b) forjado cerrada, c) forjado sin rebaba [35].

El tipo de forja utilizado en este proyecto fue el de forja abierta, utilizado en dos pasos de forja.

1. Forja abierta radial
2. Forja abierta tipo *upsetting*

1. Forja abierta radial

Este proceso de forja utiliza dos o más dados radiales para producir un componente sólido o tubular, con la capacidad de variar la sección transversal a lo largo de la pieza, otra aplicación de este proceso es reducir los diámetros de lingotes y barras [13] [35].

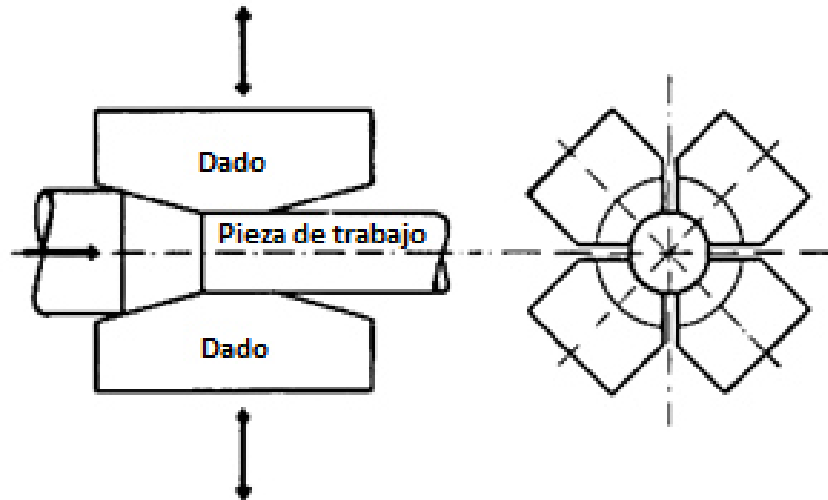


Figura 2.10. Proceso de Forja Radial [13].

2. Forja abierta tipo *upsetting*

La forja abierta tipo *upsetting* es un proceso de forja en caliente en donde el material es formado por martillos o prensas con dados planos o con formas simples, y se utilizan para realizar preformas o forjas en condición final [13] [35].

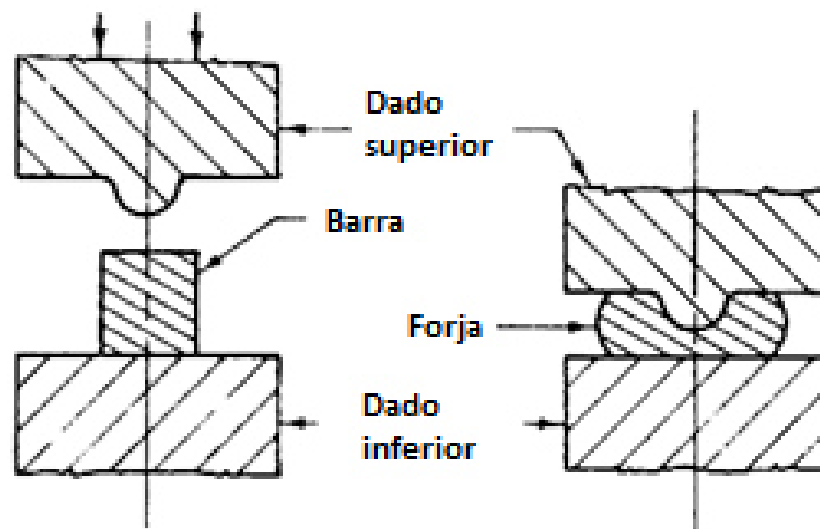


Figura 2.11. Proceso de forja Abierta [13].

Un ejemplo real de una operación de forja abierta sobre una pieza cilíndrica, ocurre exactamente como se muestra en la figura 2.11, debido a que la fricción

se opone al flujo de metal en la superficie de los dados. Esto crea sobre la pieza un efecto de de barril (abarrilamiento), cuando se realiza un trabajo en caliente con dados fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Debido a: 1) un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente y 2) la transferencia de calor en la superficie del dado y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación (figura 2.12). El metal más caliente se encuentra en medio de la pieza y fluye más fácilmente que el metal más frío en los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura de la pieza, debido a la mayor área de contacto en la interface dado-pieza de trabajo [35].

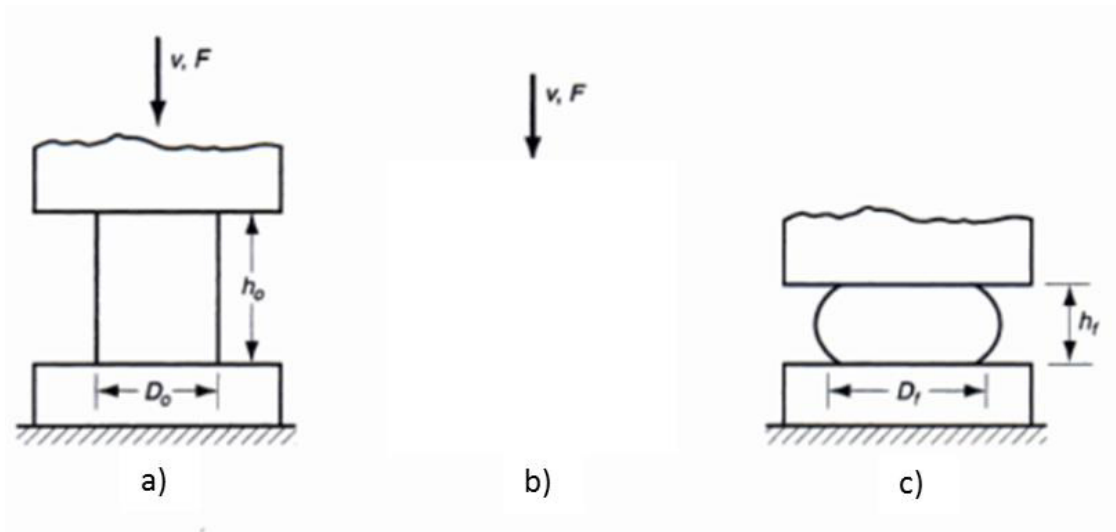


Figura 2.12. Deformación cilíndrica de una pieza de trabajo en forja abierta mostrando un abarrilamiento pronunciado. a) inicio del proceso, b) deformación parcial y c) forma final [35].

2.7 Prensas para el proceso de forja.

El continuo desarrollo de la tecnología en la industria de la forja requiere un fundamental entendimiento de las capacidades y características de los equipos y la influencia en el proceso de forja, ya que esto afecta en la velocidad de deformación las condiciones de temperatura.

Existen básicamente tres tipos de prensas: hidráulicas, mecánicas, de tornillo y martillos [13].

La prensa hidráulica se utilizó en este trabajo y su operación es relativamente simple, está basado en el movimiento de un pistón hidráulico guiado en un cilindro [13].

Las características de la prensa hidráulica son determinadas por el tipo de sistema hidráulico. Existe de dos tipos con acumulador y directo (Figura 2.13) [13].

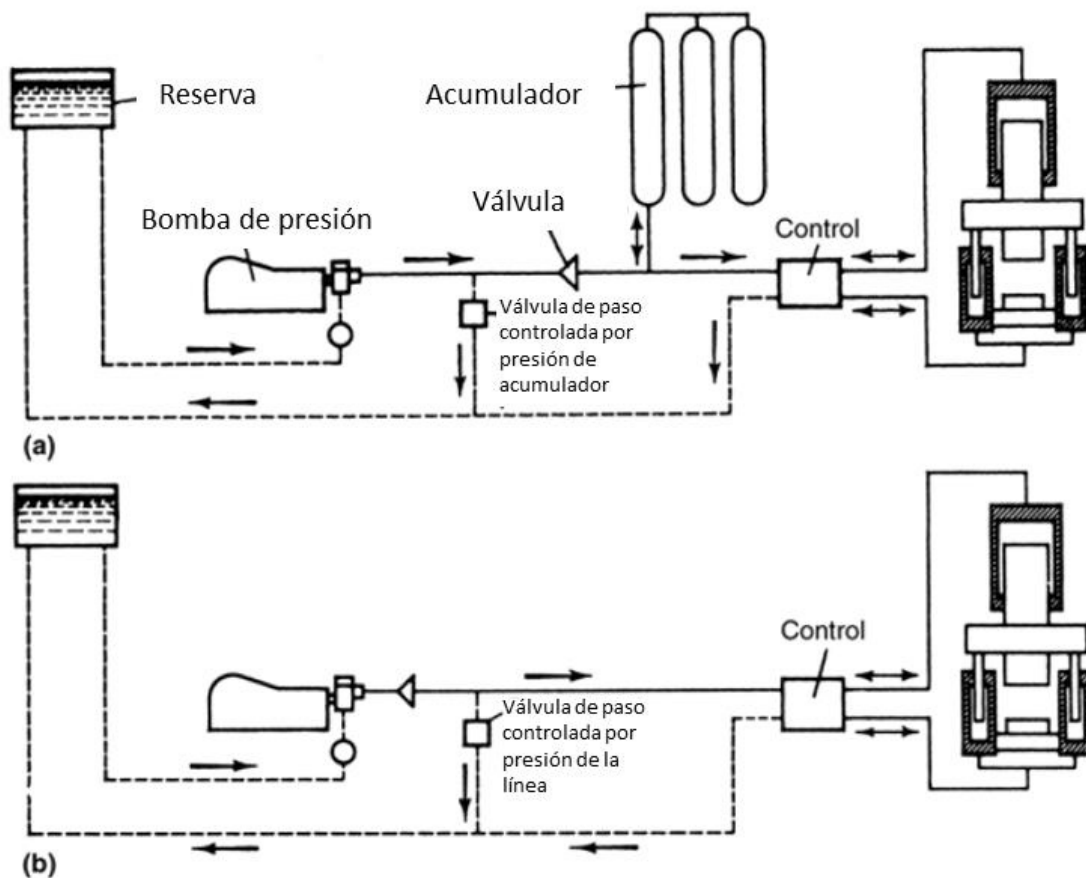


Figura 2.13. Esquema de prensa hidráulica a) con acumulador, b) directo.

Las prensas de manejo directo, emplean como medio de trabajo aceite hidráulico o emulsión de agua, al inicio la caída de la prensa es por gravedad y

el aceite se traslada de la reserva hacia el cilindro de la prensa, cuando hace contacto la pieza con la prensa, la válvula de aceite se cierra y la bomba ejerce cierta presión por lo tanto la prensa es forzada a bajar hasta la distancia programada o cuando la presión alcance un determinado valor, al finalizar la presión, el aceite se libera.

En las prensas con acumulador la secuencia de operaciones es muy similar excepto que la presión de aceite la controla el acumulador, por consecuencia la velocidad de penetración no es directamente dependiente de las características de la bomba, varía dependiendo la presión en el acumulador y la resistencia de la pieza a la deformación [13].

En ambos tipos de prensa ocurre una disminución de velocidad durante la deformación ya que la fuerza requerida para formar el material se incrementa.

Existen dos tipos de diseño referente al movimiento del pistón, el de tipo empujar y el de jalar, la diferencia está en el diseño de movimiento del pistón aunque el mecanismo es esencialmente el mismo [13].

A continuación se muestra un esquema de ambos tipos de prensa hidráulica (figura 2.14), el utilizado en el presente trabajo fue el de tipo empuja.

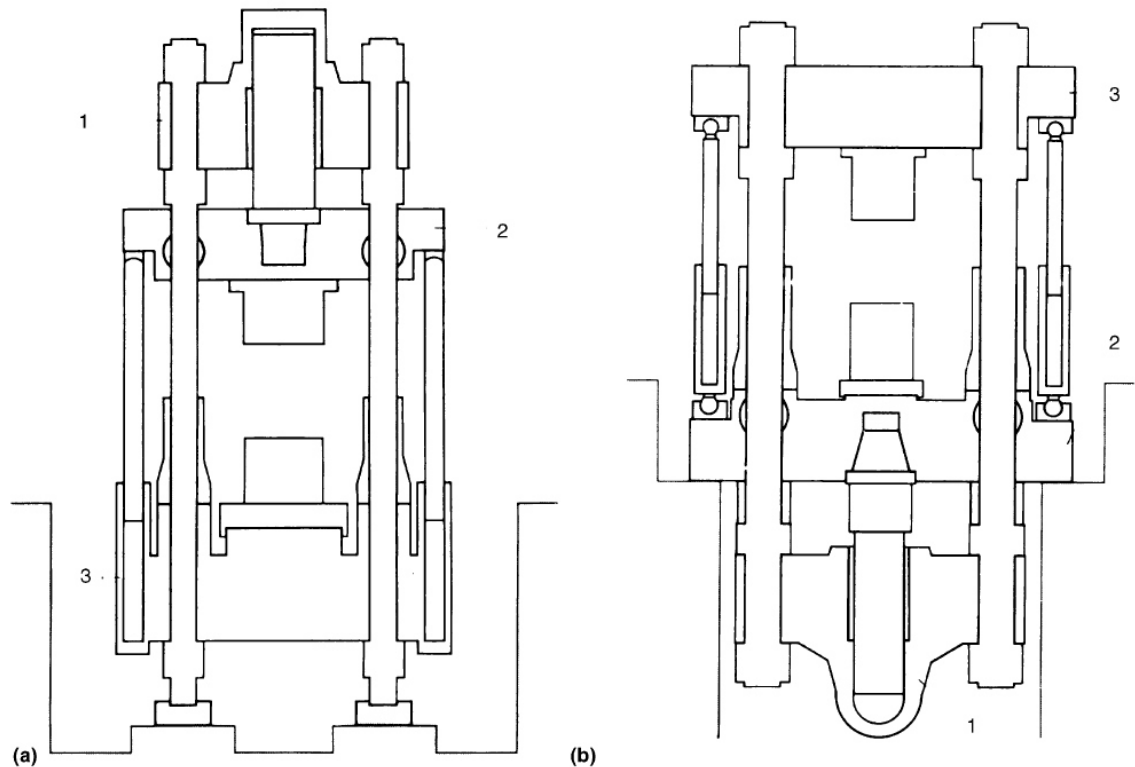


Figura 2.14. Esquema de prensa hidráulica a) Diseño de empujar: 1, cabezal estacionario del cilindro; 2, montaje del pistón; 3, asiento estacionario (b) Diseño de jalar: 1, montaje del pistón; 2, asiento estacionario; 3, Cabezal con movimiento [13].

Estas prensas funcionan a velocidad constante y están limitadas por la carga. En otras palabras, la prensa se detiene si la carga requerida es mayor que su capacidad. Se transfiere una gran cantidad de energía a la pieza, mediante una carga constante durante la carrera, cuya velocidad se puede controlar. Como el forjado en prensa hidráulica tarda más tiempo que en otros tipos de máquinas para forjar, la pieza se puede enfriar con mayor rapidez. En comparación con las prensas mecánicas, las hidráulicas son más lentas e implican mayor costo inicial pero requieren menos mantenimiento. Sistemas de control se adecuan para regular la velocidad de deformación. Este control ofrece una importante ventaja en los procesos de formado [34].

2.8 Fricción y lubricación en la interacción pieza/herramienta

En la forja, las condiciones de fricción en la interface de la pieza a trabajar y los dados tienen una gran influencia en el flujo de metal, formación de defectos internos y superficiales [36]

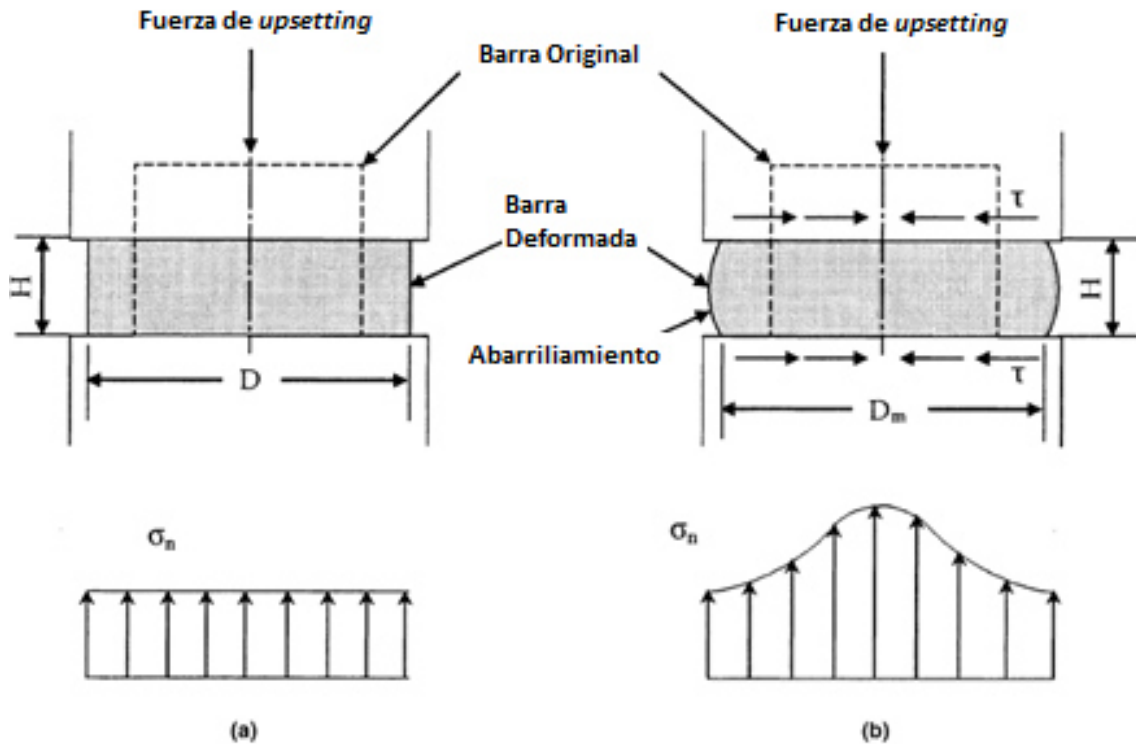


Figura 2.15. Deformación de pieza de forja con distintas condiciones de fricción, a) sin fricción, b) con fricción [13].

La figura 2.15 a) muestra como sin condiciones de fricción, la pieza de trabajo se deforma de una manera homogénea, pero en la figura 2.15 b) muestra un nivel de fricción donde los esfuerzos no son homogéneos en todas las zonas de la pieza produciendo un abarrilamiento en su contorno. Los esfuerzos incrementan de la superficie del diámetro hacia el centro de la pieza y la fuerza de *upsetting* es mayor en comparación con la condición sin fricción.

La industria desea reducir la fricción entre piezas y herramienta para evitar un desgaste prematuro en los herramientas, reducir costos de energía y mejorar el acabado superficial de las piezas, por lo que es necesario el uso de lubricantes para alcanzar estos objetivos.

Existen cuatro tipos básicos de lubricación que gobierna las condiciones de fricción en el formado de metales. La curva Stribeck mostrada en la figura 2.16, ilustra los tipos de lubricación en función de la viscosidad del lubricante (η), velocidad de desplazamiento (v) y presión normal (p) [37] [38].

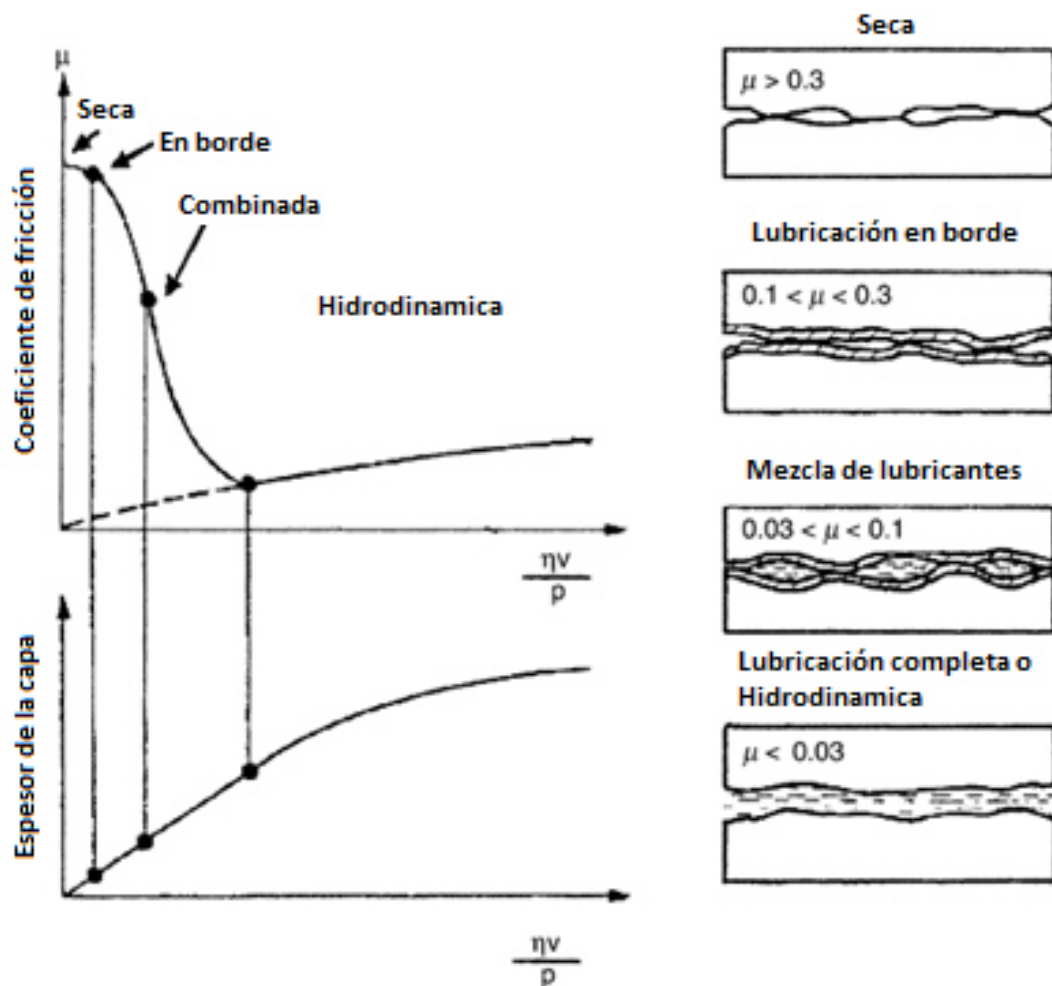


Figura 2.16. Tipos de lubricación.

Bajo condiciones seca (dry), no hay lubricante presente en la interacción, solo oxido están presentes.

Lubricación en el borde (*Boundary*), está gobernada por una película delgada, normalmente orgánica y que es adherida a la superficie del metal.

Lubricación completa (*Full film lubrication*), existe cuando una capa gruesa de lubricante sólido seco está presente entre los dados y la pieza.

Condiciones hidrodinámicas, existe cuando una capa gruesa de lubricante líquida está presente entre los dados y la pieza.

Mezcla de lubricantes, es la más usada en la industria [13].

Existen numerosos parámetros que influyen en las condiciones de fricción y lubricación en la interacción de la pieza de trabajo y los dados, a continuación se mencionan los principales [38]:

- Parámetros de la pieza / herramienta: El acabado superficial de la pieza y herramienta, la geometría de la herramienta.
- Parámetros del lubricante: La viscosidad del lubricante, la cantidad de lubricante.
- Parámetros del proceso: La presión del proceso de forjado, velocidad de trabajo, el recorrido que realiza los dados a lo largo de la pieza, calor generado.

Las principales características de los lubricantes son las siguientes [38]:

- Reducir la fricción entre la pieza y la herramienta.
- Prevenir que se pegue la pieza con la herramienta.
- Tener buenas propiedades aislantes, especialmente en forjado en caliente, para que reduzca la pérdida de calor entre pieza y herramienta.

- Que sea lo suficientemente inerte para prevenir reacciones a altas temperaturas.
- Que no sea abrasivo para minimizar el desgaste en la herramienta.
- Que no contamine ni produzca gases peligrosos.
- Que sea fácil de aplicar y de remover.
- Que sea comercialmente disponible y a un costo razonable.

El flujo de metal, fricción, interacción entre pieza de trabajo y herramientas, la generación y transferencia de calor durante el flujo plástico así como las relaciones entre la microestructura, propiedades y proceso son condiciones difíciles de predecir y analizar, en la actualidad el método más utilizado para predecir dichas condiciones es el modelado numérico.

2.9 Modelado numérico

El objetivo principal de cualquier método de análisis numérico es asistir al ingeniero de forja en el diseño y pasos del forjado, para así predecir el flujo del metal, establecer límites de forjabilidad, determinar si es posible fabricar la pieza sin defectos superficiales o internos, predecir las fuerzas y esfuerzos necesarios para realizar la operación de forjado para que la herramienta y equipo pueda ser seleccionado.

Algunos factores que afectan al proceso de deformación son: la composición química, la microestructura, fases presentes, tamaño de grano, segregación e historial de deformación [13].

Otros factores que están directamente relacionados con el proceso de deformación son la temperatura de deformación, el grado de deformación, y la velocidad de deformación [13].

Los principales objetivos del análisis de la operación de forja son:

- Establecer las relación cinemáticas (forma, velocidades, deformaciones y velocidades de deformación) entre la pieza sin deformar y la pieza deformada, prediciendo el flujo de metal durante el proceso de forjado.
- Establecer los límites de forjabilidad, determinar si es posible realizar la operación de forjado sin causar ninguna falla superficial o interna en el material deformado.
- Predecir los esfuerzos, fuerzas y energía necesaria para llevar a cabo la operación, para la correcta selección de equipo y herramientas.

Existen diferentes métodos de aproximación numéricos, para analizar el proceso de forja, cada uno de ellos requiere cierta información como [13]:

- Una descripción del comportamiento del material bajo ciertas condiciones del proceso.
- Un valor cuantitativo que describa la fricción.

A continuación se mencionan los principales procedimientos de análisis numérico: Método de bloque (*slab*), método de deslizamiento de líneas (*slip-line field*), método visioplástico, método *upper-bond*, método de diferencias finitas y método de elemento finito.

El método utilizado en este proyecto fue el de elemento finito, donde la estructura o dominio es dividido en un elevado número de pequeños segmentos (elementos finitos), en cada segmento se describe su comportamiento por medio de ecuaciones diferenciales, después los segmentos son unidos y equilibrados definiendo ecuaciones frontera para resolver el problema, este método es muy utilizado debido a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos en dos o tres dimensiones [39].

El modelado numérico de la anisotropía plástica se lleva a cabo a través de una función que representa el criterio de plastificación. El más utilizado en metales es el criterio de Hill de 1948 [2].

2.9.1 Simulación por elemento finito

El método de elemento finito ha ganado mucha aceptación en la industria, este método permite incorporar en la simulación las temperaturas de las herramientas y pieza de trabajo, la transferencia de calor durante la deformación, velocidades de deformación dependientes de las propiedades del material, características de endurecimiento por deformación y capacidades de análisis microestructural, todo esto resultando en un análisis más exacto para el proceso de forja. Distintos programas de elemento finito han sido desarrollados para simular formas complejas en 2D y 3D [40].

Distintos programas de simulación han ido ganando aceptación en la industria de la forja y se han convertido en una parte integral del diseño de la forja y del desarrollo del proceso. Entre los principales objetivos del diseño de la forja por elemento finito podemos mencionar [41]:

- El diseño de dados para asegurar el llenado en forja cerrada, prevenir defectos de flujo o defectos internos, predecir las temperaturas en las cuales propiedades, condiciones de fricción puedan ser controladas
- Mejorar la calidad en las piezas, reduciendo costos de manufactura, prediciendo el flujo de grano y microestructura (fases presentes, tamaño de grano y precipitación) reduciendo rechazos, incrementando la fluencia del material.
- Prediciendo la carga de forja y energía como los esfuerzos de las herramientas, evitando fallas prematuras en las herramientas,

seleccionando apropiadamente la máquina de forja para distintos productos.

También es posible predecir el flujo de grano o textura por medio de simulación, a nivel macro en el programa comercial DEFORM ®, se ha desarrollado una opción llamada *FLOWNET* a principios de los 1990s, donde simula patrones de flujo de acuerdo a la deformación por el proceso de forja. Esta aplicación puede ser aplicada tanto en simulaciones 2D como en 3D [16].

El flujo de grano en la forja generalmente debe analizarse en 3 dimensiones, para poder visualizarlo correctamente, principalmente si el proceso de forja se llevó a cabo en distintos pasos [16].

A nivel micro estructural se han planteado diversas hipótesis que relacionan la deformación de cada grano con la deformación global de la pieza. Mediante estas hipótesis, es posible elaborar modelos matemáticos para predecir el cambio de orientación de los granos como consecuencia del proceso de deformación sufrido, y estimar la textura cristalográfica final a partir de la textura inicial y del tipo y severidad de deformación [3] [5].

2.9.1.1 Información necesaria para la simulación

La información necesaria se divide en parámetros geométricos, parámetros de proceso y parámetros del material [42]

Los parámetros de proceso a considerar son los siguientes: [42]:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura de la pieza de trabajo.
- Temperatura de los dados.

- Coeficientes de transferencia de calor entre la herramienta, pieza de trabajo y ambiente.
- La fricción entre la pieza de trabajo y la herramienta, etc.
- La velocidad de deformación utilizada.

La figura 2.17 muestra un diagrama con la información necesaria previo al modelado [13].

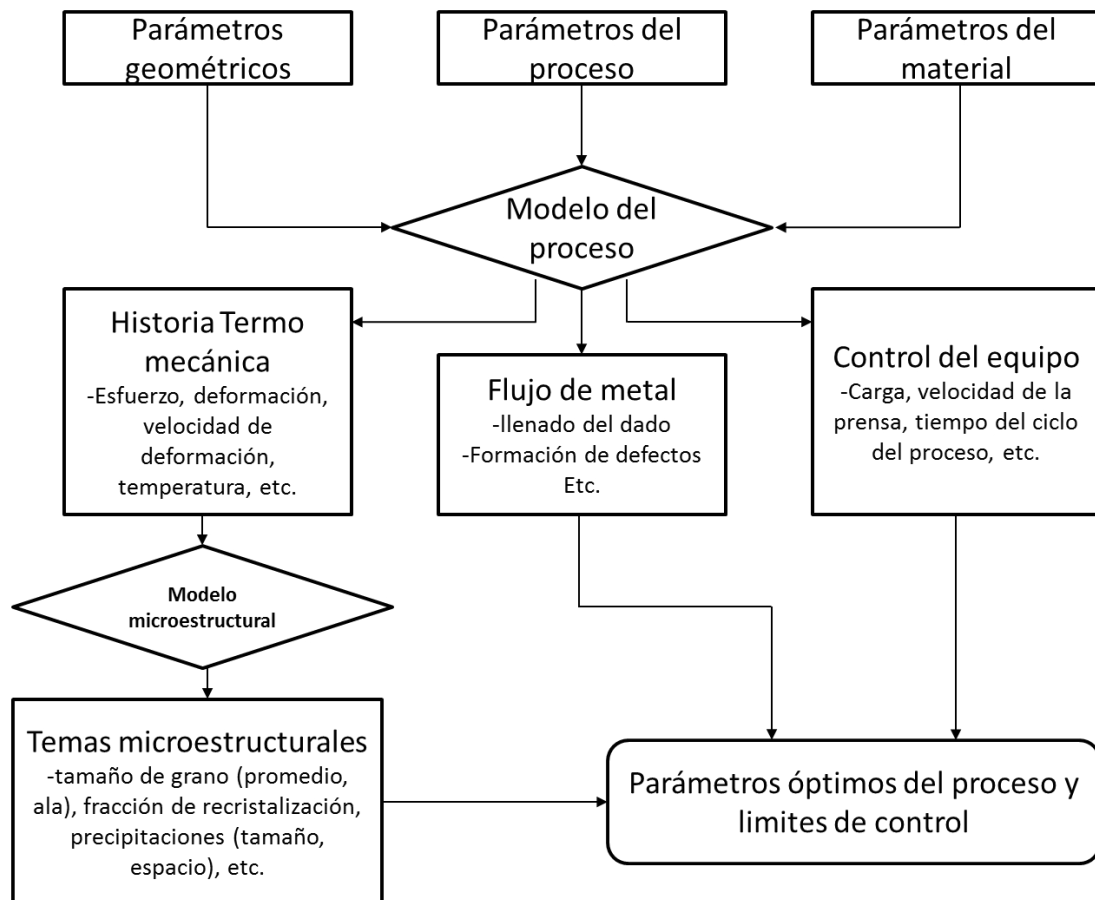


Figura 2.17. Diagrama de la información necesaria previo al modelado con simulación [13].

Propiedades del material (pieza de trabajo y herramienta): para predecir el flujo del metal y cargas es necesario contar con información confiable de la relación esfuerzo-deformación o curva de fluencia que es generalmente obtenida de ensayos de compresión otra alternativa es el ensayo de torsión [13].

En la simulación se puede considerar las herramientas como rígidas, la deformación y el esfuerzo en las herramientas no se consideraría. En operaciones de forja de mucha precisión deformaciones elásticas relativamente pequeñas en los dados puede influir en las condiciones de carga térmica y mecánica [13].

El esfuerzo de fluencia en la pieza de trabajo es muy importante para la correcta predicción del flujo del metal, está definida en función de la deformación, velocidad de deformación, temperatura, posibles comienzos de microestructura. El módulo de Young y Poisson están en función de la temperatura y expansión térmica [13].

Condiciones de interface en fricción y transferencia de calor entre la pieza de trabajo y la herramienta tienen un significativo efecto en flujo del metal y las cargas requeridas para producir la pieza.

2.10 Acero AISI 8630

El acero es una aleación de hierro y carbono con el contenido de carbono desde muy porcentaje de carbono hasta 2.0% en peso, y otra cantidad de elementos aleantes alrededor de 5% en peso en aceros de baja aleación, y mayor en aceros aleados como aceros para herramientas o aceros inoxidables, los aceros pueden tener una amplia variedad de propiedades dependiendo de su composición química como su fases microestructurales presentes, las cuales cambiaran dependiendo su tratamiento térmico [43].

Los aceros aleados son aquellos que contienen en su composición elementos como por ejemplo: cromo, vanadio, tungsteno, niobio, molibdeno o níquel, estos elementos se le llaman elementos aleantes en el acero y son incorporados en aceros por una o más de las siguientes razones [44]:

- Para mejorar las propiedades mecánicas en el endurecimiento y que permiten una mayor temperatura para revenido cuando mantiene alta resistencia e incrementa ductilidad.
- Para incrementar propiedades mecánicas a elevadas o bajas temperaturas.
- Para incrementar resistencia a ataques químicos y para elevar la temperatura a la oxidación.
- Para influenciar otras propiedades especiales como permeabilidad magnética.

Generalmente son sometidos a tratamientos térmicos para modificar sus propiedades.

El acero AISI 8630, es un acero de baja aleación considerado como de medio porcentaje de carbono, para temple directo. Pueden templarse en agua para piezas de secciones moderadas o en aceite para las pequeñas [45].

La aleación AISI 8630 se utiliza ampliamente en aplicaciones de campos petroleros. Algunos ejemplos de aplicación pudieran ser: conectores, soportes, bloques de válvulas, bielas, palancas, puntas de ejes, ejes de transmisión, tornillos, tuercas [45].

Tabla 2.1. Composición química acero AISI 8630 [45] :

Elemento	Mn	Cr	Ni	C	Si	Mo	S	P
Cont. (%)	0.70-	0.40-	0.40-	0.28-	0.15-	0.15-	≤ 0.04	≤ 0.035
	0.90	0.60	0.70	0.33	0.35	0.25		

Donde tiene como principales elementos aleantes el Cr, Mo y Ni, sus funciones primarias se describen a continuación:

Tabla 2.2. Principales elementos aleantes acero AISI 8630 [46].

Elemento	Función Primaria
Cromo	Es utilizado para incrementar la templabilidad, provee resistencia a la abrasión. Es formador de carburos estables, este carburo es relativamente estable a altas temperaturas y tiene una excepcional resistencia al desgaste.
Molibdeno	Tiene un gran efecto en templabilidad. Tiene un gran efecto para aumentar la resistencia a alta temperatura y resistencia <i>creep</i> en aleaciones ferrosas.
Níquel	Níquel es uno de los elementos aleantes fundamentales en el acero, provee entre otras ventajas, incrementos en tenacidad, particularmente a bajas temperaturas, disminuye la distorsión durante el proceso de templado e incrementa la resistencia a la corrosión. El níquel disminuye las temperaturas críticas de transformación del acero, retarda la descomposición de la austenita y no es formador de carburos u otros compuestos que se pueda dificultar disolver durante el calentamiento en el austenizado.

Los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (CCT) se usan para predecir la microestructura y dureza luego de los tratamientos térmicos o para especificar el tratamiento térmico que logrará una microestructura y dureza

deseada. Estos diagramas representan la transformación de la fase austenita durante el enfriamiento a diferentes velocidades.

En la figura 2.18 se observa el diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT) para un material AISI 8630 con la composición: 0.3 C, 0.8 Mn, 0.02 P, 0.02 S, 0.25 Si, 0.55 Ni, 0.5 Cr, 0.2 Mo. Apreciando las posibles fases microestructurales presentes en la aleación, dependiendo la velocidad de enfriamiento en el temple después de un austenizado, pudiendo obtener fases como: ferrita, perlita, bainita y martensita.

En el tratamiento de térmico de templado se busca transformar a una microestructura martensítica en su matriz, por lo que se utilizan altas velocidades de enfriamiento para lograrlo.

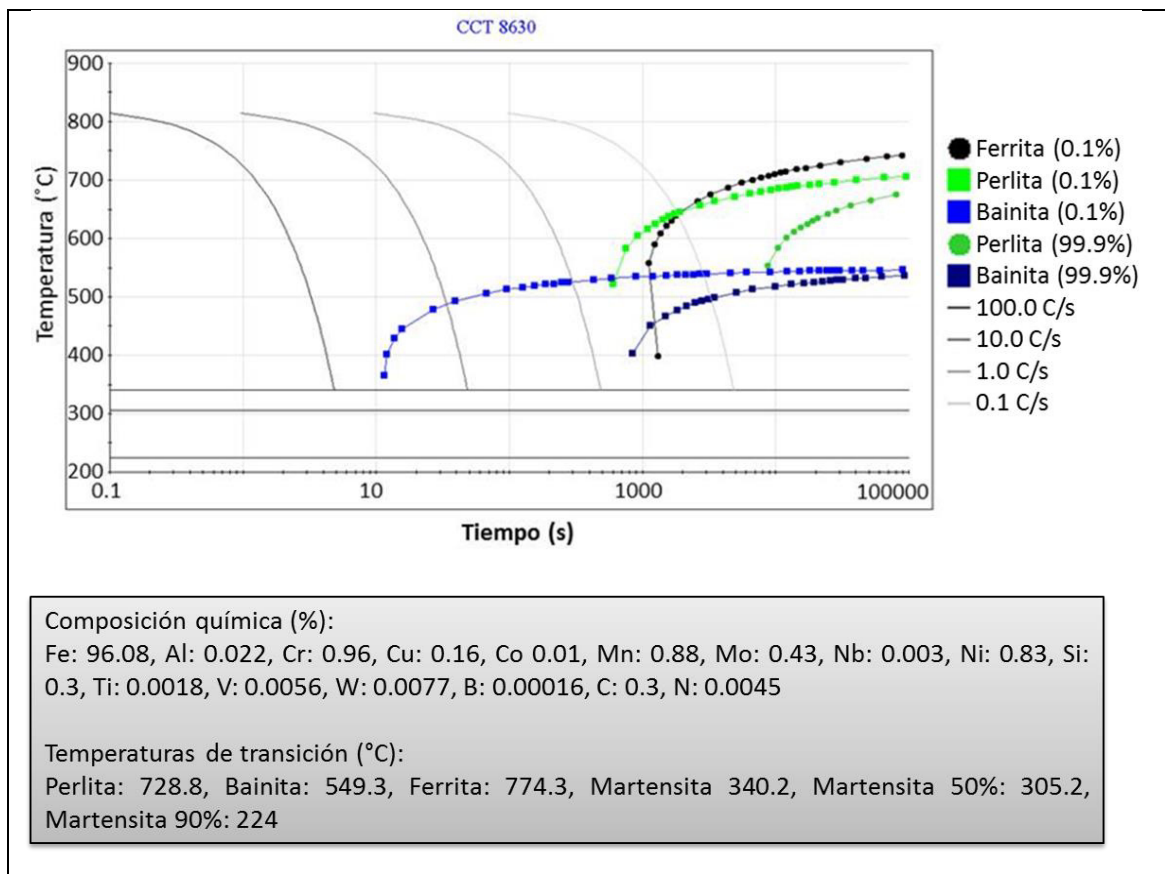


Figura 2.18. Diagrama CCT para acero AISI 8630 [45].

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Este trabajo de investigación se basa en el estudio de la anisotropía en las propiedades mecánicas en discos forjados fabricados con diferentes pasos de forja.

La metodología experimental de este trabajo se clasifica en:

- Diseño y desarrollo de muestras de discos forjados.
- Extracción y preparación de probetas.
- Realización de ensayos.
- Validación con modelado numérico.

3.2 Diseño y desarrollo de discos

La presente investigación caracteriza cinco discos forjados en caliente de material tipo AISI 8630 de 254 mm (10 pulgadas) de altura por 508 mm (20 pulgadas) de diámetro, bajo los siguientes parámetros de trabajo:

3.2.1 Material

El material es un acero de baja aleación tipo AISI 8630 proveniente de un lingote de fundición por arco eléctrico. En la Tabla 3.1 se muestra su composición química.

Tabla 3.1. Composición química del acero de baja aleación tipo AISI 8630.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu
0.29	0.30	0.88	0.96	0.43	0.83	0.16

El acero ha cobrado una mayor importancia debido a su demanda en el campo petrolero, por ello el interés de realizar el estudio en este material.

3.2.2 Etapa de deformación

El proceso de forjado fue realizado en prensas hidráulicas con capacidad de 1000 toneladas y una velocidad de 250 mm/seg, utilizando hornos de gas para el calentamiento de las piezas, y lubricando las piezas con estracita previo al deformado. El Trabajo mecánico se realizó en tres pasos.

Paso número 1 consiste de un primer estirado, los 5 discos tienen esta deformación, el lingote inicial proveniente de fundición fue sometido a un trabajo mecánico de tipo *cogging* con reducción de perfil 990.6 mm (39 pulgadas) a 508 mm (20 pulgadas) (red 3.8), a una temperatura de 1100 °C con dados planos. Después se realizaron 5 cortes de esta barra forjada con sierra cinta a una distancia de 254 mm (10 pulgadas), correspondiente de la altura de los 5 discos, como se muestra en la figura 3.1, solamente el disco número 1 no llevó los pasos de deformación 2 y 3.

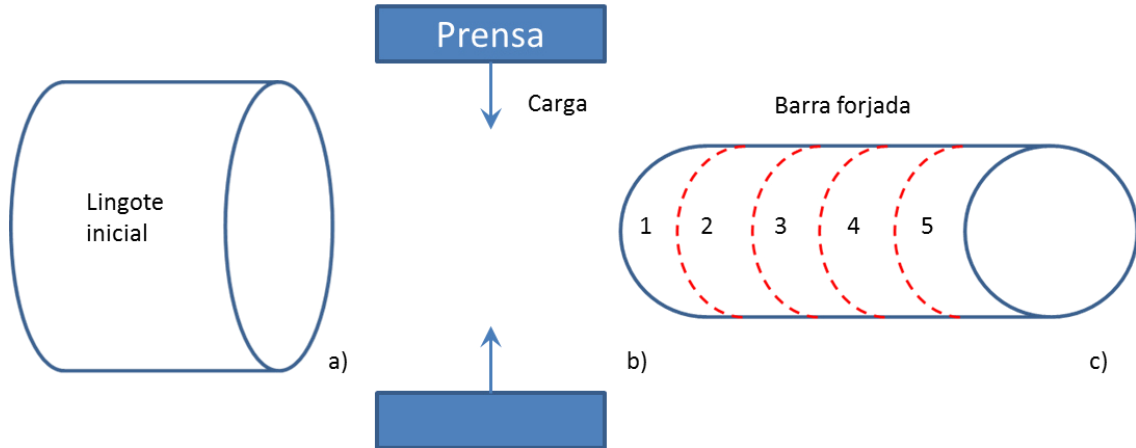


Figura 3.1. Esquema del paso 1 deformación de estirado tipo *cogging* y segmentado de barra, a) lingote inicial, b) se aplica carga para reducción de forja, c) barra forjada.

La reducción de forja tipo *cogging* para este primer paso fue de 3.8, y se calcula dividiendo el área transversal de la barra inicial (A_i) entre el área transversal de la barra final (A_f), como se muestra en la figura 3.2

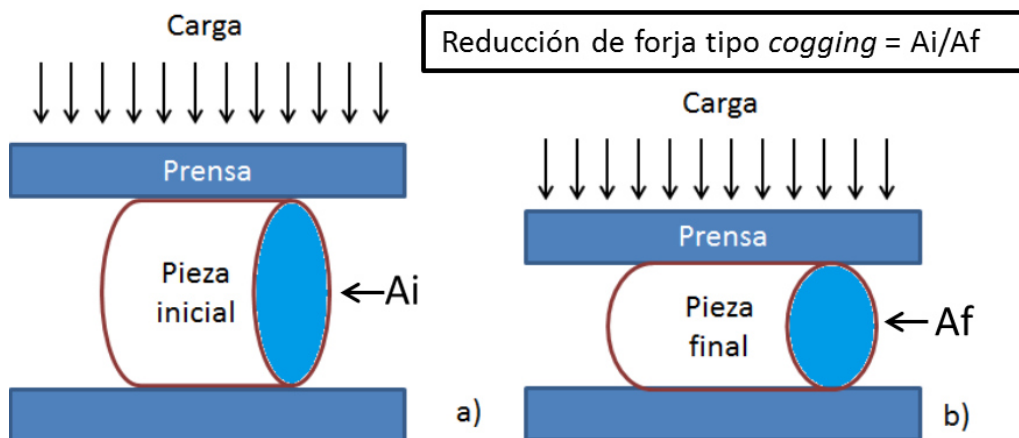


Figura 3.2. Esquema de reducción de forja tipo *cogging*, a) pieza inicial, b) pieza final.

Paso número 2 consta de un segundo estirado con una reducción de tipo *cogging*, el proceso de forja fue descrito anteriormente en las figuras 3.1 y 3.2. En este paso se calentó el material a una temperatura de 1100°C, la cantidad

de reducción que se le aplicó varió dependiendo el número de prueba. En la Tabla 3.2 muestra las distintas reducciones, todas partiendo de un diámetro inicial de 508 mm (20 pulgadas).

Tabla 3.2. Diámetros y reducciones, deformación tipo *cogging*.

Disco N°	Diámetro final - mm (pulgadas)	Reducción <i>cogging</i>
2	457.2 (18)	1.23
3	406.4 (16)	1.56
4	304.8 (12)	2.78
5	254 (10)	4.00

Paso número 3 consta de una deformación tipo *upsetting* a una temperatura inicial de 1100 °C, la cantidad de reducción varía dependiendo el número de disco. El cálculo de reducción de dicho proceso se realiza dividiendo la altura inicial (L_i) entre la altura final (L_f), en la figura 3.3 se describe el proceso de forja tipo *upsetting*.

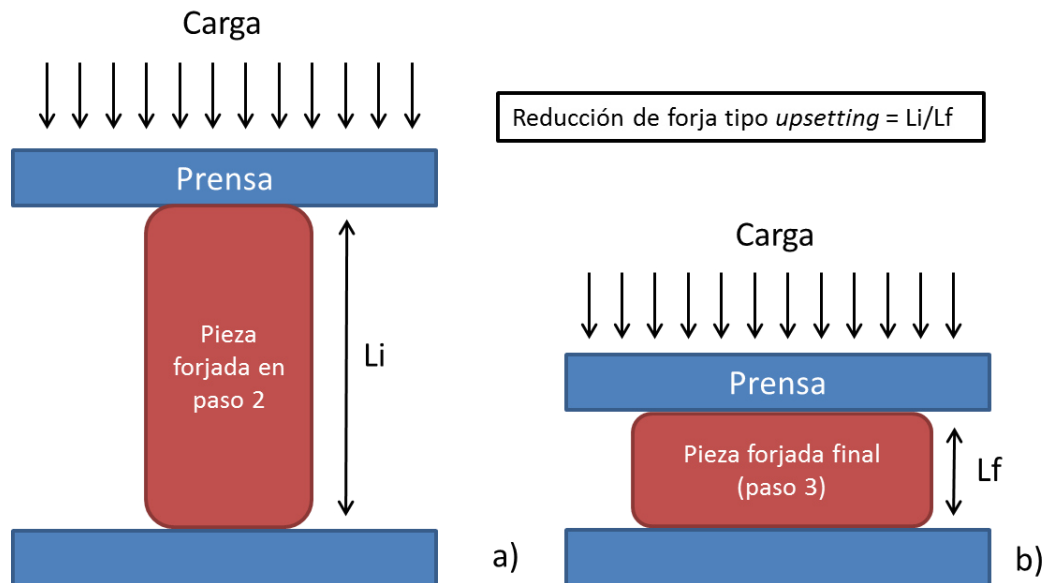


Figura 3.3. Deformaciones tipo *upsetting*, a) pieza forjada en paso 2, b) pieza forjada final.

A continuación en la Tabla 3.3 se describen las reducciones tipo *upsetting* aplicadas en cada disco, todos terminaron con una altura final de 254 mm (10 pulgadas).

Tabla 3.3. Alturas y reducciones, deformación tipo *upsetting*.

Disco N°	Altura inicial - mm (pulgadas)	Reducción <i>upsetting</i>
2	317.5 (12.5)	1.25
3	381 (15)	1.5
4	508 (20)	2.0
5	762 (30)	3.0

El pasó de deformación 2 y 3 se hicieron en el mismo calentamiento.



Figura 3.4. Imágenes de piezas antes y después de la deformación por *upsetting*.

Todas las piezas tienen la misma dimensión final 254 mm (10 pulgadas) por 508 mm (20 pulgadas) en diámetro, varían en el contorno por el abarrilamiento.

En la Tabla 3.4, se muestra un resumen de los tipos y cantidades de reducción que llevó cada uno de los discos.

Tabla 3.4. Resumen de reducciones de forja en cada disco.

Prueba	Reducción de forja estirado (paso 1)	Reducción de forja estirado (paso 1+2)	Reducción de forja <i>upsetting</i> (paso 3)	Reducción total
1	3.8	3.8		3.8
2	3.8	4.69	1.25	5.9
3	3.8	5.94	1.5	8.9
4	3.8	10.56	2	21.1
5	3.8	15.21	3	45.6

3.2.3 Tratamiento térmico

Después de tener los 5 discos con las dimensiones finales de 254 mm (10 pulgadas) de altura y 508 mm (20 pulgadas) de diámetro, se procedió a realizar un tratamiento térmico característico de esta aleación. El cual consta primeramente de un tratamiento de normalizado para homogenizar la estructura en las secciones de la pieza, se trató a 900 °C por 5 horas, la relación del tiempo de empape dentro del horno fue de 0.5 hrs/pulgada y el medio de enfriamiento de este tratamiento es al aire quieto.

Posteriormente se realizó un tratamiento térmico de templeado a 875 °C por 7.5 horas, buscando transformar a una estructura martensítica, la relación del tiempo de empape en el horno fue 0.75 hrs/pulgada, utilizando agua como medio de enfriamiento. Seguido del temple se les da un tratamiento de revenido a 615 °C por 10 horas, para transformar la microestructura a una martensita revenida y la pieza no esté muy dura y frágil, la relación de tiempo de empape fue de 1 hr/pulgada, el medio de enfriamiento fue al aire quieto.

La figura 3.5 muestra la distribución de las 5 piezas durante los tratamientos térmicos.

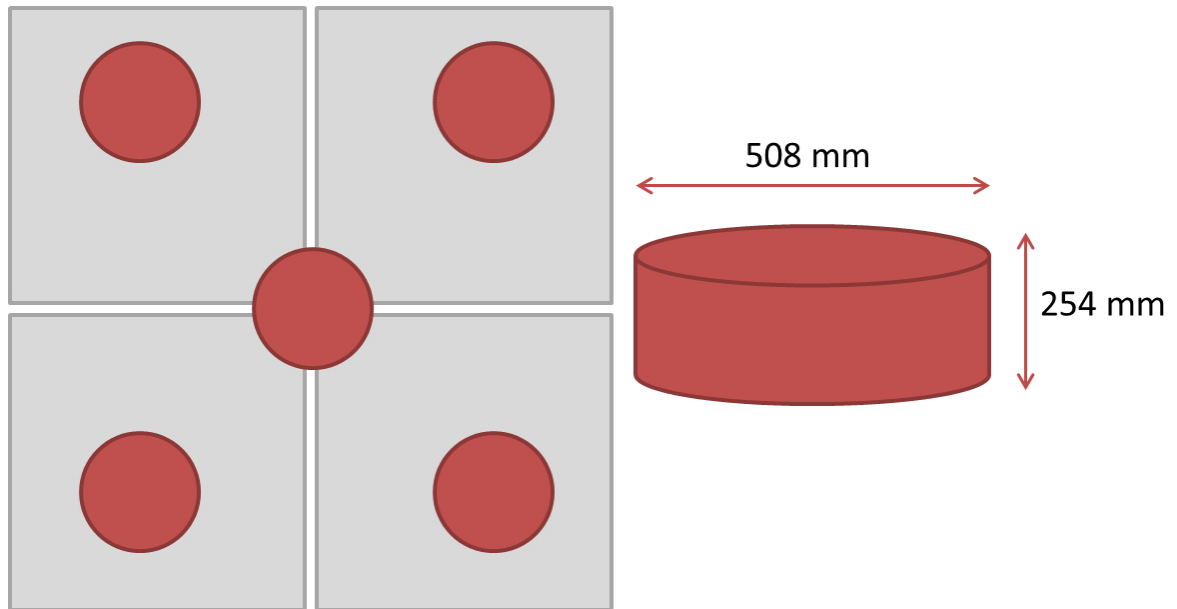


Figura 3.5. Esquema de distribución de piezas durante el tratamiento térmico.

3.3 Extracción y preparación de probetas

La extracción de probetas se obtuvo de distintas zonas del disco, a continuación se describen la extracción de los diversos tipos de prueba en los cinco discos forjados con su tratamiento térmico posterior.

3.3.1 Extracción de probetas para pruebas mecánicas

Las pruebas mecánicas se extrajeron en distintas zonas del disco como se explica en la figura 3.6 se obtuvieron en cuatro distintas posiciones y dos distintas orientaciones (axial y radial) siendo un total 8 pruebas por disco.

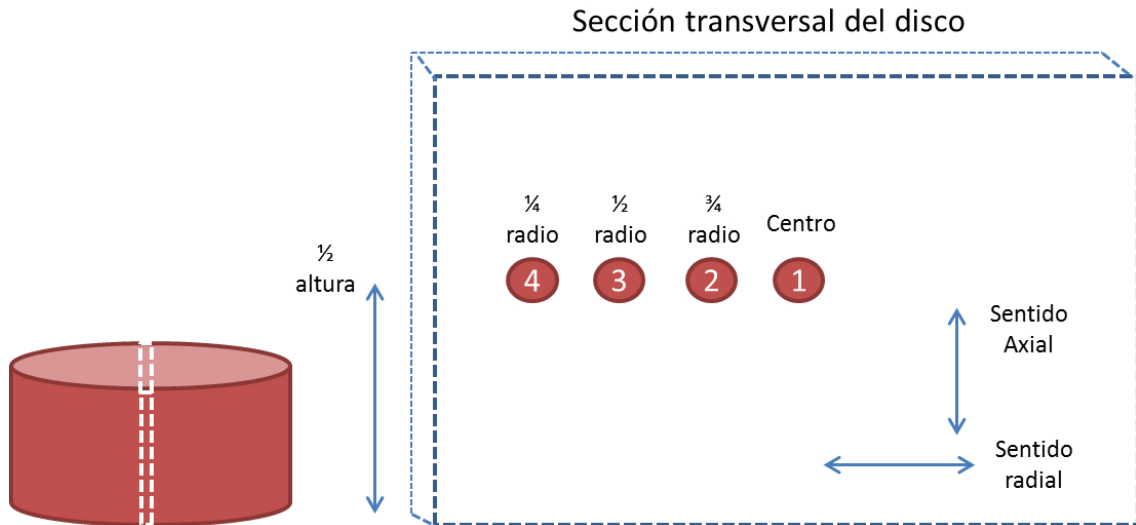


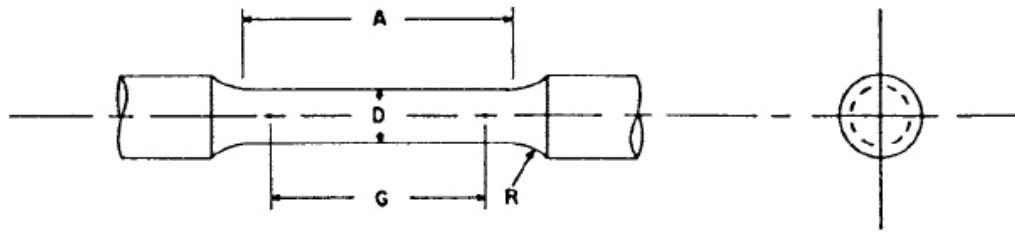
Figura 3.6. La figura muestra cómo fue la extracción de las probetas (tensión, impacto, dureza) en las distintas posiciones (1, 2, 3, 4) de la sección transversal del disco.

Las probetas que se obtuvieron son las siguientes:

- a) Probeta de tensión
- b) Probeta de impacto
- c) Segmento para prueba de dureza brinell y macroataque

- a) **Probetas de tensión.** Se obtuvieron las 8 probetas de cada uno de los discos y se prepararon de acuerdo a las normas ASTM A370 y ASTM E8 el tamaño elegido es el que se muestra en la figura 3.7 el cual concuerda más con las dimensiones de la pieza, la parte de sujeción de las probetas de tensión fueron preparadas con rosca [47].

Previo al maquinado de la probeta se dejó la pieza de 76.2 mm (3 pulgadas) de largo y una sección transversal de 12.7 mm (0.5 pulgadas) por 12.7 mm (0.5 pulgadas) para su posterior proceso de maquinado en un torno CNC.



Dimensiones de probeta de tensión		
Unidad	pulgada	mm
G – Area de prueba	1.000 ± 0.005	25.0 ± 0.10
D – Diametro	0.250 ± 0.005	6.25 ± 0.12
R – Radio	3/16	5
A – Largo de sección reducida	$1 \frac{1}{4}$	32

Figura 3.7. Medidas de probeta de tensión utilizada en este trabajo.

- b) **Probetas de impacto** se obtuvieron los 8 set de probetas de cada uno de los discos y se prepararon de acuerdo a las normas ASTM A370 y ASTM E23 el tamaño elegido es el que se muestra en la figura 3.8 que es el tamaño que más concuerda con las dimensiones de la pieza, la muesca de las probetas fuera preparadas en forma V [47].

Previo al maquinado de la probeta se dejó la pieza de 63.5 mm (2.5 pulgadas) de largo y una sección transversal de 12.7 mm (0.5 pulgadas) por 12.7 mm (0.5 pulgadas) para su posterior proceso de maquinado en una fresadora CNC.

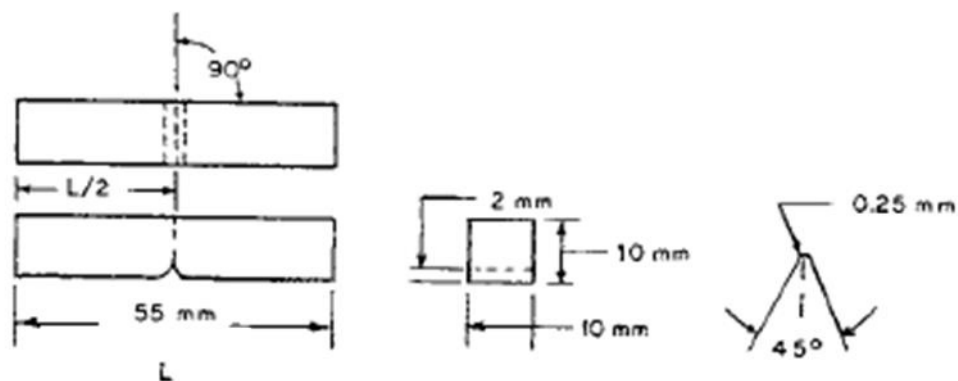


Figura 3.8. Medidas de probeta de impacto utilizada en este trabajo.

- c) **Segmento para ensayo dureza brinell y macroataque** se obtuvo de la sección transversal de la pieza como se muestra en la figura 3.9, se segmentó una laja de 25.4 mm (1 pulgada) de espesor después se le dio un pulido con lijas abrasivas para su posterior ensayo en el caso de la prueba de dureza, para el ensayo de macroataque se atacó la muestra con un agente reactivo para su posterior análisis visual [12].

Todos los cortes se realizaron con maquina sierra cinta con sistema de lubricación por medio de soluble.

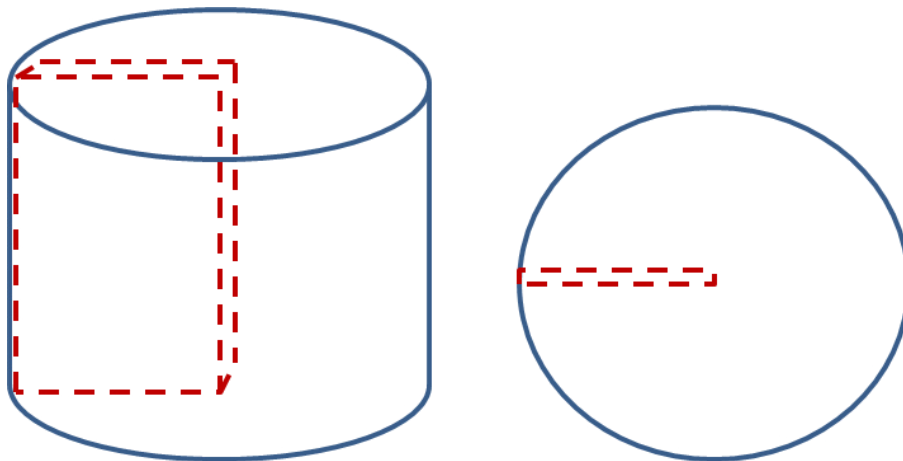


Figura 3.9. Extracción de laja para mapeo de dureza y macroataque.

3.3.2 Pruebas químicas y microestructurales

Para seleccionar las zonas de extracción de probetas para las pruebas microestructurales se basó en la figura 3.6 previamente explicada que consta de cuatro posiciones y fue exactamente igual que las pruebas mecánicas de tensión e impacto con equipo de sierra cinta. La extracción es menos compleja ya que las dimensiones de la muestra son de menor tamaño en comparación a las pruebas mecánicas, la variante principal de estas pruebas fue su preparación.

Las pruebas químicas y microestructurales realizadas son las siguientes:

- a) Análisis químico
- b) Microestructura

a) Análisis Químico, la muestra para análisis químico consta de un cubo de 25.4 mm (1 pulgada) en cada uno de sus lados y se pule la cara a analizar con lija abrasiva de carburo de silicio con número de grano 60 hasta quitar cualquier presencia visible de defectos como fisuras o poros [48].

b) Microestructura, la muestra a analizar es de las mismas dimensiones de un cubo de 25.4 mm (1 pulgada) en sus lados, y la preparación es por medio de un número de lijas yendo de una lija gruesa e ir cambiando a una lija cada vez más fina, rotando 90° la muestra entre cada cambio de lija, seguido se pule con un paño y un abrasivo de polvo de diamante para tener un acabado espejo en la muestra, después se ataca la muestra con un agente reactivo, en este caso Nital al 3%, con este último paso termina la preparación y se puede proceder con la evaluación. La preparación de la muestra fue en base a la especificación ASTM E3 [49].

3.4 Realización de ensayos.

Respecto a la realización de ensayos, se llevaron a cabo diversos tipos de ensayos mecánicos, microestructurales y químicos que describen en esta sección, se realizaron en cada uno de los discos y fueron realizados de acuerdo a su especificación de la ASTM.

3.4.1 Pruebas mecánicas

a) Ensayo de Tensión: Este ensayo fue realizado conforme la especificación ASTM E8, el ensayo se llevó a cabo a temperatura ambiente con la máquina universal. Con dicho ensayo podemos obtener

propiedades tales como esfuerzo máximo, esfuerzo de cedencia, elongación y reducción de área [50].

Los ensayos se llevaron a cabo bajo parámetros estandarizados de velocidad de deformación en la maquina controlada por un software, el esfuerzo máximo es calculado directamente por el software al igual que el esfuerzo de cedencia con ayuda de un equipo extensómetro, el porcentaje de elongación y reducción de área fue analizado por personal técnico calificado.

- b) Ensayo de Impacto:** también conocido como CVN por su siglas en Ingles (*Charpy "V" Notch*) este ensayo fue realizado conforme la especificación ASTM E23, el ensayo se llevó a cabo a una temperatura de -30°C , enfriando las probetas con un equipo criogénico, y el propio ensayo fue realizado con la máquina de impactos Charpy [51].

Las propiedades que se pueden obtener a partir de este ensayo son la energía absorbida y porcentaje de corte en la fractura de la muestra, lo cual nos indican que tan frágil o dúctil es el material. La energía es directamente calculada con ayuda del equipo y su software, mientras el porcentaje de corte es analizado por personal técnico calificado.

- c) Dureza Brinell:** Este ensayo fue realizado conforme la especificación ASTM E10, en la sección transversal de las piezas, el ensayo se llevó a cabo a temperatura ambiente con un durómetro fijo y la medición de la huella fue medida por medio de una cámara la cual mide ocho puntos del diámetro de la huella, el análisis y el ensayo fueron realizados por personal técnico calificado [52].

3.4.2 Pruebas químicas y microestructurales

- a) **Macroataque:** se realizó un ataque con un agente reactivo (solución con 40% de HCl y 60% de agua) con la finalidad de revelar el flujo de grano en cada uno de los discos forjados, el método es descrito por la norma ASTM E381 [12].

- b) **Análisis químico:** este ensayo realiza con equipo que utiliza como método arco eléctrico por chispa, este equipo nos da lectura de una serie de elementos como por ejemplo C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, la atmosfera en el equipo es controlada con un gas inerte (argón), esta prueba fue realizada bajo la norma ASTM E415 [48].

- c) **Microestructura:** Este ensayo se evalúa con un Microscopio Óptico y se evaluaron las muestras con distintos aumentos 50x, 100x, 200x, la evaluación de la microestructura es descrita por la norma ASTM E407 [53].

3.5 Modelado numérico

Se efectuó una investigación de avances en temas relacionados con simulación de flujos de grano y se produjeron simulaciones con el fin de entender más la relación del flujo con las propiedades mecánicas.

El análisis de elemento finito se realizó en el último paso de deformación (deformación tipo *upsetting*) siendo este último paso el que más influye en flujo final y fue utilizado para determinar el flujo preferencial de grano de cada forja en relación a la cantidad de deformación y su distinta velocidad de deformación.

Se desarrollaron cuatro modelos numéricos de un proceso de forja utilizando el programa DEFORM ®, donde la diferencia entre ellos fue la distinta reducción

de forja de cada disco, fue necesario un análisis térmico y mecánico de un acero tipo AISI 8630.

La geometría simulada fue de las mismas medidas que los discos reales, medida final de 254 mm (10 pulgadas) de altura por 508 mm (20 pulgadas) de diámetro, el modelo se realizó en una simplificación en 2 dimensiones en un plano axisimétrico con la finalidad de agilizar los cálculos.

Se analizó el material tipo AISI 8630 como elemento plástico en la pieza a estudiar, la información mecánica, térmica y física de dicho material se obtuvieron mediante el programa JMatPro® (figura 3.10 y 3.11).

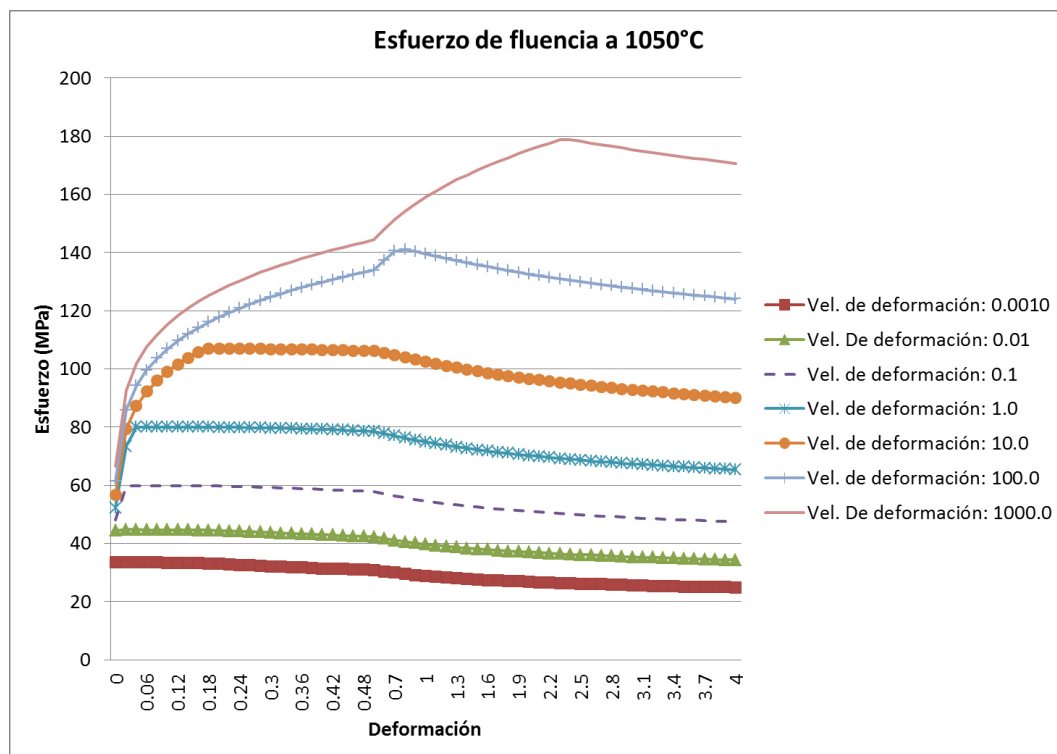


Figura 3.10. Comportamiento mecánico de material tipo AISI 8630 a 1050°C en distintas velocidades de deformación, obtenido mediante software JMatPro®.

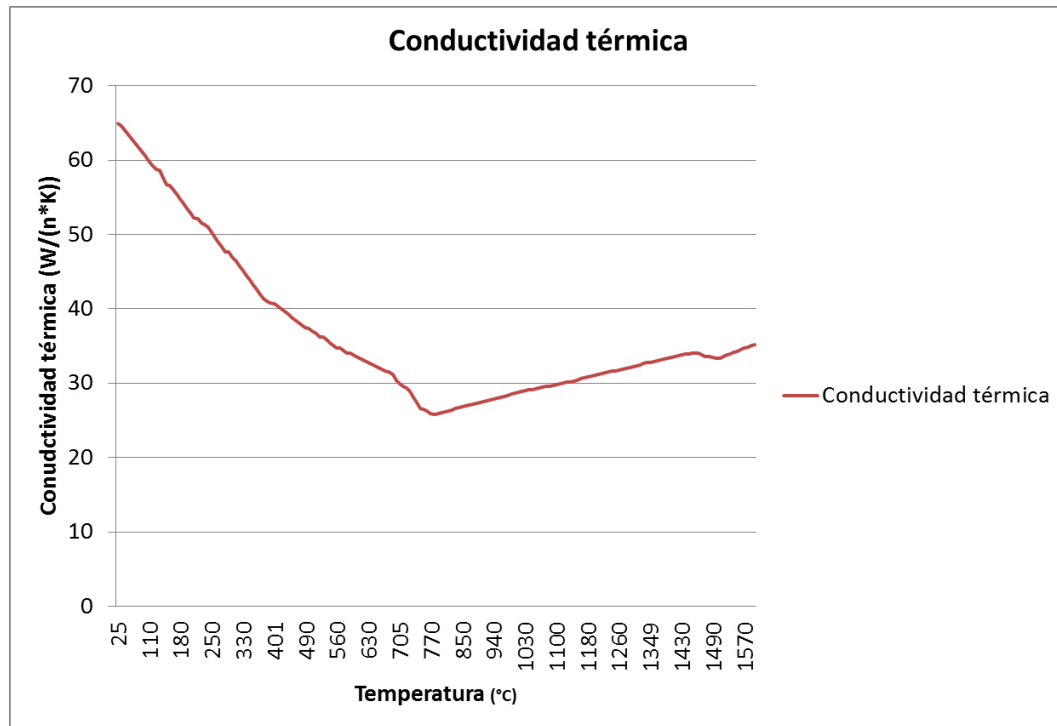


Figura 3.11. Conductividad térmica de material tipo AISI 8630 a distintas temperaturas, obtenido mediante software JMatPro ®.

El modelo consta de dos dados planos uno fijo en la parte inferior y uno móvil en la parte superior (dato principal). El material que se consideró para los dados herramienta es un acero H13 (grado común de herramienta), los dados se analizaron como elementos rígidos y la temperatura de trabajo fue de 25°C considerada como temperatura ambiente.

La deformación del modelo está en función del desplazamiento del dato principal a una velocidad 250 mm/sec (capacidad de la prensa hidráulica).

Se desarrollaron 4 modelos cada uno de ellos con distintas reducciones de forja, dentro de las principales características del modelo se encuentran la cantidad de elementos con las que cuenta cada modelo, tuvieron alrededor 2100 elementos, con una relación de elementos de 4:3. El criterio de cedencia utilizado fue el de Von Mises.

Se definieron condiciones de intercambio de calor en las fronteras de la pieza, se considera una temperatura ambiente de 25°C , con un coeficiente de convección de $0.02 \text{ N/s/mm}^{\circ}\text{C}$.

El modelo se desarrolló mediante un modelo matemático *lagrangiano incremental*, analizando la deformación y transferencia de calor utilizando el solucionador de matrices *skyline* (método para agilizar la resolución de sistemas de ecuaciones). Se seleccionó como método de iteración el modelo newton-raphson.

En las Interacciones entre pieza-herramienta, se utilizó un coeficiente de fricción 0.7 de tipo corte (coeficiente típico de forja) siendo el de mayor similitud con el contorno final de las piezas reales y un coeficiente de transferencia de calor entre las interfaces de $11 \text{ N/s/mm}^{\circ}\text{C}$.

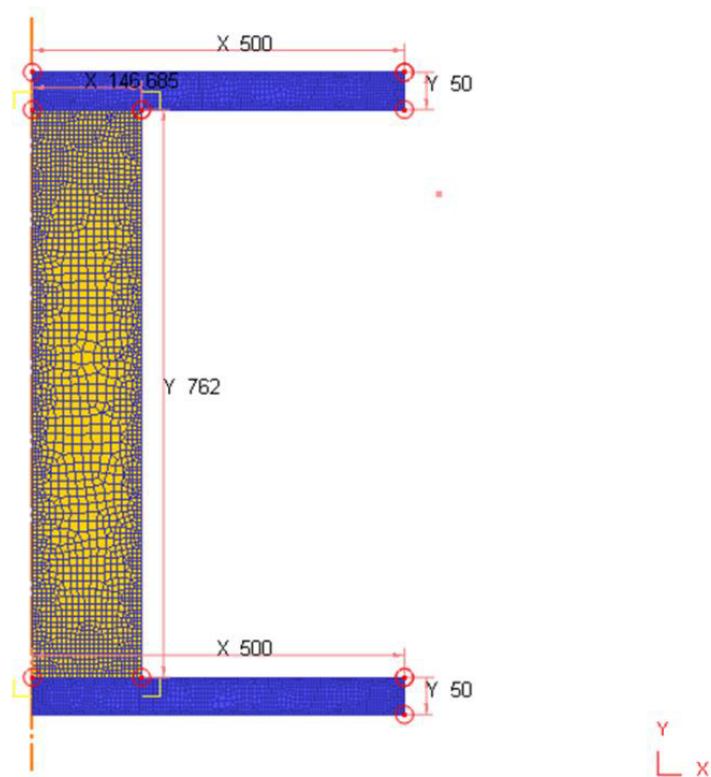


Figura 3.12. Modelo numérico mediante elementos finitos del proceso de forja.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización mecánica y microestructural de los cinco discos forjados de acero AISI 8630, cada uno de ellos fue forjado mediante distintos pasos de forja teniendo distintos flujo de metal en cada uno, la razón de esta caracterización es ver el efecto anisotrópico que presentan los discos ante la distinta deformación.

4.2 Ensayo de macroataque

Primeramente se realizó un ensayo de macroataque en la sección transversal de las piezas para evaluar visualmente el flujo del metal como se muestra en la figura 4.1. En la figura 4.2, se muestra el disco número 1 (reducción forja 1) donde el flujo se encuentra alineado en la dirección axial, este disco fue el único que solo llevó reducción de tipo *cogging*, en los demás discos que tuvieron adicionalmente reducción de tipo *upsetting* el flujo se vuelve un poco más complejo y es difícil evaluar visualmente ya que las líneas de flujo se revelan muy tenuemente, aun si da indicios de como es el flujo preferencial de grano para poder relacionarlo con las propiedades mecánicas.

También se observan cambios en el contorno de los discos, el llamado *abarrilamiento*, causado por la interacción de fricción entre disco-herramienta, conforme aumenta la reducción por *upsetting* aumenta este efecto, figuras 4.2 a

4.6. Este efecto es debido a que las zonas de la pieza en contacto con los dados tienen menos desplazamiento lateral en comparación al resto del disco [13].

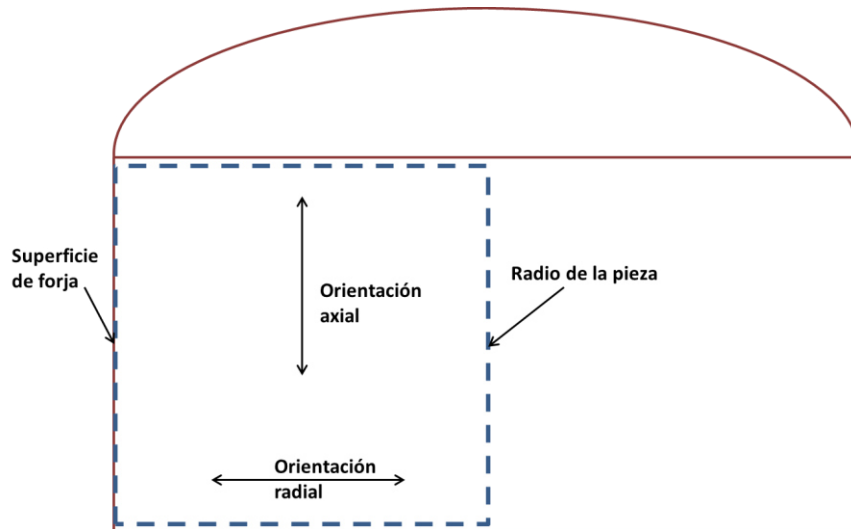


Figura 4.1. Laja transversal en los discos utilizada para realizar ensayo de macroataque.

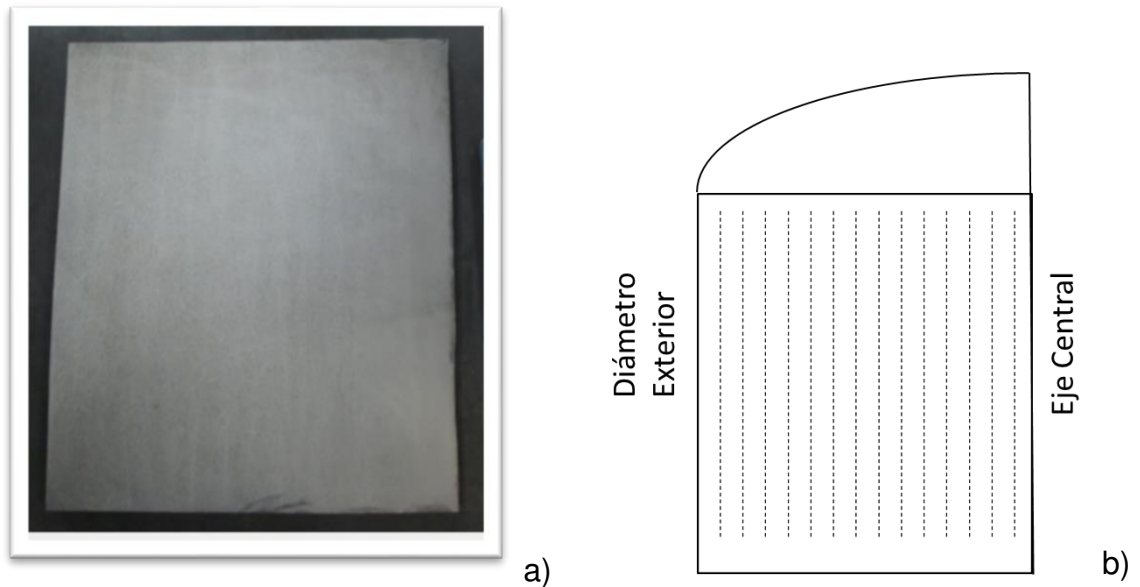


Figura 4.2. Disco 1 (reducción *upsetting* 1), a) fotografía real, b) esquema de flujo.

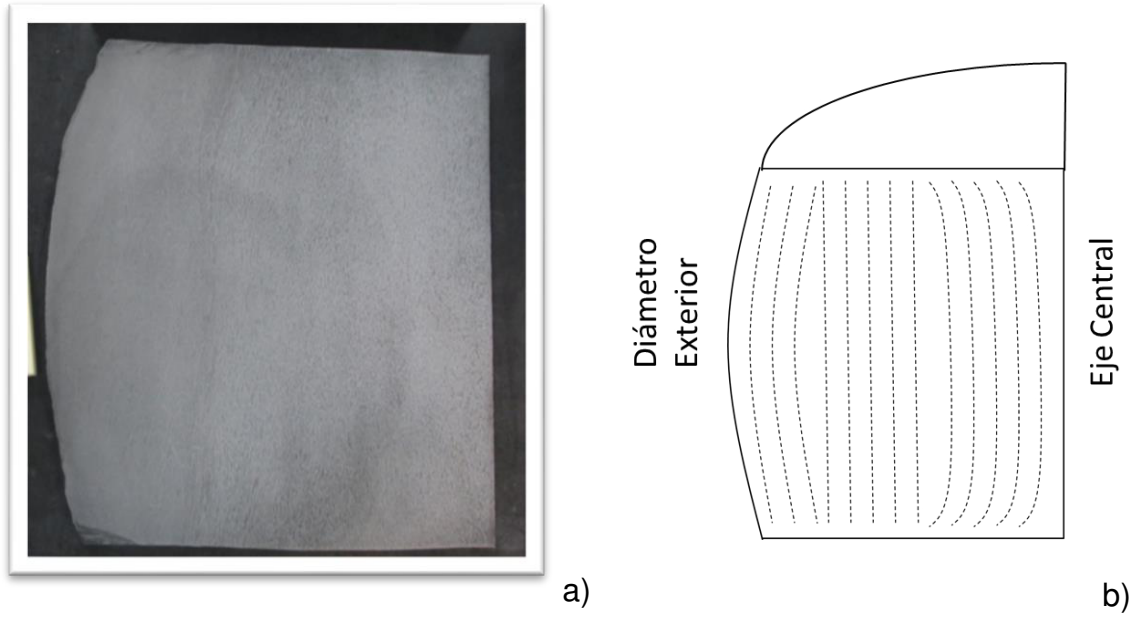


Figura 4.3. Disco 2 (reducción *upsetting* 1.25), a) fotografía real, b) esquema de flujo.

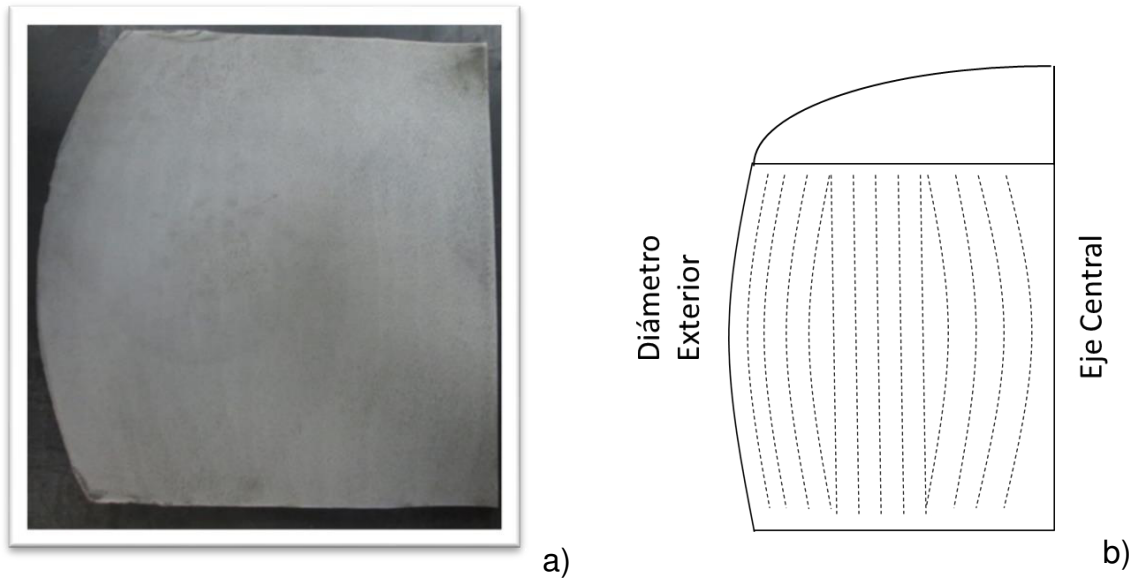


Figura 4.4. Disco 3 (reducción *upsetting* 1.5), a) fotografía real, b) esquema de flujo.

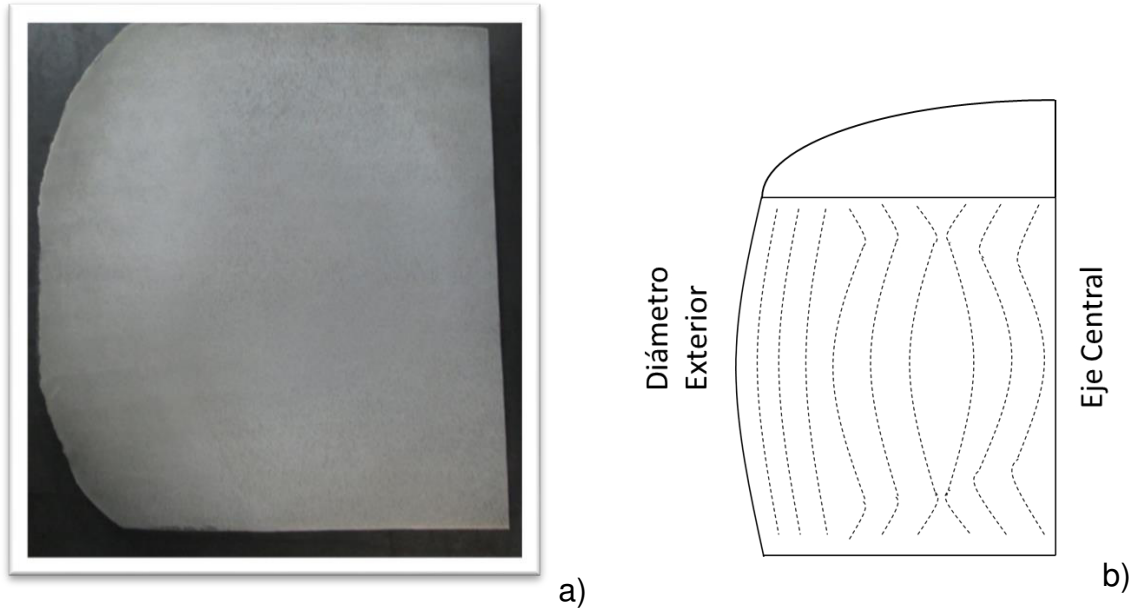


Figura 4.5. Disco 4 (reducción *upsetting* 2), a) fotografía real, b) esquema de flujo.

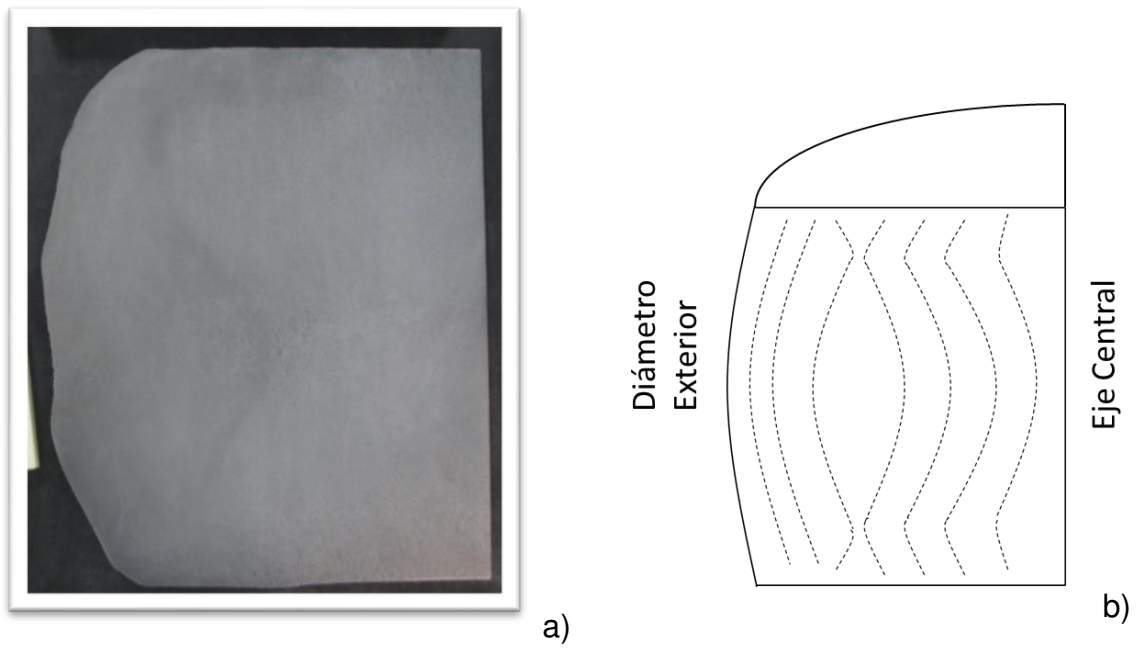


Figura 4.6. Disco 5 (reducción *upsetting* 3), a) fotografía real, b) esquema de flujo.

4.3 Pruebas Mecánicas

Esta sección es el motivo principal de la realización del estudio donde se analiza el efecto que tiene la anisotropía en las propiedades mecánicas, las pruebas que se realizaron fueron de resistencia a la tensión y energía de impacto, las cuales se examinan más a detalle a continuación.

4.3.1 Comparación anisotrópica por pieza

Se compararon las propiedades de esfuerzo de tensión y energía de impacto en cada disco individualmente en los dos sentidos analizados (axial y radial), para determinar el grado de anisotropía en cada uno de los discos.

4.3.1.1 Disco número 1 (reducción de forja 1)

El disco número 1, representa el disco que solo llevó reducción de forja tipo *cogging* sin reducción tipo *upsetting*, por lo que su sentido preferencial está orientado en el sentido axial (sentido preferencial de la barra forjada) como se observa en la figura 4.7.

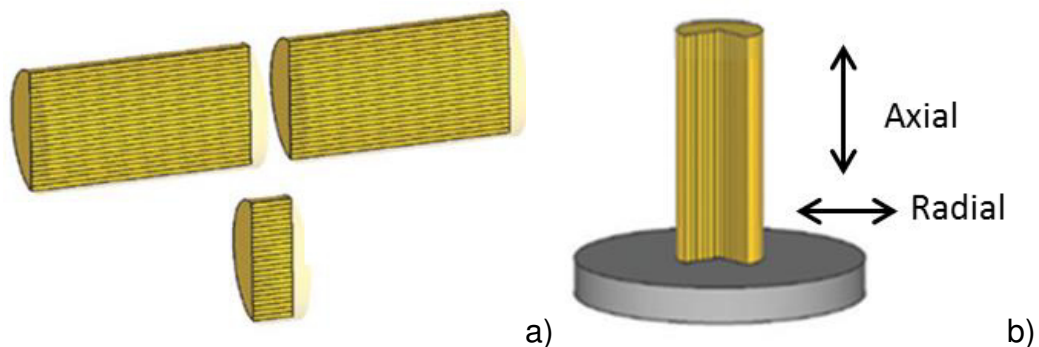


Figura 4.7. Sentido preferencial de disco número 1, a) barra forjada, b) disco.

En la figura 4.8 se grafican las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y energía de impacto para el disco número 1 en sus 4 distintas posiciones, donde se visualiza la diferencia anisotrópica en cada posición.

En la figura 4.8 a) se grafica la resistencia máxima sin encontrar alguna diferencia en la posiciones de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ radio, en las otras dos posiciones cercanas al centro del disco ($\frac{3}{4}$ radio y centro) presentan una anisotropía de hasta un 4.57%. En la figura 4.8 b) se observa qué la energía de impacto en todas las posiciones presenta una anisotropía y esta diferencia se incrementa en las posiciones cercanas a la superficie, teniendo valores de anisotropía desde un 51.72% hasta un 81.57% en la zona cercana a la superficie.

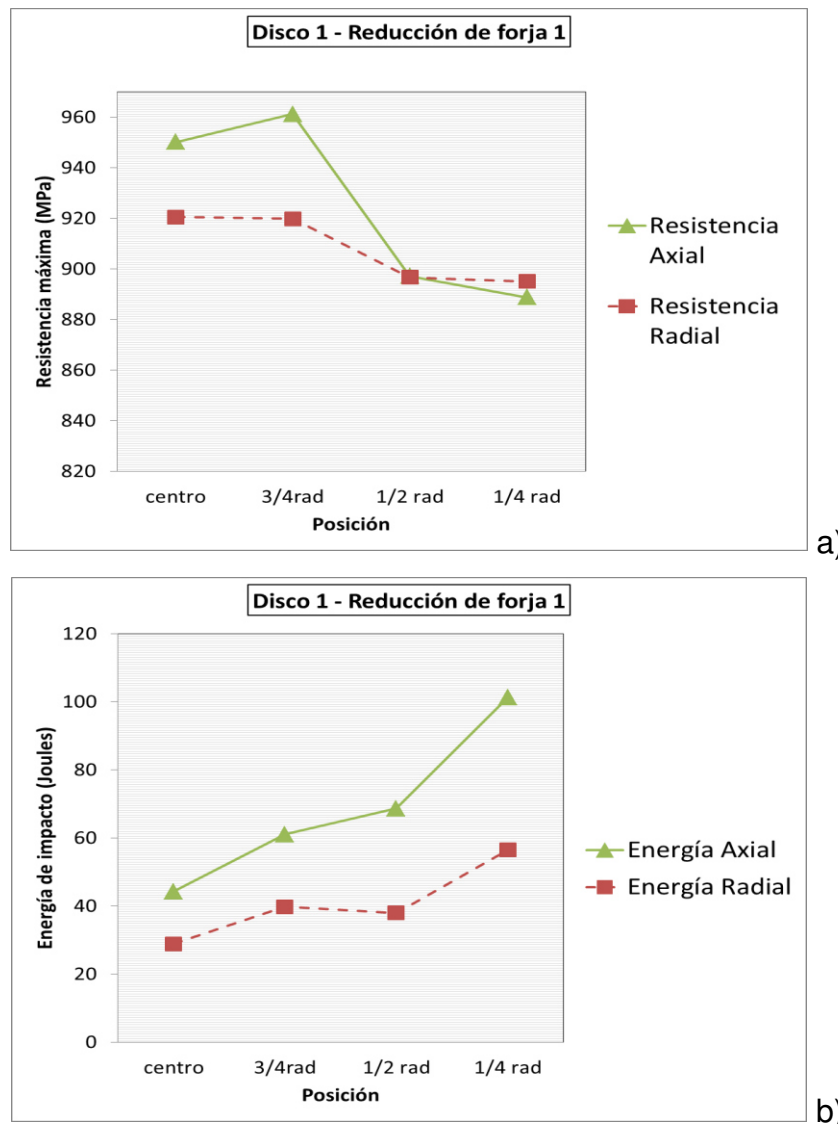


Figura 4.8. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial del disco número 1.

En ambas graficas de la figura 4.8, se aprecia que los valores más altos se encuentran en el sentido axial principalmente en la energía de impacto, esta diferencia de valores se debe a que el sentido axial es el sentido preferencial de la forja (sentido longitudinal), donde se requiere de más energía para que se lleve a cabo la fractura durante los ensayos mecánicos debido a que la propagación de la grieta no está a favor de este sentido [1].

En la Tabla 4.1, se presenta un resumen de las propiedades de resistencia a la tensión, energía de impacto y el grado de anisotropía presentado en cada posición, donde se aprecia que el sentido preferencial de la forja se encuentra en el sentido axial en las 4 posiciones analizadas.

Tabla 4.1. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 1 (reducción de forja 1).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía
Centro	950	920	3.26	44	29	51.72
$\frac{3}{4}$ radio	961	919	4.57	61	40	52.50
$\frac{1}{2}$ radio	897	896	0.11	69	38	81.57
$\frac{1}{4}$ radio	889	895	-0.67	101	56	80.35

En los resultados de energía de impacto, los valores más altos se observan en la zona más cercana a la superficie, como se mostró previamente en la figura 4.8 b), esto es debido a que la velocidad de enfriamiento durante el tratamiento térmico del temple es mayor en las zonas cercanas a la superficie que las del centro del disco, transformando un mayor porcentaje de la fase martensítica en el acero y teniendo una estructura más homogénea. En la figura 4.9 se puede apreciar que las zonas cercanas a la superficie son las zonas del disco que tienen un enfriamiento más rápido, mientras las zonas del centro del disco son las de enfriamiento más lento.

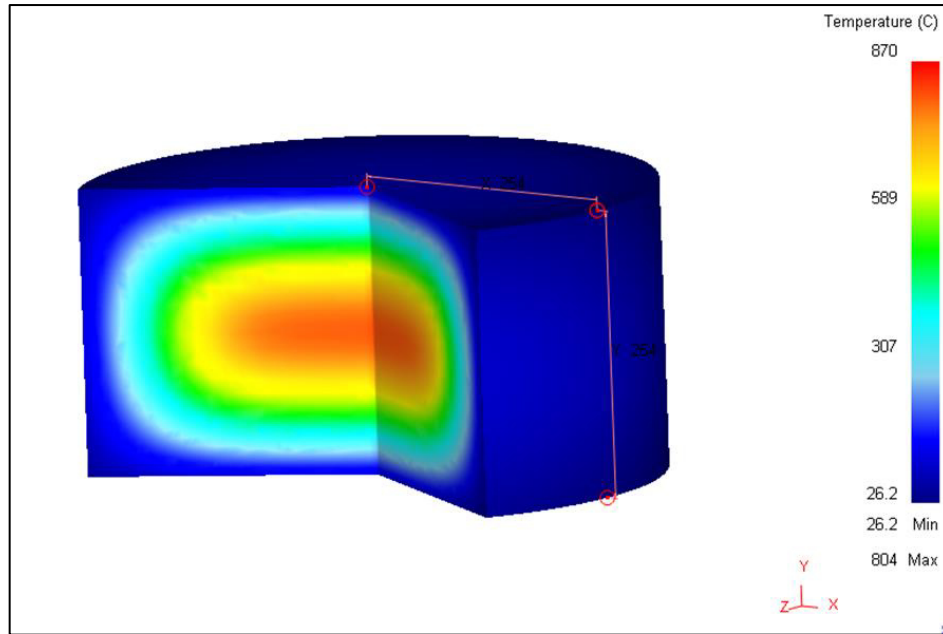


Figura 4.9. Modelo numérico del tratamiento térmico de templado en un disco forjado.

La grafica de la figura 4.8 a) no cumple con la regla de templabilidad donde los valores más altos se encuentran cerca de la superficie, ya que los valores más altos de resistencia se encuentran en el centro, en la sección 4.6 se discutirá este fenómeno.

4.3.1.2 Disco número 2 (reducción de forja 1.25)

El disco número 2, representa el disco que llevó una reducción de forja de 1.25, por lo que su sentido preferencial ya no está orientado en el sentido preferencial de la barra forjada como en el disco número 1 (sentido axial), este disco presenta distintos flujos en las distintas zonas del disco como se observa en la figura 4.10, así como el resto de los discos a estudiar que llevaron reducciones de forja de tipo *upsetting* (disco número 3 al 5).

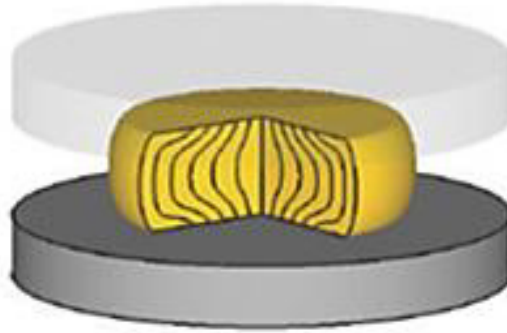


Figura 4.10. Patrón de flujos de disco con reducción de forja tipo *upsetting* [33].

En la figura 4.11 se grafican las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y energía de impacto para el disco número 2 en sus 4 distintas posiciones, donde se visualiza la diferencia anisotrópica en cada posición. En ambas graficas de la figura 4.11, se observa que los valores más altos de resistencia a la tensión y energía de impacto se encuentran en la zona más cercana a la superficie debido a que el tratamiento térmico de temple fue más efectivo en dicha zona al tener una mayor velocidad de enfriamiento, como se discutió previamente.

Este disco presenta una anisotropía donde los valores más altos se encuentran en el sentido axial (sentido preferencial de la barra) en todas las posiciones analizadas del disco, por lo que la reducción de forja de 1.25 no fue la suficiente para reorientar el flujo en otro sentido. En la figura 4.11 a) se tiene un porcentaje de anisotropía de un 2.5% en la posición de mayor variación y en la figura 4.11 b) se tuvieron variaciones de anisotropía de hasta un 24.39% para la energía de impacto.

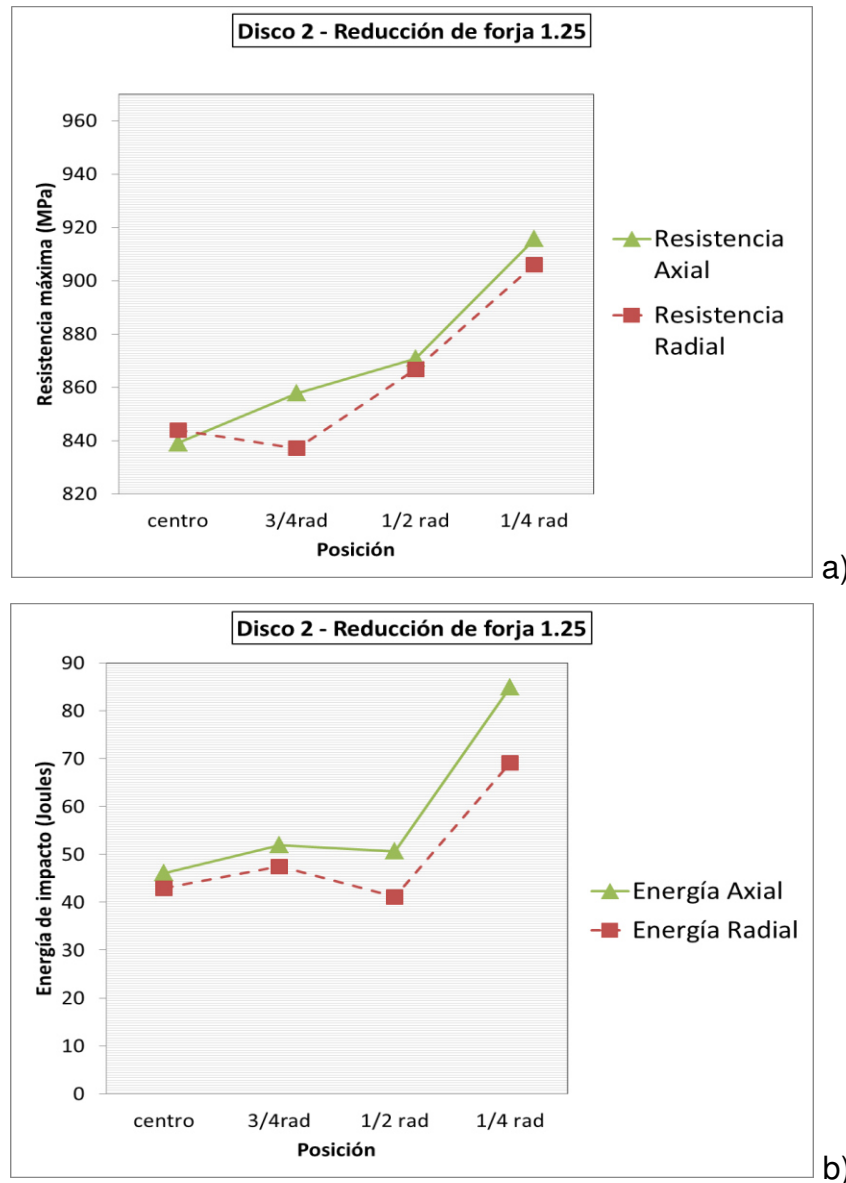


Figura 4.11. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial del disco número 2 (reducción de forja de 1.25).

En la Tabla 4.2, se presenta un resumen de las propiedades de resistencia a la tensión, energía de impacto y grado de anisotropía presentado en cada posición, donde se aprecia que el sentido preferencial de la forja se encuentra en el sentido axial en las 4 posiciones analizadas al igual que el disco anterior (disco número 1) con la diferencia que en este disco las variaciones

anisotrópicas son menores debido al cambio en el patrón de flujos por la reducción de forja.

Tabla 4.2. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 2 (reducción de forja 1.25).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía
Centro	839	844	-0.59	46	43	6.97
$\frac{3}{4}$ radio	858	837	2.50	52	47	10.63
$\frac{1}{2}$ radio	871	867	0.46	51	41	24.39
$\frac{1}{4}$ radio	916	906	1.10	85	69	23.18

4.3.1.3 Disco número 3 (reducción de forja 1.5)

El disco número 3, representa el disco que llevó una reducción de forja de 1.5, como se discutió anteriormente su sentido preferencial ya no está orientado en el sentido preferencial de la barra forjada, presenta distintos flujos en el disco debido a la reducción de forja de tipo *upsetting* [33].

En la figura 4.12 se grafican las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y energía de impacto para el disco número 3 en sus 4 distintas posiciones, donde se visualiza la diferencia anisotrópica en cada posición.

En ambas graficas de la figura 4.12, se observa un comportamiento anisotrópico distinto a los discos previamente analizados, ya que en la posición del centro las mejores propiedades se encuentran en el sentido radial pero en el resto de las posiciones los valores más altos se encuentran en el sentido axial. Por lo que se puede decir que solo en la posición del centro del disco ocurrió una reorientación y el flujo está más orientado hacia al sentido radial teniendo porcentajes de anisotropía de un 1.07% en la resistencia máxima y 12.76% en

la energía de impacto a favor de este sentido. En el resto de las posiciones del disco (3/4 radio, 1/2 radio y 1/4 radio) la reducción de 1.5 no fue la necesaria para reorientar el flujo en estas posiciones, siendo el sentido axial el sentido con los más altos valores, hasta un 3.10% para la resistencia máxima y 37.21% para la energía de impacto.

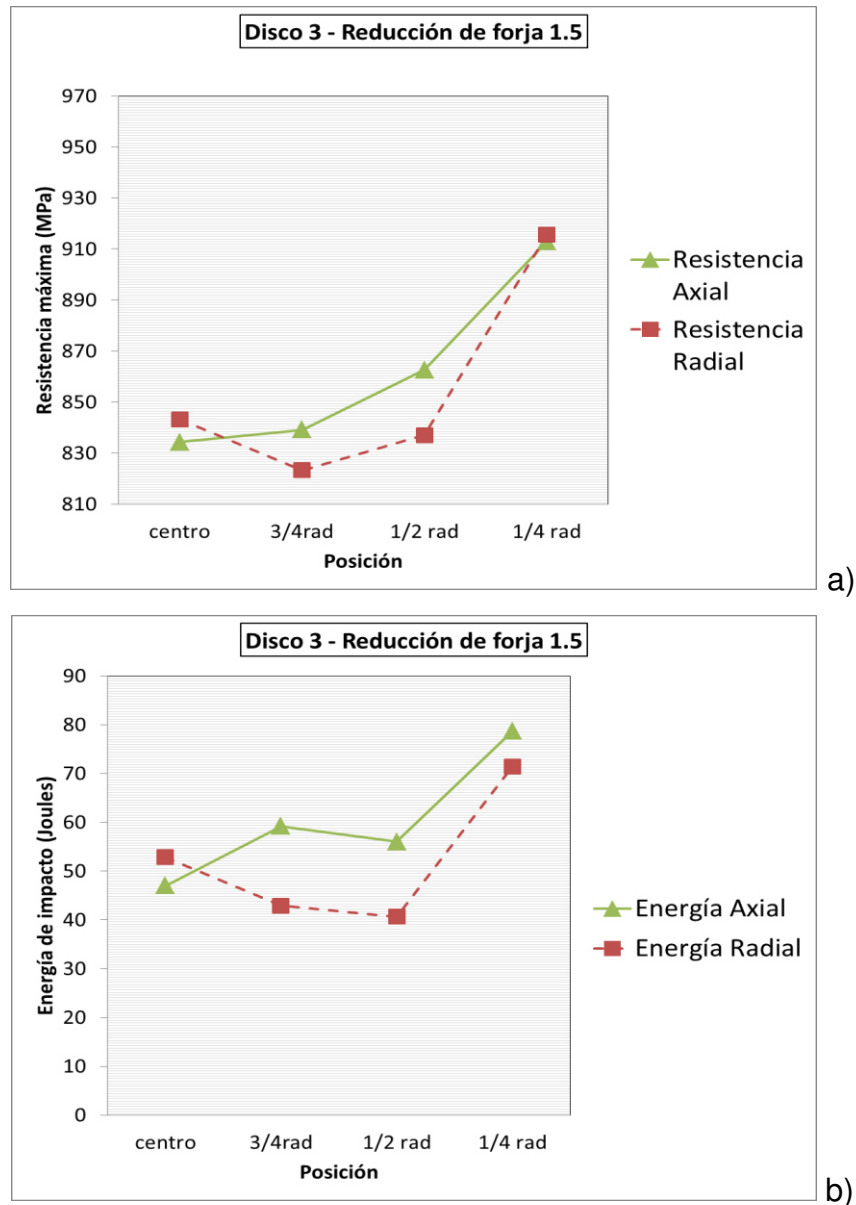


Figura 4.12. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 3.

En la Tabla 4.3, se presenta un resumen de las propiedades de resistencia a la tensión, energía de impacto y grado de anisotropía presentado en cada posición, en la posición del centro presentando un flujo hacia el sentido radial, mientras en el resto de las posiciones analizadas la orientación axial continúa siendo el sentido preferencial.

Tabla 4.3. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 3 (reducción de forja 1.5).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía	Flujo preferencial
Centro	834	843	-1.07	47	53	-12.76	Radial
$\frac{3}{4}$ radio	839	823	1.94	59	43	37.21	Axial
$\frac{1}{2}$ radio	863	837	3.10	56	41	36.58	Axial
$\frac{1}{4}$ radio	913	916	-0.32	79	71	11.27	Axial

4.3.1.4 Disco número 4 (reducción de forja 2)

El disco número 4, representa el disco que llevó una reducción de forja de 2. Al igual que el resto de los discos con reducciones de tipo *upsetting* presenta distintos flujos en el disco.

En la figura 4.13 se grafican las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y energía de impacto para el disco número 4 en sus 4 distintas posiciones, donde se visualiza la diferencia anisotrópica en cada posición. En ambas graficas se logra apreciar que 3 de 4 posiciones se encuentran reorientadas hacia el sentido radial excepto la de $\frac{1}{4}$ de radio que es la más cercana a la superficie, en esa zona aun con una reducción de forja de 2, no logro reorientarse el flujo. Con la información obtenida en este disco y la información del disco previo con reducción de forja de 1.5 donde solo la

posición del centro se reorienta, se logra suponer que la reorientación del flujo ocurre del centro hacia el diámetro exterior.

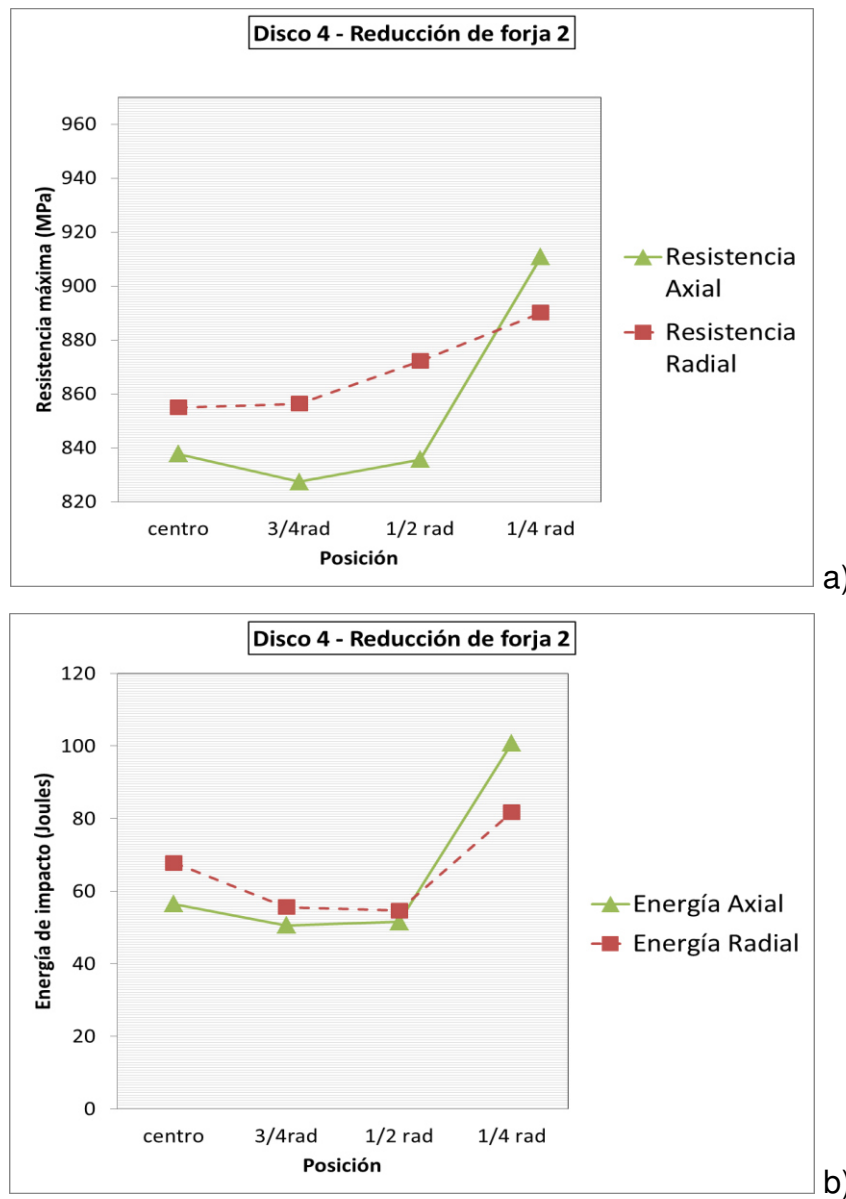


Figura 4.13. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 4.

Este disco presenta una anisotropía en un 4.3% en la resistencia a la tensión y un 21.43% de anisotropía para la energía de impacto a favor del sentido radial,

y en la zona de $\frac{1}{4}$ donde se tiene el flujo preferencial a favor del sentido axial, la anisotropía en presenta un 2.36% para la resistencia a la tensión y un 23.17% para la energía de impacto.

En la Tabla 4.4, se presenta un resumen de las propiedades de resistencia a la tensión, energía de impacto y grado de anisotropía presentado en cada posición, donde solo la posición de $\frac{1}{4}$ de radio tiene su sentido preferencial en la orientación axial, mientras el resto de las posiciones su flujo preferencial se encuentra en el sentido radial.

Tabla 4.4. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 4 (reducción de forja 2).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía	Flujo preferencial
Centro	838	855	-2.02	56	68	-21.43	Radial
$\frac{3}{4}$ radio	828	856	-3.38	51	56	-9.80	Radial
$\frac{1}{2}$ radio	836	872	-4.30	52	55	-5.77	Radial
$\frac{1}{4}$ radio	911	890	2.36	101	82	23.17	Axial

4.3.1.5 Disco número 5 (reducción de forja 3)

El disco número 5, representa el disco que llevó una reducción de forja de 3. En la figura 4.14 se grafican las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y energía de impacto para el disco número 5 en sus 4 distintas posiciones, donde se distingue que en las 4 posiciones analizadas ocurrió una reorientación de flujo ya que los valores de resistencia a la tensión y energía de impacto son mayores en el sentido radial que en el axial. Presentado una anisotropía de

2.94% para la resistencia a la tensión y de un 21.74% para la energía de impacto.

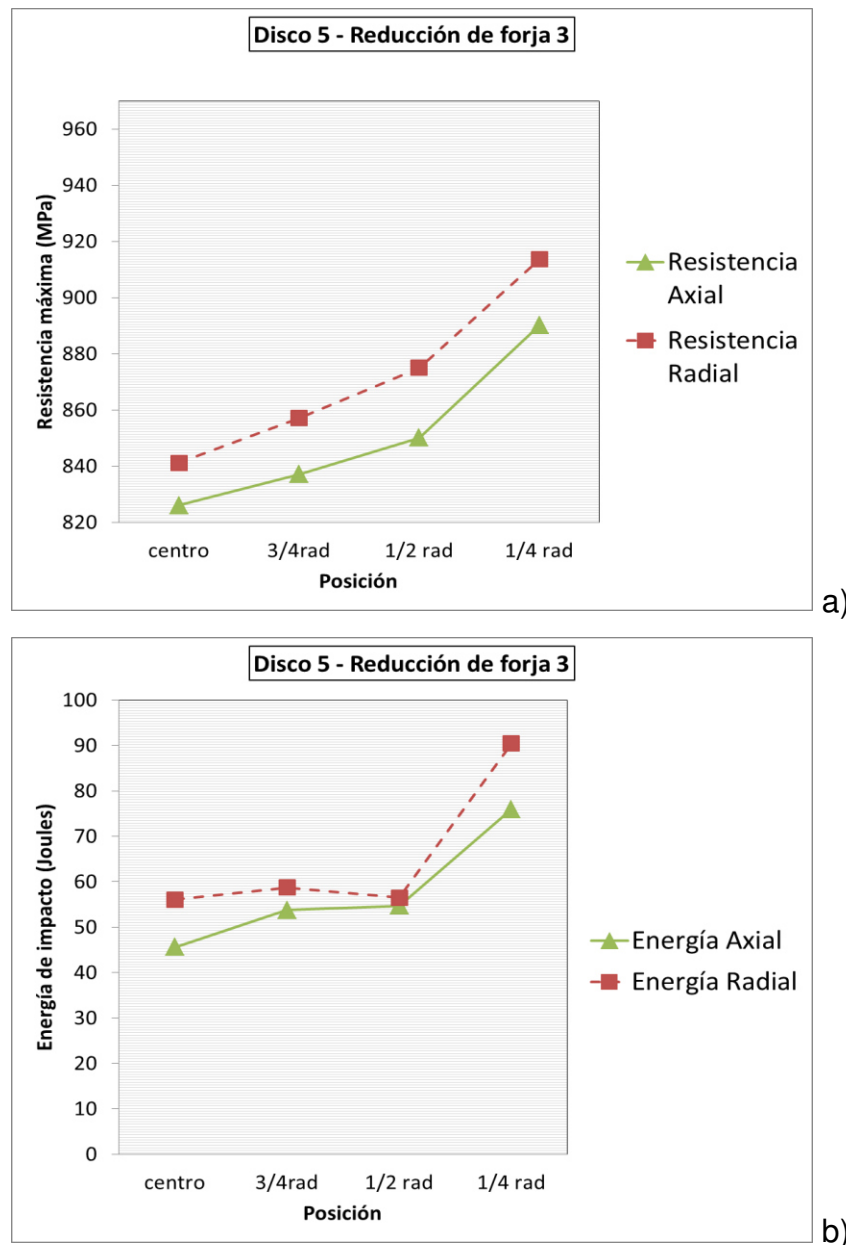


Figura 4.14. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 5.

En la Tabla 4.5, se presenta un resumen de las propiedades de resistencia a la tensión, energía de impacto y grado de anisotropía presentado en cada

posición, donde en todas las posiciones se tiene el sentido preferencial en la orientación radial.

Tabla 4.5. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 5 (reducción de forja 3).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía
Centro	826	841	-1.82	46	56	-21.74
$\frac{3}{4}$ radio	837	857	-2.39	54	59	-9.26
$\frac{1}{2}$ radio	850	875	-2.94	55	56	-1.81
$\frac{1}{4}$ radio	890	914	-2.70	76	90	-18.42

En la Tabla 4.6 se expresan en forma de resumen los resultados del % de anisotropía en la energía al impacto, donde es posible observar la reorientación de flujo conforme aumenta la reducción de forja en las distintas posiciones, los resultados positivos representan el sentido axial mientras los resultados negativos representan el sentido radial.

Tabla 4.6. Resultados de % de anisotropía en la energía de impacto.

Posición	Reducción de forja tipo <i>upsetting</i>				
	1 (%)	1.25 (%)	1.5 (%)	2 (%)	3 (%)
Centro	51.72	6.97	-12.76	-21.43	-21.74
$\frac{3}{4}$ radio	52.50	10.63	37.21	-9.80	-9.26
$\frac{1}{2}$ radio	81.57	24.39	36.58	-5.77	-1.81
$\frac{1}{4}$ radio	80.35	23.18	11.27	23.17	-18.42

En la Tabla anterior 4.6, se logra identificar que a partir de una reducción de forja de 1.5 ocurre una reorientación solo en la zona del centro del disco, aumentando la reducción de forja a 2 se reorientan más zonas excepto la de $\frac{1}{4}$

de radio del disco (zona analizada más cercana a la superficie), y con una reducción de forja de 3 se logra tener un disco orientado en el sentido radial en las cuatro posiciones analizadas.

4.3.2 Comparación anisotrópica por posición

En esta comparación se evalúa cada posición por separado graficando los resultados de los 5 discos en las dos orientaciones analizadas (axial y radial), con la intención visualizar a partir de que reducción de forja ocurre una reorientación de flujo en cada posición.

Se graficaron las propiedades de esfuerzo a la tensión y energía de impacto en las cuatro distintas posiciones:

1. Centro del disco (Figura 4.21).
2. $\frac{3}{4}$ Radio (Figura 4.22).
3. $\frac{1}{2}$ Radio (Figura 4.23).
4. $\frac{1}{4}$ Radio (Figura 4.24).

1. Centro del disco

En la figura 4.15 se grafican los resultados de la posición del centro en los 5 distintos discos, figura 4.15 a) para la resistencia a la tensión y figura 4.15 b) para la energía de impacto, donde se observa que en la reducción de forja de 1.5 (disco 3) ocurre la reorientación de flujo ya que en ambas propiedades, los valores del sentido radial superan los valores del sentido axial, por un 12.76% para la energía de impacto y solo un 1.07% para la resistencia a la tensión

En la figura 4.15 a) se observa que en el centro del disco ocurre una disminución en los valores de resistencia comparando el disco 1 contra el resto de los discos para ambos sentidos, en secciones posteriores se revisara este tema ya que agregando reducciones las propiedades podrían aumentar al

cerrarse porosidades y disminuir el tamaño de inclusiones [3] y no disminuir como en este caso, por lo que otro fenómeno está presente, se analiza más adelante en la sección 4.6.

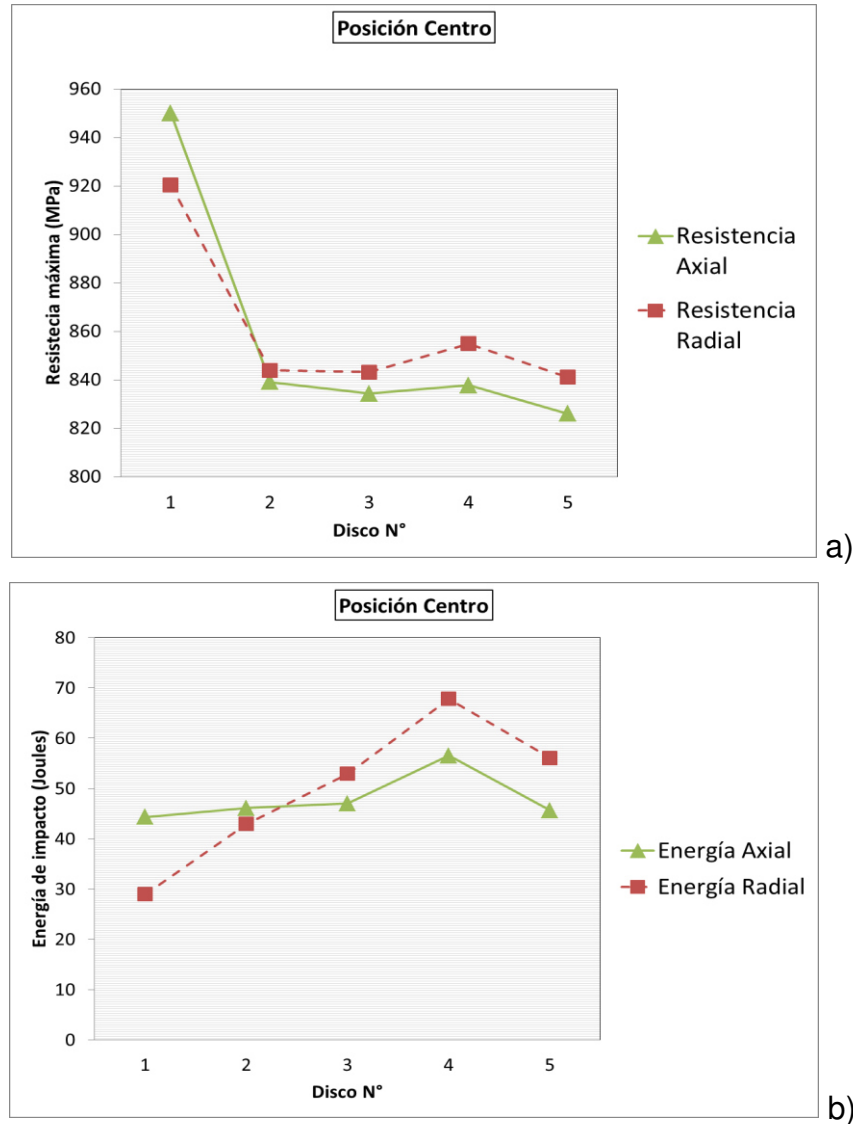


Figura 4.15. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (centro), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto.

2. $\frac{3}{4}$ Radio

En la figura 4.16 se grafican los resultados de la posición de $\frac{3}{4}$ radio en los distintos discos, figura 4.15 a) para la resistencia a la tensión y figura 4.15 b) para la energía de impacto, se observa que la reorientación de flujo ocurre a

partir de una reducción de forja de 2, ya que en el disco número 4 los valores de ambas propiedades son mayores en el sentido radial, resistencia a la tensión en un 3.38% y energía de impacto en un 9.8% mayor que el sentido axial.

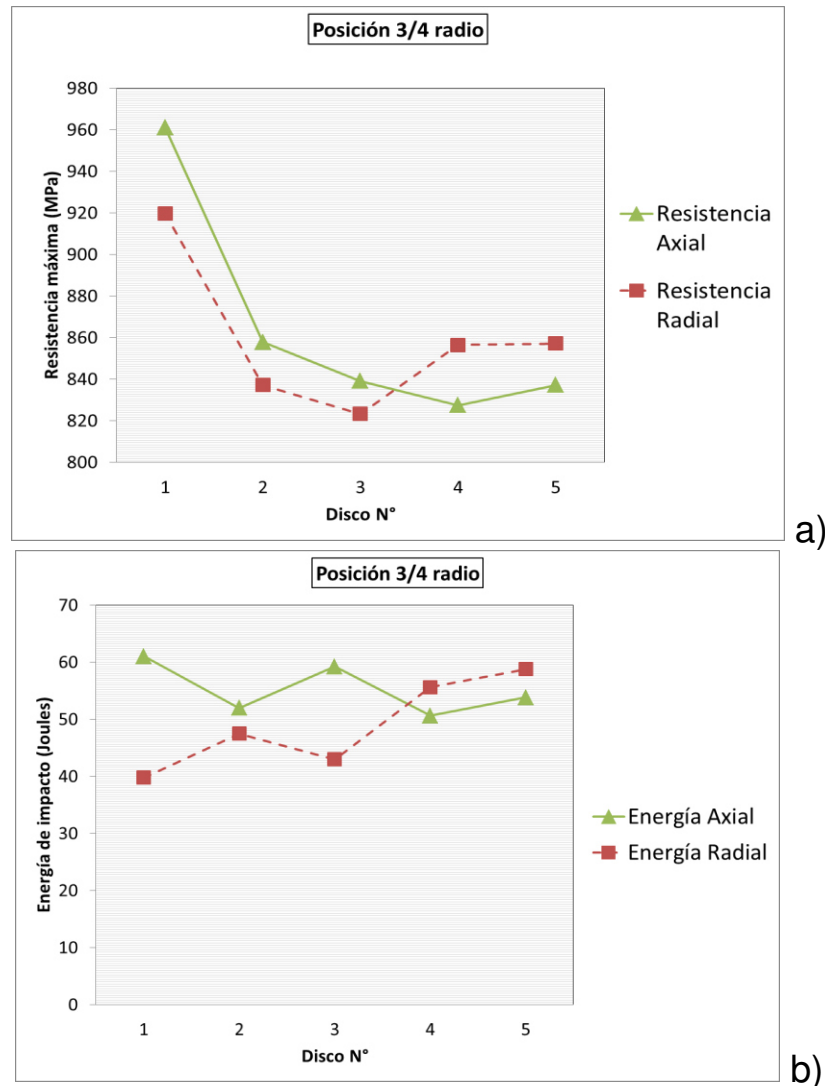


Figura 4.16. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (3/4 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto.

También se aprecia en la figura 4.16 a) la disminución de resistencia a la tensión para ambos sentidos (axial y radial), condición que se analiza en la sección 4.6.

3. 1/2 Radio

En la figura 4.17 se grafican los resultados de la posición de 1/2 radio en los distintos discos, figura 4.15 a) para la resistencia a la tensión y figura 4.15 b) para la energía de impacto, al igual que la posición de 3/4 de radio se observa que la reorientación de flujo ocurre a partir de una reducción de forja de 2 (disco número 4) donde los valores de ambas propiedades son mayores en el sentido radial, resistencia a la tensión en un 4.3% y energía de impacto en un 5.77% mayor que el sentido axial.

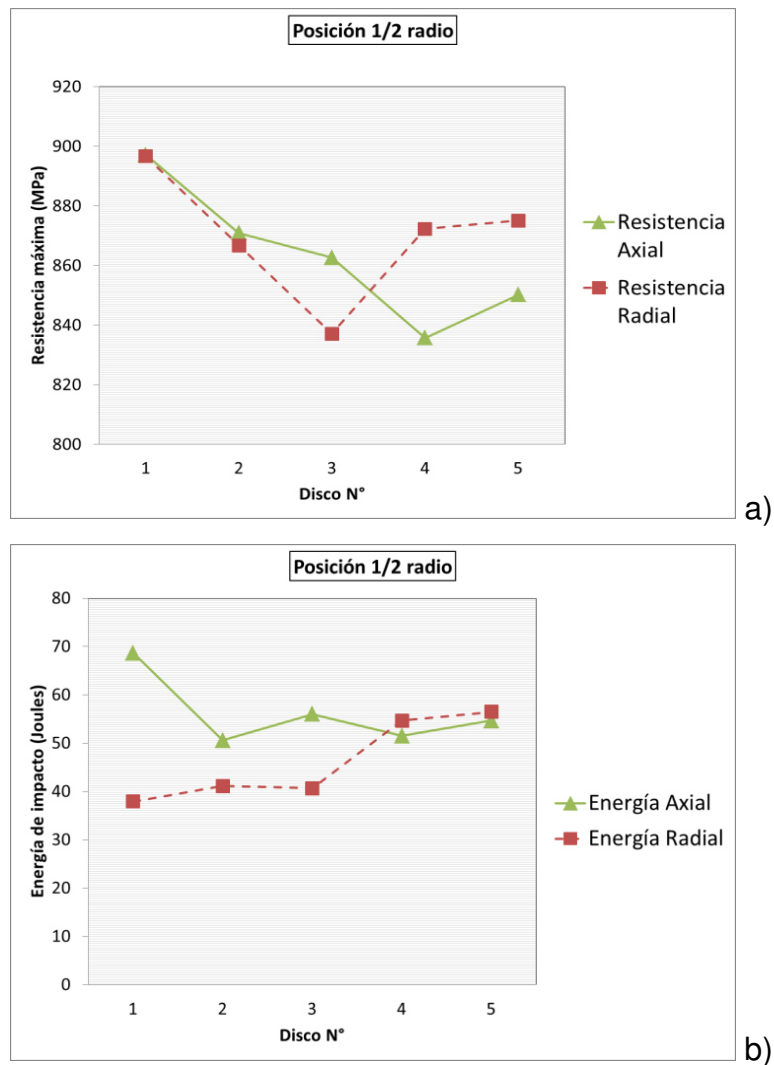


Figura 4.17. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (1/2 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto.

4. 1/4 Radio

En la figura 4.18 se grafican los resultados de la posición de 1/4 de radio en los distintos discos, figura 4.15 a) para la resistencia a la tensión y figura 4.15 b) para la energía de impacto, en esta posición se aprecia que se necesita más reducción para la reorientación de flujo, ya que ocurre hasta la reducción de forja de 3 (disco número 5) donde se observan que los valores de ambas propiedades son mayores en el sentido radial, con una resistencia a la tensión de 2.7% y energía de impacto de 18.42% mayor que el sentido axial.

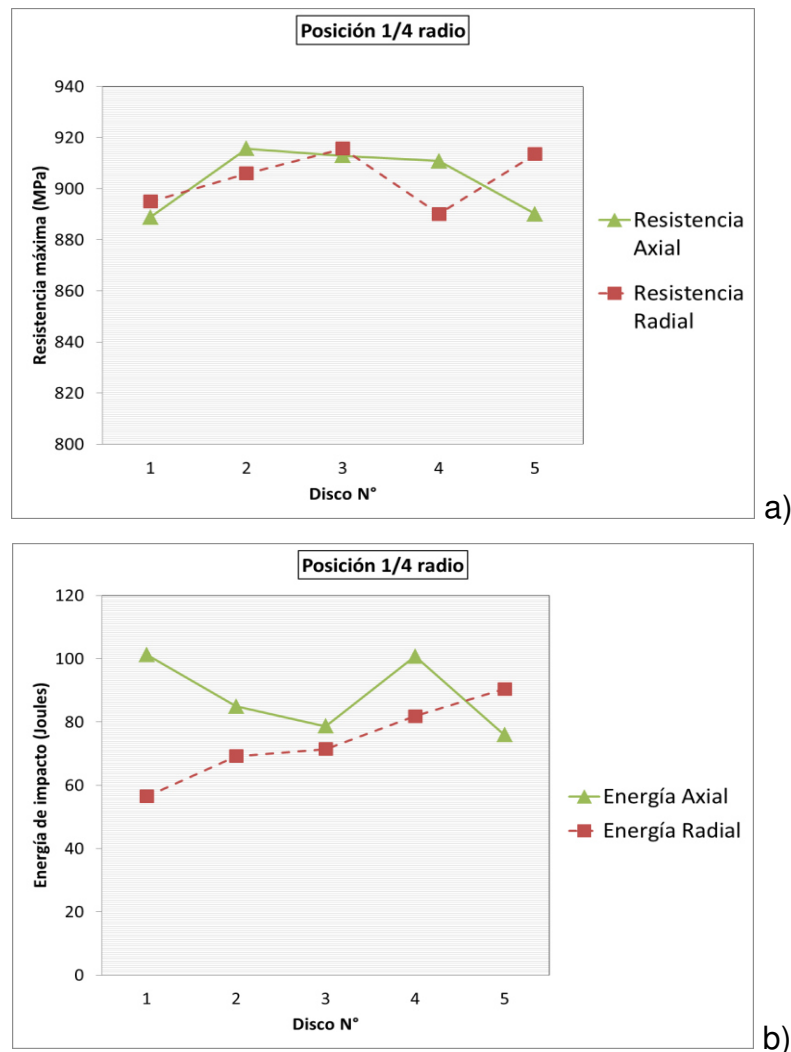


Figura 4.18. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (1/4 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto.

4.4 Simulación numérica

Para el análisis de elemento finito solo se tomó el último paso de deformación (paso número 3, reducción por *upsetting*) siendo el que más influye en el flujo final de la forja, por ende solo se analizaron los discos con reducción de tipo *upsetting* (disco 2 al disco 5). El análisis fue utilizado para determinar el flujo preferencial de cada disco en relación a la cantidad de deformación, como se mencionó en la sección 3.5.

De igual manera que en los discos reales, se analizaron 4 posiciones del disco como se muestra en la figura 4.19.

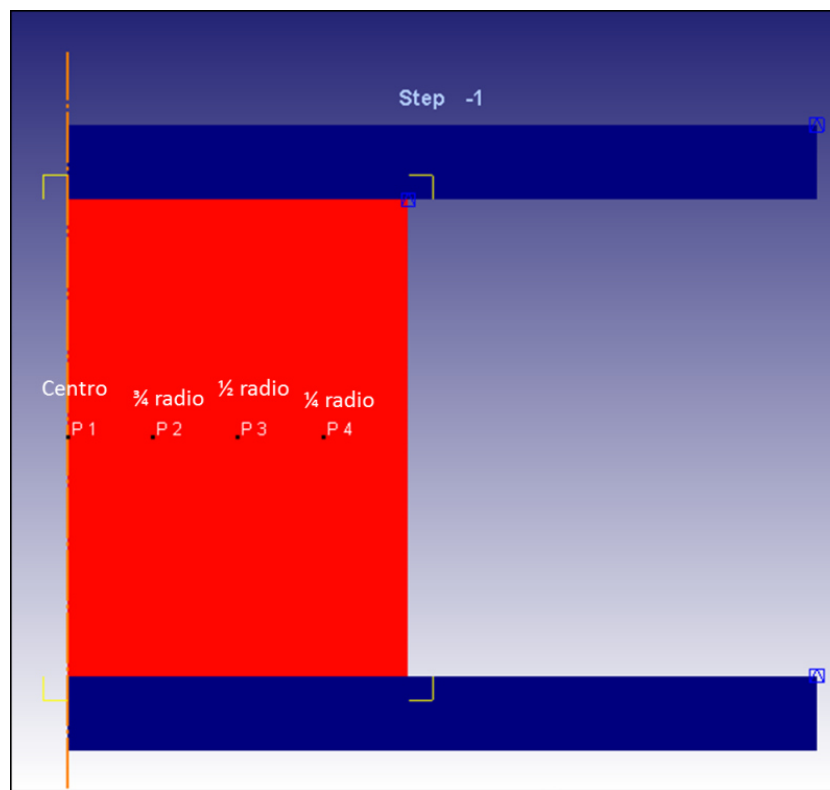


Figura 4.19. Posiciones analizadas en modelado numérico.

En la figura 4.20, se grafican los resultados simulados de la deformación Von Mises en los 4 discos y en sus 4 posiciones de interés, donde se realiza una comparación de los resultados. Se observa que la posición del centro del disco

número 3 (reducción de forja 1.5) alcanza deformaciones alrededor de los 0.95 mm/mm. Debido a que en este disco número 3 se encontró una reorientación de flujo en el centro de la pieza en las pruebas reales, se define este valor de 0.95mm/mm como el valor mínimo requerido de deformación Von Mises para que ocurra la reorientación.

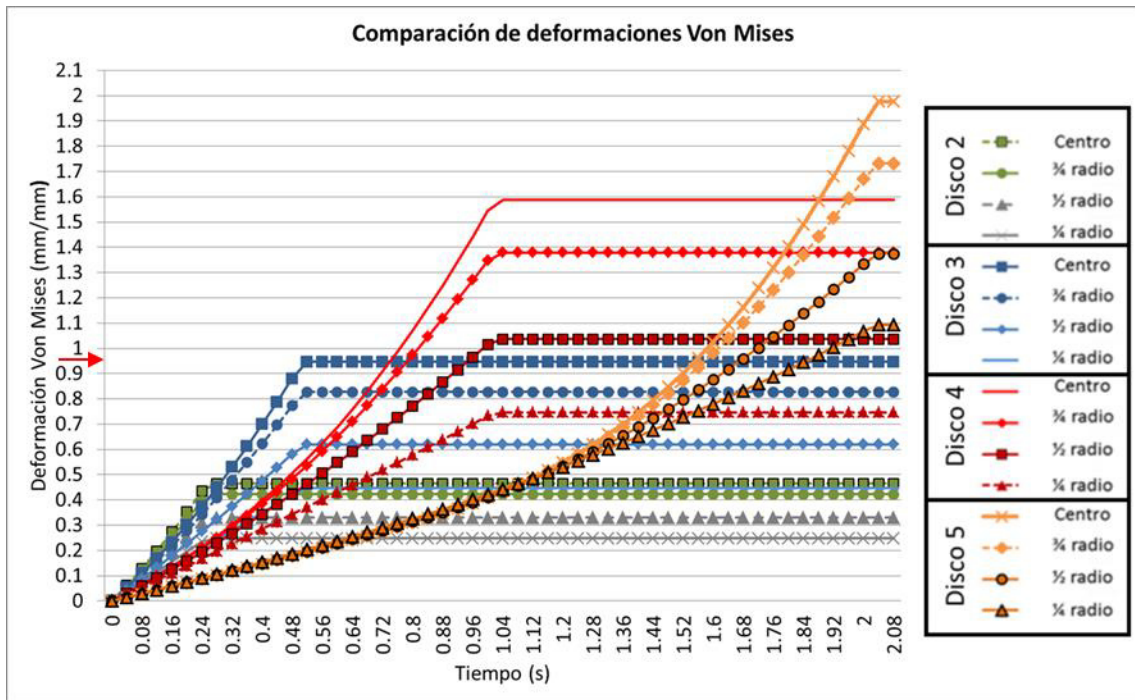


Figura 4.20. Comparación de resultados de deformación Von Mises en las 4 posiciones de los 4 discos analizados por elemento finito.

En la misma figura 4.20 se aprecia que el disco 4 con reducción de forja de 2, en la posición de $\frac{1}{4}$ de radio no logra alcanzar los valores de 0.95 mm/mm por lo que el flujo no se reorienta mientras que en el resto de las posiciones en este disco si lo alcanzan, estos mismos resultados fueron obtenidos en las pruebas reales donde solo esa posición no mostro un cambio en el sentido preferencial.

A continuación se analizan los 4 modelos de forma cualitativa y cuantitativa en relación al flujo de grano, con la ayuda de dos aplicaciones del programa DEFORM ® *flownet* para el análisis cualitativo, esta herramienta consiste en

dividir la pieza por medio de una malla, apreciando la deformación de cada elemento, además se utilizó el modo *vector plot* en la deformación máxima total para visualizar patrones de flujos y para el análisis cuantitativo se analizaron los valores de deformación Von Mises en modo sólido.

Los discos analizados por medio de modelado numérico son los siguientes:

1. Disco 2, reducción de forja 1.25 (Figura 4.21)
2. Disco 3, reducción de forja 1.5 (Figura 4.22)
3. Disco 4, reducción de forja 2 (Figura 4.23)
4. Disco 5, reducción de forja 3 (Figura 4.24)

1. Disco 2 (reducción de forja 1.25)

En la figura 4.21 a), correspondiente a la pieza 2 con reducción de forja de 1.25, los valores de deformación no alcanzan los 0.95 mm/mm mínimos para la reorientación del flujo en ninguna zona de la pieza, por lo que se considera el sentido axial como longitudinal en toda la pieza, en los resultados reales tuvimos el mismo comportamiento en las 4 zonas analizadas, en la figura 4.21 b), se observa como los flujos principales aun que claramente son en sentido radial, no tiene la suficiente reducción de forja para reorientar el flujo.

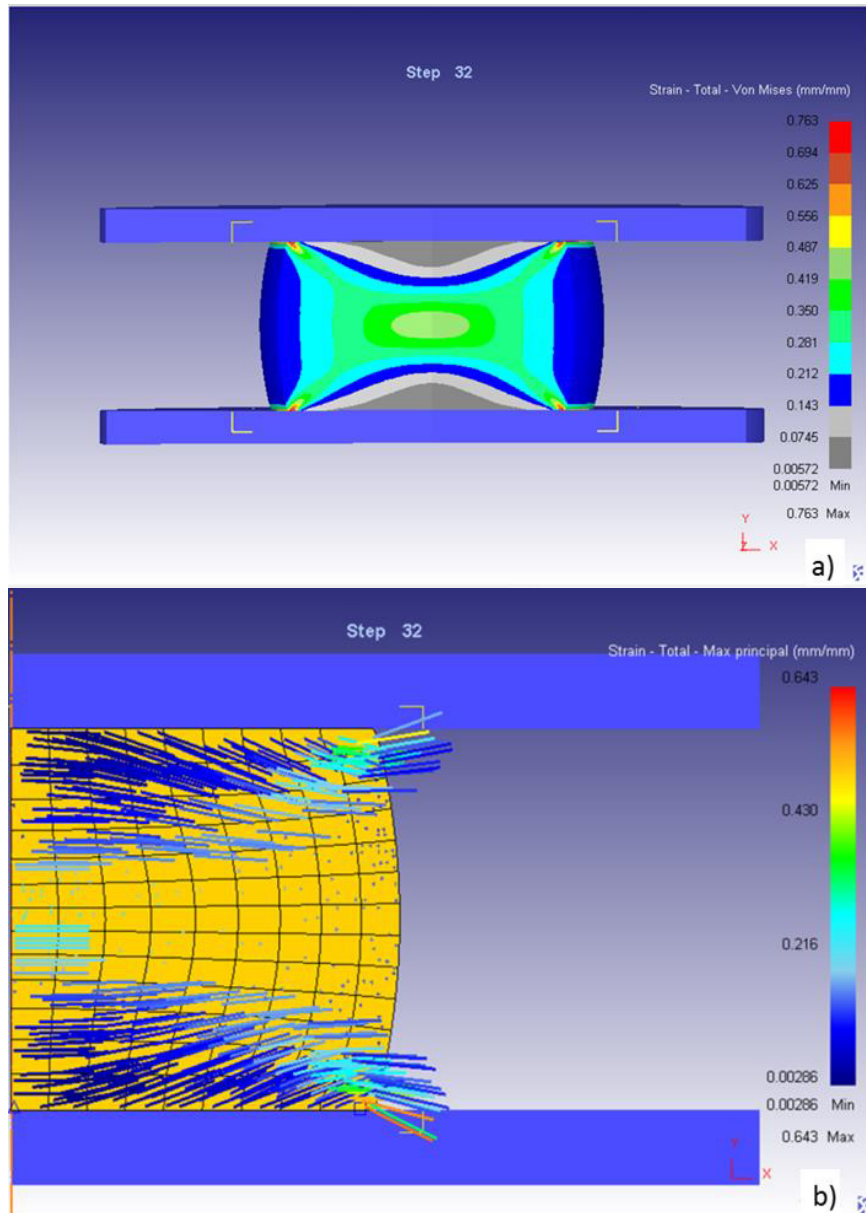


Figura 4.21. Sección transversal de disco 2 (reducción 1.25) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo.

2. Disco 3 (reducción de forja 1.5)

En las figura 4.22 a), correspondiente a la pieza 3 con reducción de forja de 1.5, se encontraron deformaciones de alrededor de 0.95 mm/mm solo en el centro de la pieza por lo que se considera que solo en esta zona del disco ocurrió una reorientación de flujo, mientras en el resto de la pieza el sentido axial es el

considerado longitudinal, dichos resultados concuerdan con los resultados de los ensayos reales en pruebas mecánicas, en la figura 4.22 b), de forma cualitativa se aprecia que solo los elementos del centro del disco tienen una considerable reducción en comparación del resto de los elementos, también se observa el flujo de material en los sentidos radiales con una ligera inclinación hacia el dado más cercano.

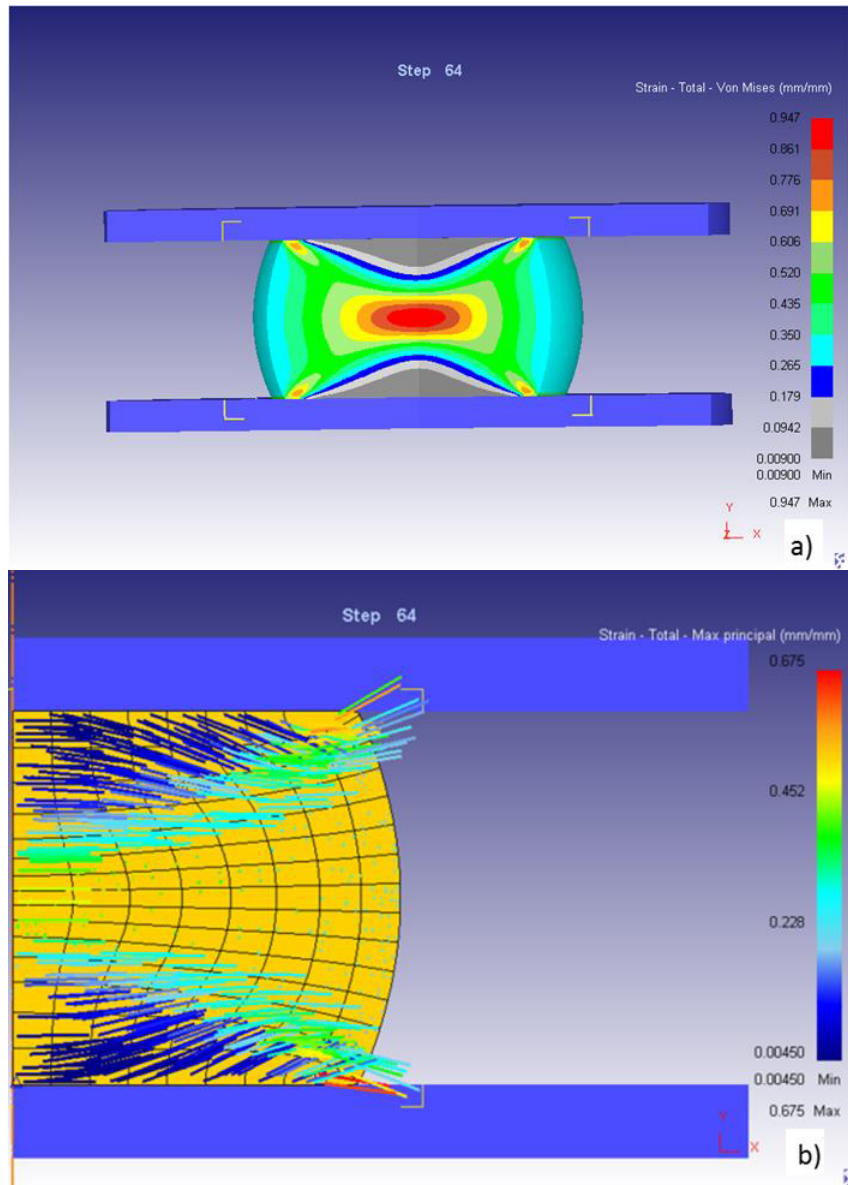


Figura 4.22. Sección transversal de disco 3 (reducción 1.5) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo.

3. Disco 4 (reducción de forja 2)

En la pieza número 4 con reducción de forja de 2, en los resultados reales se encontró que a partir de esta reducción ocurre una orientación en el flujo de grano cambiándolo de sentido axial a un sentido radial en tres de cuatro posiciones, solo la más cercana a la superficie (1/4 de radio) no se reorienta, en la figura 4.23 a) podemos visualizar en un análisis cuantitativo las zonas con resultados de deformación Von Mises mayores a 0.95 mm/mm, donde se determina que esta zona cuenta con una reorientación de flujo en un sentido radial principalmente en la zona de media altura del disco, también se logra apreciar que en las zonas del centro del disco en contacto con los dados de forja tiene una deformación mínima (menor a 0.145 mm/mm).

En la figura 4.23 b), de manera cualitativa se observa que la mayoría de los elementos tienen una gran deformación principalmente en las zonas de media altura del disco, y el flujo en las zonas de un cuarto de altura del disco no son completamente radial sino más bien tiene un ángulo de 45° aproximadamente.

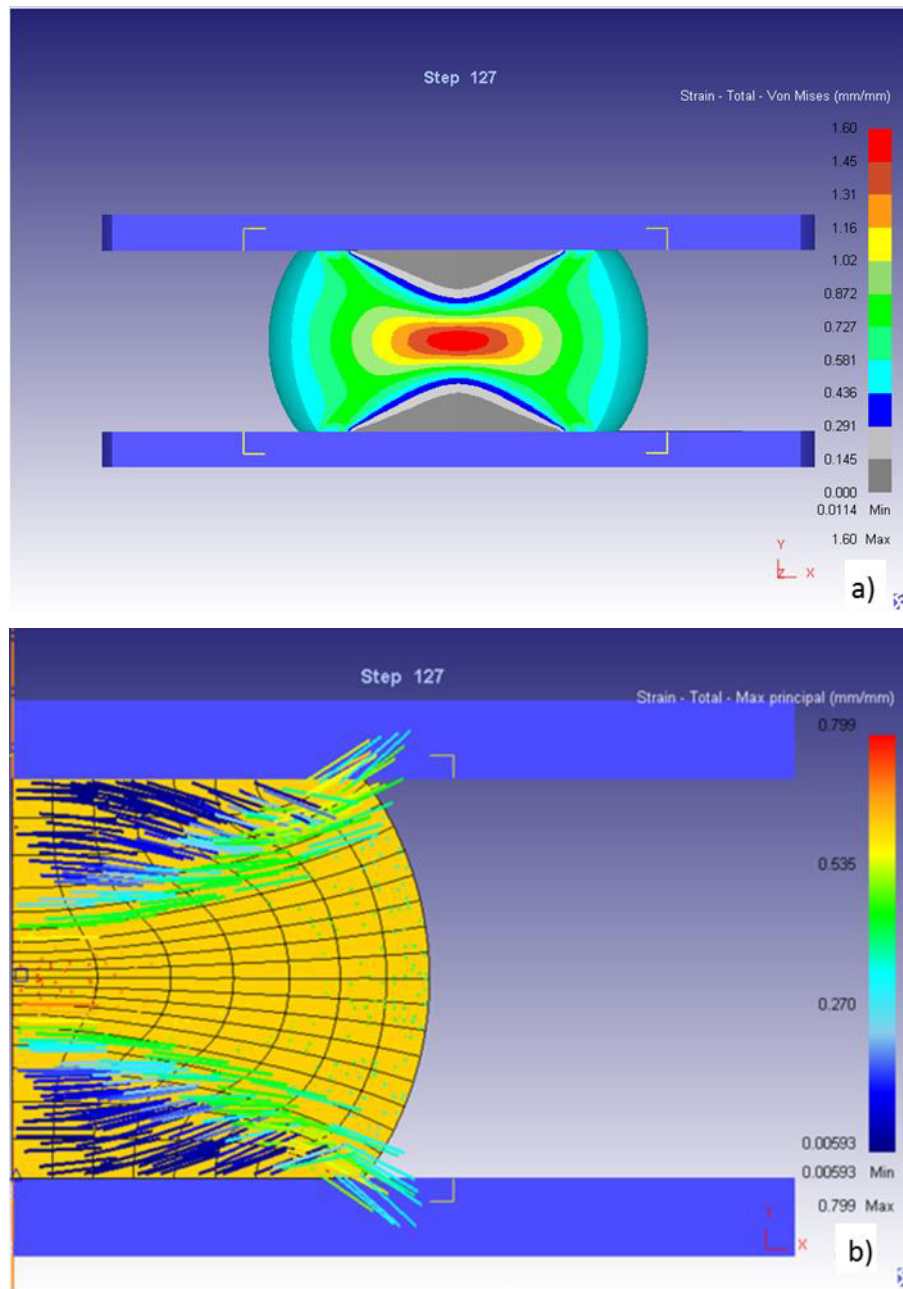


Figura 4.23. Sección transversal de disco 4 (reducción 2) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo.

4. Disco 5 (reducción de forja 3)

En el disco número 5 con reducción de forja tipo *upsetting* de 3, Figura 4.24 a) cuantitativamente se aprecia que la mayoría de las zonas del disco se

encuentra reorientado en el sentido radial ya que exceden los 0.95 mm/mm, excepto las zonas superficiales y la zona del centro del disco cercano a ambos dados. En la figura 4.24 b) de forma cualitativa se aprecia que la mayoría de los elementos tienen una gran deformación excepto la zonas cercanas a los dados en el centro del disco, también se aprecia que el flujo en la zonas de un cuarto de altura del disco tiene un ángulo igual o mayor de 45° .

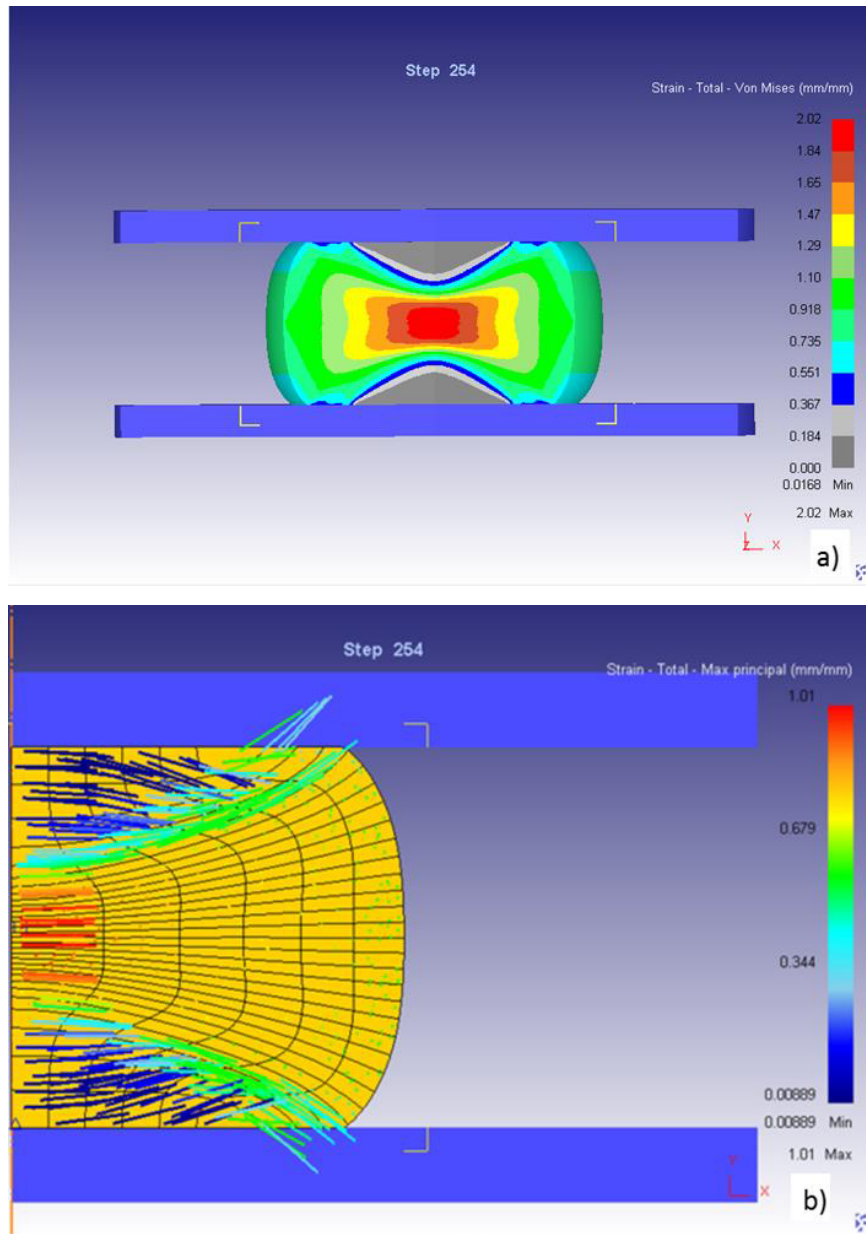


Figura 4.24. Sección transversal de disco 5 (reducción 3) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo.

La simulación numérica es una herramienta útil para predecir el flujo de grano de discos forjados en sus distintas posiciones.

4.5 Comparación anisotrópica en posiciones adicionales

De acuerdo a los datos obtenidos en la simulación numérica donde a partir de una deformación Von Mises de 0.95 mm/mm se logró reorientar el flujo, se busca comparar los resultados simulados con resultados reales de pruebas mecánicas en distintas posiciones del disco, se obtuvieron probetas para ensayo de tensión y de impacto a $\frac{1}{4}$ de altura como se muestra en la figura 4.25. Se realizaron estas pruebas adicionales solo en los discos número 4 y 5, que fueron los de mayor reducción de forja y por ende mayor deformación en sus elementos.

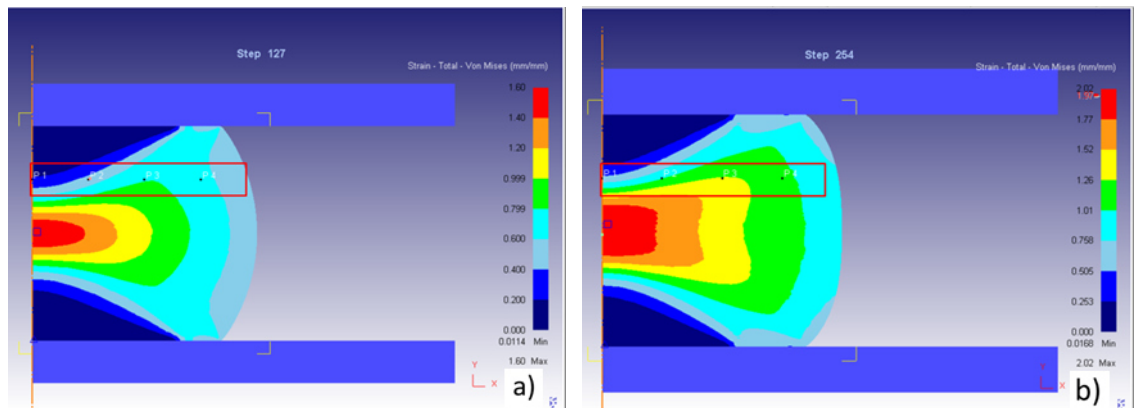


Figura 4.25. Posiciones analizadas a $\frac{1}{4}$ de altura a) disco 4 (reducción 2), b) disco 5 (reducción 3).

Los resultados de deformación Von Mises para las posiciones de ambos discos, se grafican en la figura 4.26, donde para ambos discos se aprecia que los valores más altos de deformación se encuentra en la posición de $\frac{1}{2}$ radio, seguido por la posición cercana a la superficie ($\frac{1}{4}$ de radio) y las posiciones de menor deformación se encuentran en el centro del disco.

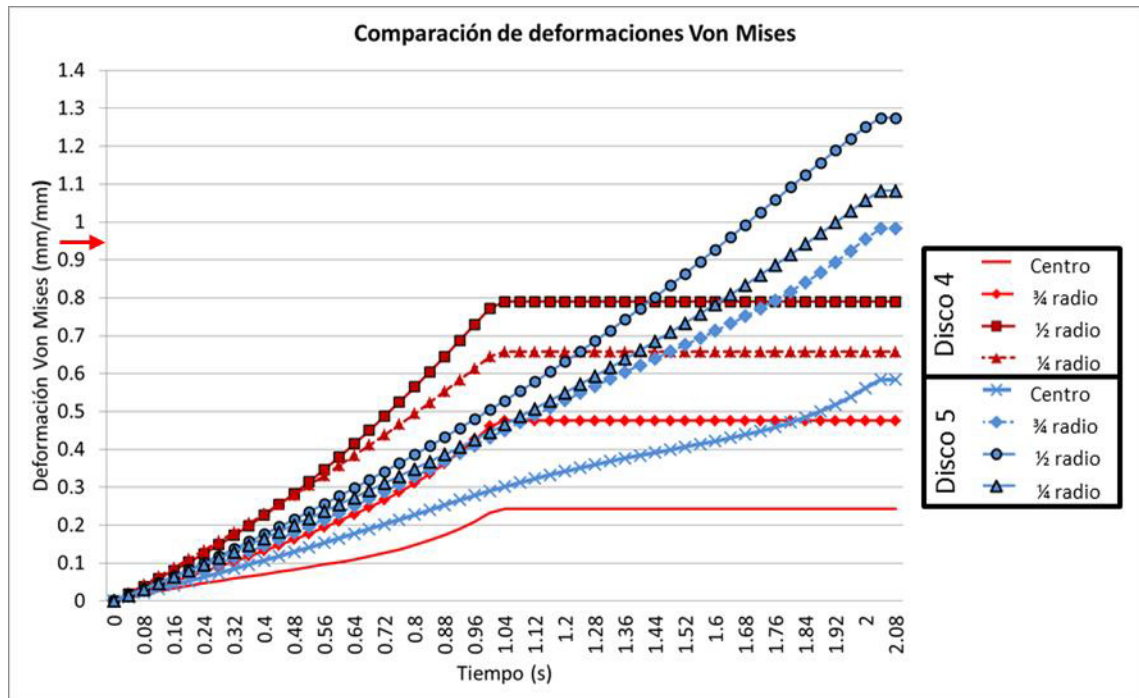


Figura 4.26. Grafica de valores de deformación Von Mises para disco 4 (reducción de forja 2) y disco 5 (reducción de forja 3).

En la Figura 4.26, se observa que 3 posiciones del disco número 5 con reducción de forja 3 superan los valores de deformación Von Mises de 0.95 mm/mm, tales posiciones son: $\frac{1}{4}$ radio, $\frac{1}{2}$ radio y $\frac{3}{4}$ radio, las cuales deben contar con reorientación de flujo en el sentido radial. En cambio en el disco 4 con reducción de forja de 2 en ninguna de las posiciones analizadas alcanza valores de 0.95 mm/mm por lo que su flujo preferencial deberá ser en el sentido axial.

Los resultados reales para el disco 4 con reducción de forja de 2 se observan en la figura 4.27, donde los valores de energía de impacto en la figura 4.27 a) concuerdan con los resultados a la simulación numérica, los valores más altos se tienen en el sentido axial, en la figura 4.27 b) se grafican los resultados de resistencia a la tensión, donde el comportamiento anisotrópico es muy similar predominando el sentido axial 3 de las 4 posiciones analizadas, solo la posición de $\frac{1}{4}$ radio el sentido preferencial es el sentido radial.

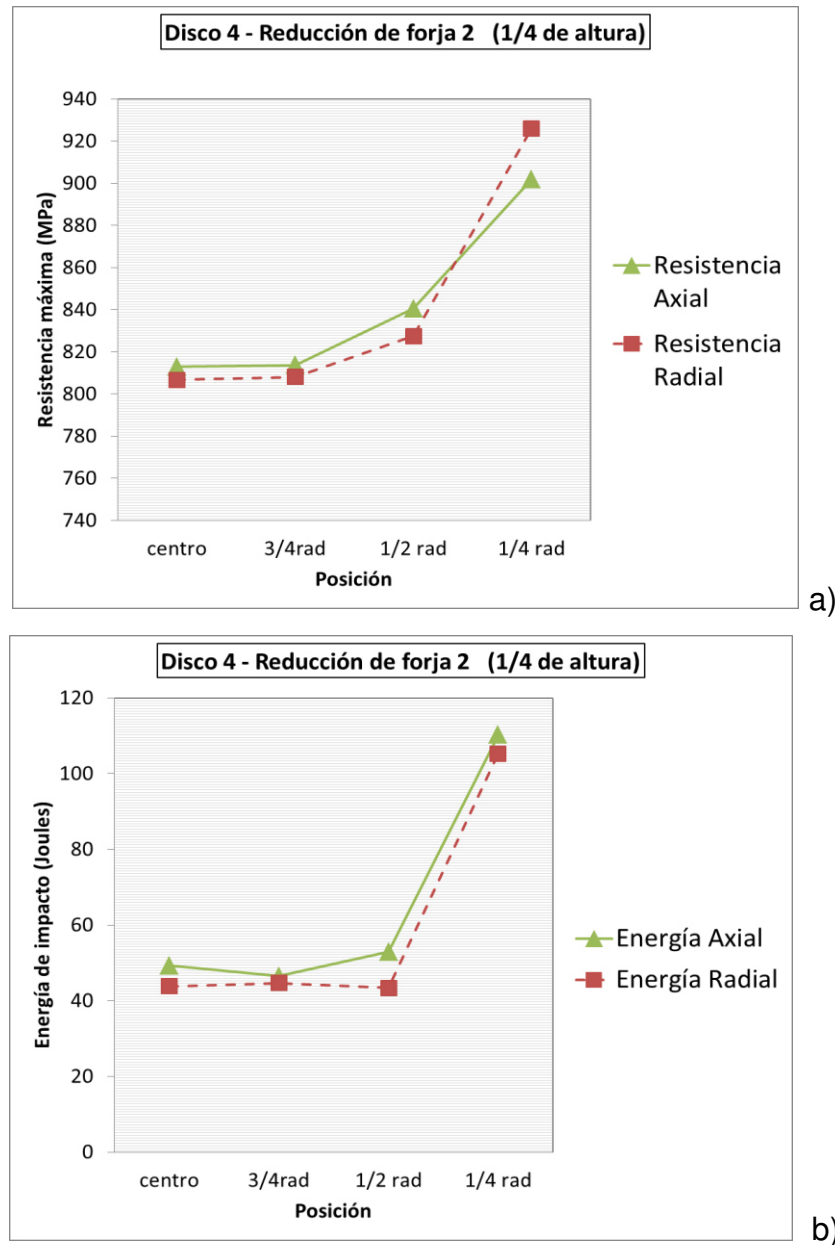


Figura 4.27. Graficas de resultados reales en disco 4 (reducción de forja 2) a) prueba de tensión, b) prueba de impacto.

En la figura 4.27, cabe resaltar que la variación anisotrópica en promedio es menor que en las 4 posiciones analizadas originalmente (a media altura del disco), la variación promedio fue de 10.9% mientras en las primeras posiciones fue de 15%, las menores variaciones anisotrópicas se deben a que en esta zona analizada (1/4 altura) los valores de deformación son menores, debido a

que el flujo no está bien reorientado en el sentido radial, además en la zona de $\frac{1}{4}$ de altura se aprecian notables diferencias en los valores de deformación en sus zonas vecinas y considerando que las probeta tiene un largo mínimo de 76.2 mm (3") abarca diferentes zonas, con muy diferentes valores de deformación, lo cual explica por qué el punto de $\frac{1}{4}$ radio en la prueba de tensión no coincide con los resultados simulados.

El resumen de los resultados de resistencia a la tensión, energía de impacto y sus variaciones anisotrópicas en cada posición del disco 4, se pueden ver en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Resultados de pruebas mecánicas en disco 4 con reducción de forja 2 (posiciones a $\frac{1}{4}$ de altura).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía	Flujo preferencial
Centro	813	807	0.74	49	44	11.36	Axial
$\frac{3}{4}$ radio	814	808	0.74	47	45	4.44	Axial
$\frac{1}{2}$ radio	840	827	1.57	53	43	23.26	Axial
$\frac{1}{4}$ radio	902	926	-2.66	110	105	4.76	N/A

En la figura 4.28 se grafican los resultados reales de las pruebas mecánicas del disco número 5 con reducción de forja de 3 en sus distintas posiciones, en la figura 4.28 a) también coincide con los resultados simulados donde las mejores propiedades de impacto se tienen en el sentido radial, el único punto donde no coincide es en el centro del disco, donde se predijo el sentido preferencial sería en el sentido axial. En la figura 4.28 b) se grafican los resultados de resistencia a la tensión, donde el comportamiento anisotrópico es muy similar al disco previo donde predomina el sentido axial, solo en la posición de $\frac{1}{4}$ radio el sentido radial es el preferencial.

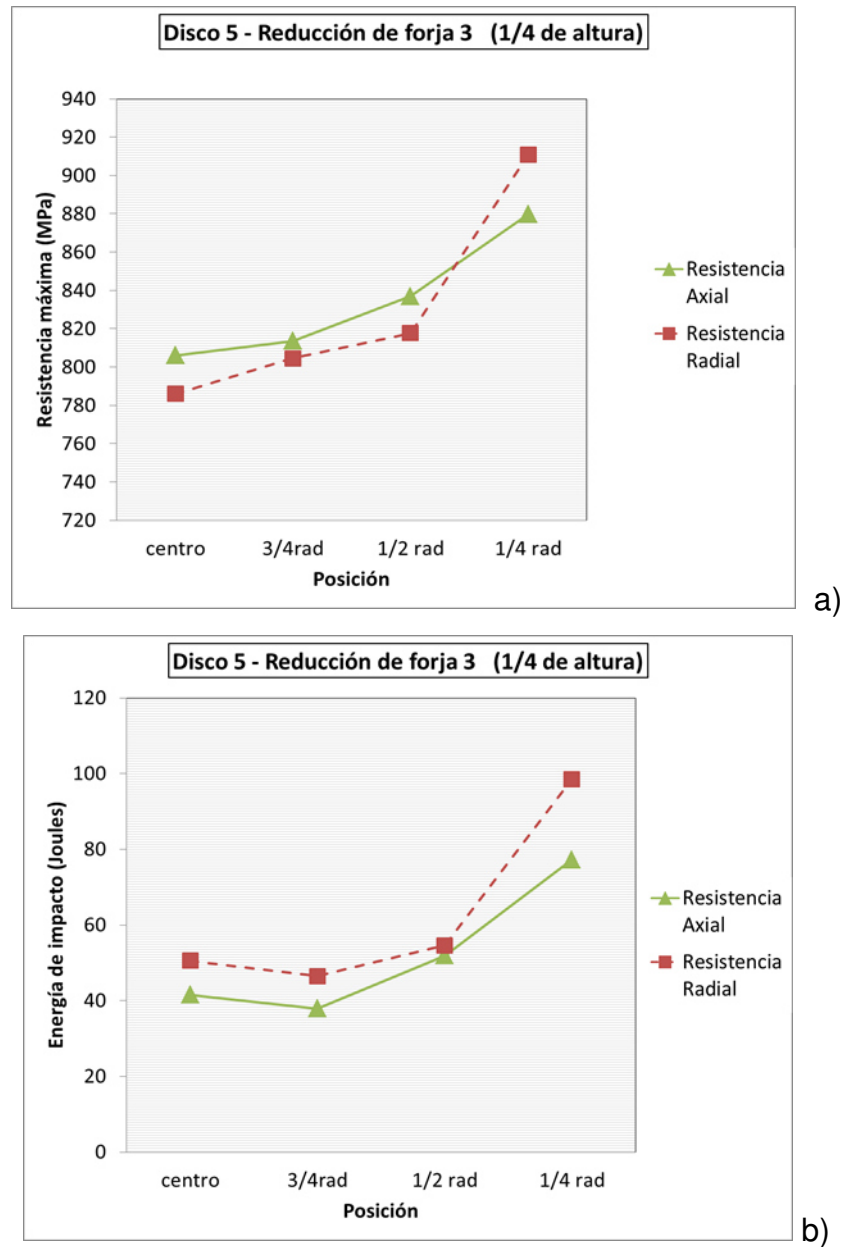


Figura 4.28. Graficas de resultados reales en disco 5 (reducción de forja 3) a) prueba de tensión, b) prueba de impacto.

Los resultados de resistencia a la tensión, energía de impacto y sus variaciones anisotrópicas se encuentran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resultados de pruebas mecánicas en disco 5 con reducción de forja 3 (posiciones a ¼ de altura).

Posición	Resistencia a la tensión axial (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	% de anisotropía	Energía de impacto axial (J)	Energía de impacto radial (J)	% de anisotropía	Flujo preferencial
Centro	806	789	2.15	42	51	-21.43	N/A
¾ radio	814	805	1.12	38	47	-23.68	N/A
½ radio	837	818	2.32	52	55	-5.77	N/A
¼ radio	880	911	-3.52	77	99	-28.57	N/A

La discusión del por qué no concuerdan exactamente los resultados reales contra los simulados es muy probable que se deba al tamaño de la probeta, al tener 76.2 mm (3") de largo, no se están comparando exactamente dos puntos sino más bien se comparan dos zonas, como se muestra en la figura 4.29.

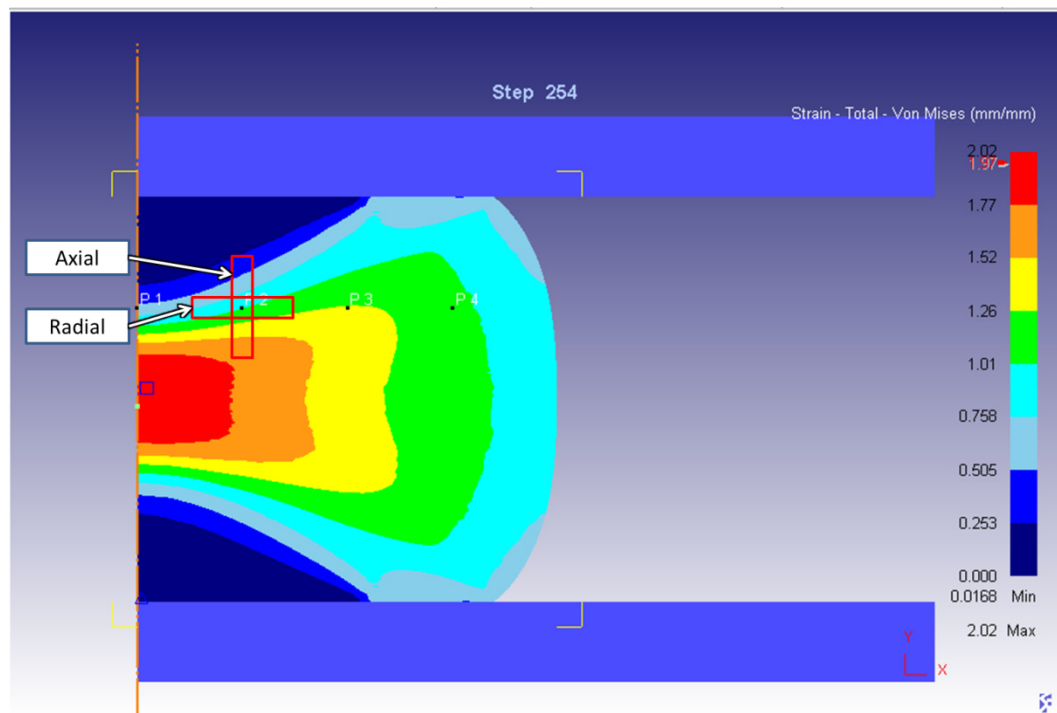


Figura 4.29. Representación de extracción de probetas obtenidas en disco número 5, en sentido axial y radial.

4.6 Análisis y caracterización de disco número 1

Como se mencionó en la sección 4.3, el disco número 1 que es aquel que no tuvo reducción de forja de tipo *upsetting* mostró un comportamiento atípico ya que en el centro del disco presentó mayores valores de resistencia a la tensión que en el resto de las zonas, a pesar que en esa zona del centro del disco la velocidad de enfriamiento es más lenta durante el tratamiento térmico de templado y por consiguiente se espera tener valores más bajos en esa zona en comparación a las zonas cercanas a la superficie, ya que tendrá un menor porcentaje de la fase martensítica.

Se realizaron distintas pruebas de caracterización, para entender el fenómeno presentado en el disco número 1 (reducción de forja 1) entre cuales están:

1. Ensayo de dureza Brinell.
2. Prueba de microestructura.
3. Análisis químico.

1. Ensayo de dureza Brinell

El ensayo de dureza se realizó como parte de la caracterización del material, para analizar si existía alguna diferencia en dureza entre los discos, se realizó un mapeo de dureza en la sección transversal de cada uno de los discos en las 4 posiciones analizadas con las pruebas mecánicas, como se muestra en la figura 4.30.

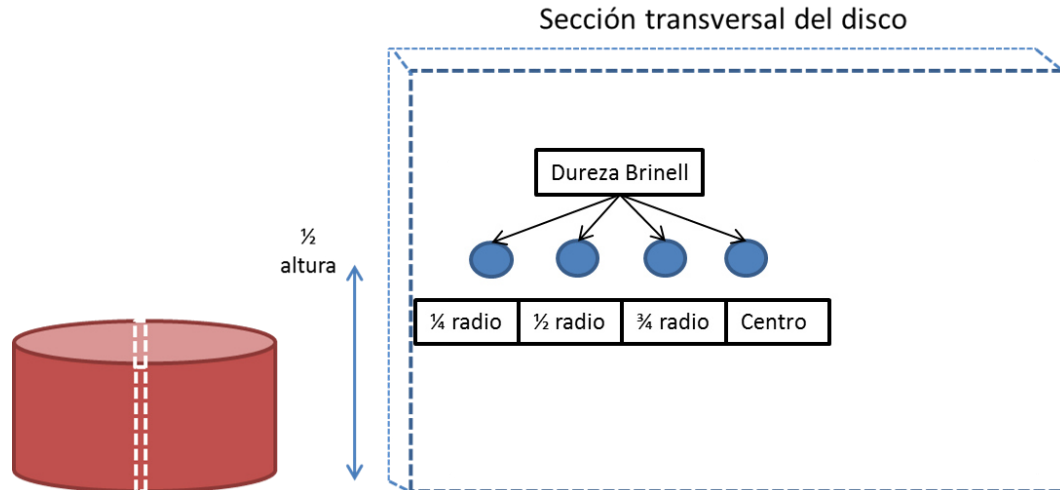


Figura 4.30. Mapeo de dureza Brinell realizado en la sección transversal de los discos.

La Tabla 4.9 muestra un resumen de las durezas obtenidas y se aprecia la tendencia observada en las propiedades de tensión e impacto donde las mejores propiedades se tienen cerca de la superficie en la posición de $\frac{1}{4}$ de radio, excepto en el disco número 1 (reducción de forja 1) donde los valores de dureza son mayores en las posiciones del centro del disco.

Tabla 4.9. Resumen de durezas Brinell en los 5 discos, en las 4 posiciones analizadas.

Reducción de forja	Centro	$\frac{3}{4}$ Radio	$\frac{1}{2}$ Radio	$\frac{1}{4}$ Radio
1 (Disco 1)	281	272	264	269
1.25 (Disco 2)	255	256	264	265
1.5 (Disco 3)	252	255	257	266
2 (Disco 4)	259	263	267	275
3 (Disco 5)	253	252	271	269

2. Prueba de microestructura

A continuación en la figura 4.31 se comparan los 5 discos microestructuralmente en la zona del centro a 100X.

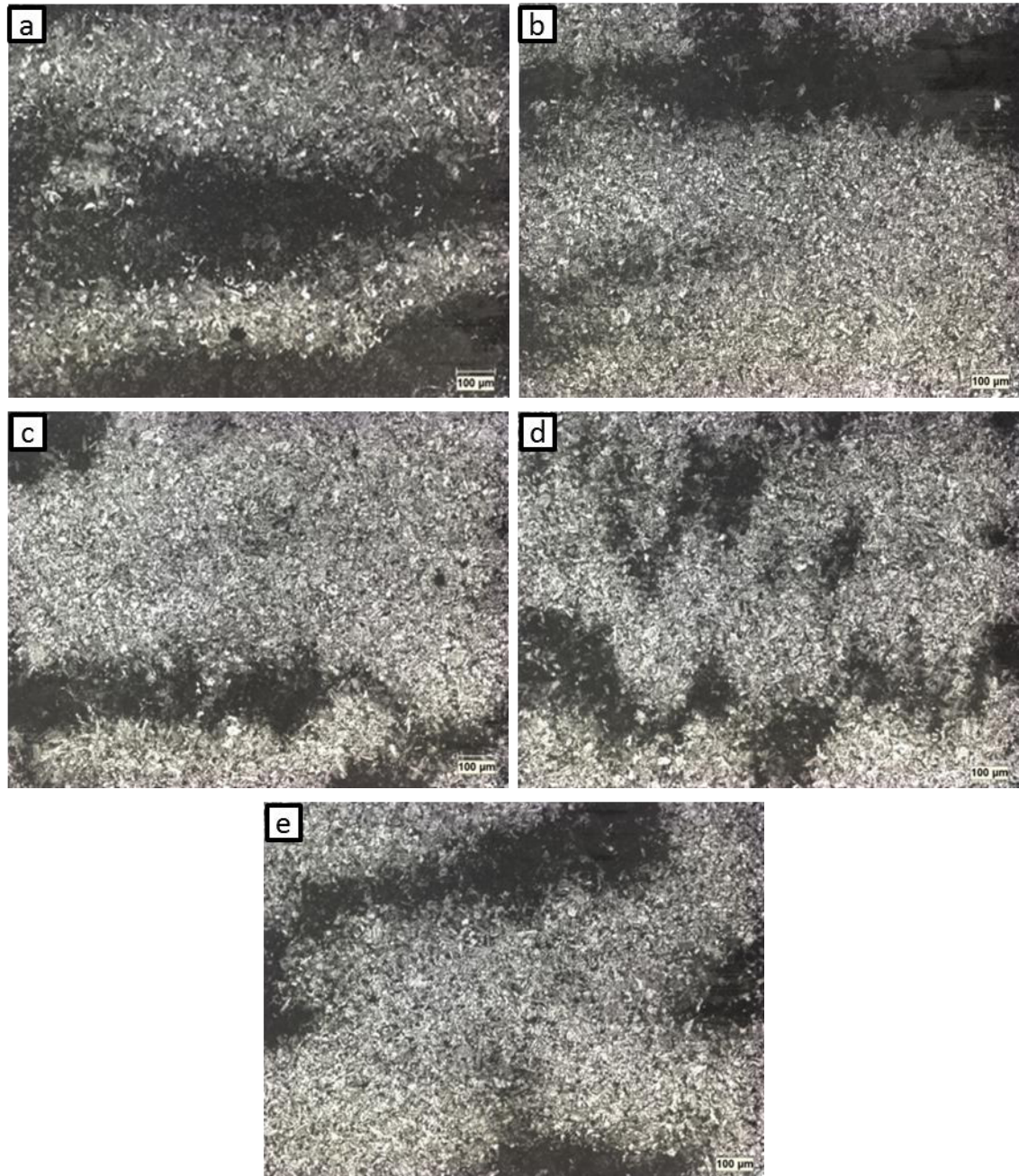


Figura 4.31 Comparación microestructural de los distintos discos en la zona del centro a 100X. a) Disco 1 (Red. forja 1), b) disco 2 (Red. forja 1.25), c) disco 3 (Red. forja 1.5), d) disco 4 (Red. forja 2), e) disco 5 (Red. forja 3).

En todas las metalografías de microestructura se observan dos fases, una de área oscura perteneciendo a una martensita revenida fina y un área blanca de una fase bainítica.

Los discos con reducción de *upsetting* (disco 2 al 5) se ven muy similares en su microestructura, excepto el disco número 1 (reducción de forja 1), donde tiene una mayor concentración de martensita fina y un bandeo químico evidente.

Se hicieron metalografías a una mayor magnificación sobre las distintas fases para una mejor apreciación en la figura 4.32.

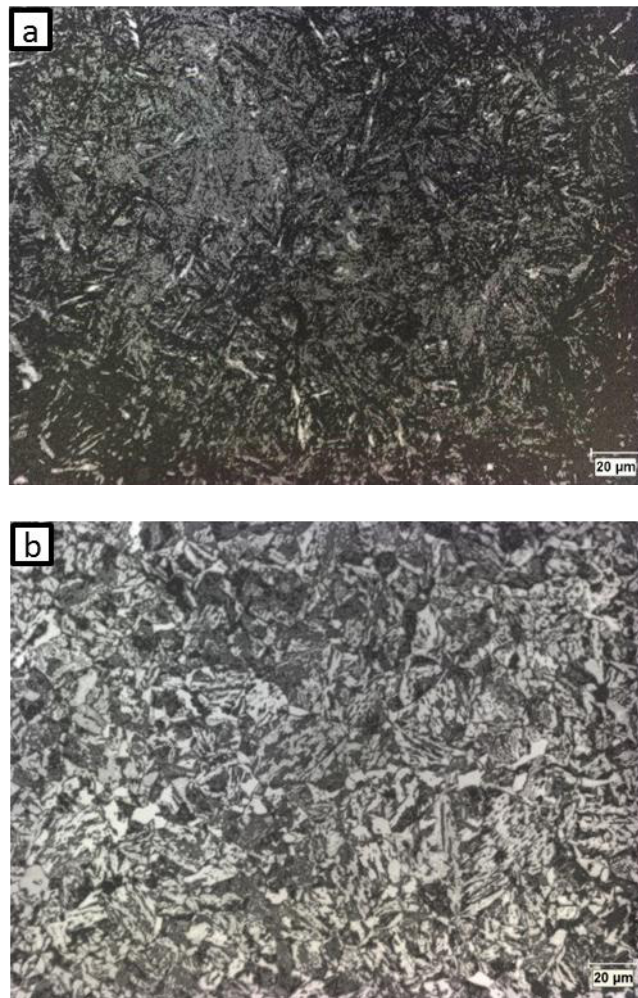


Figura 4.32. Metalografías a 500X (disco número 1) a) Martensita fina revenida, b) Bainita.

Otra comparación microestructural se realizó en el disco de interés (disco número 1) en sus cuatro distintas posiciones centro, $\frac{3}{4}$ de radio, $\frac{1}{2}$ de radio y $\frac{1}{4}$ de radio, las metalografías fueron tomadas a 50X (Figura 4.33).

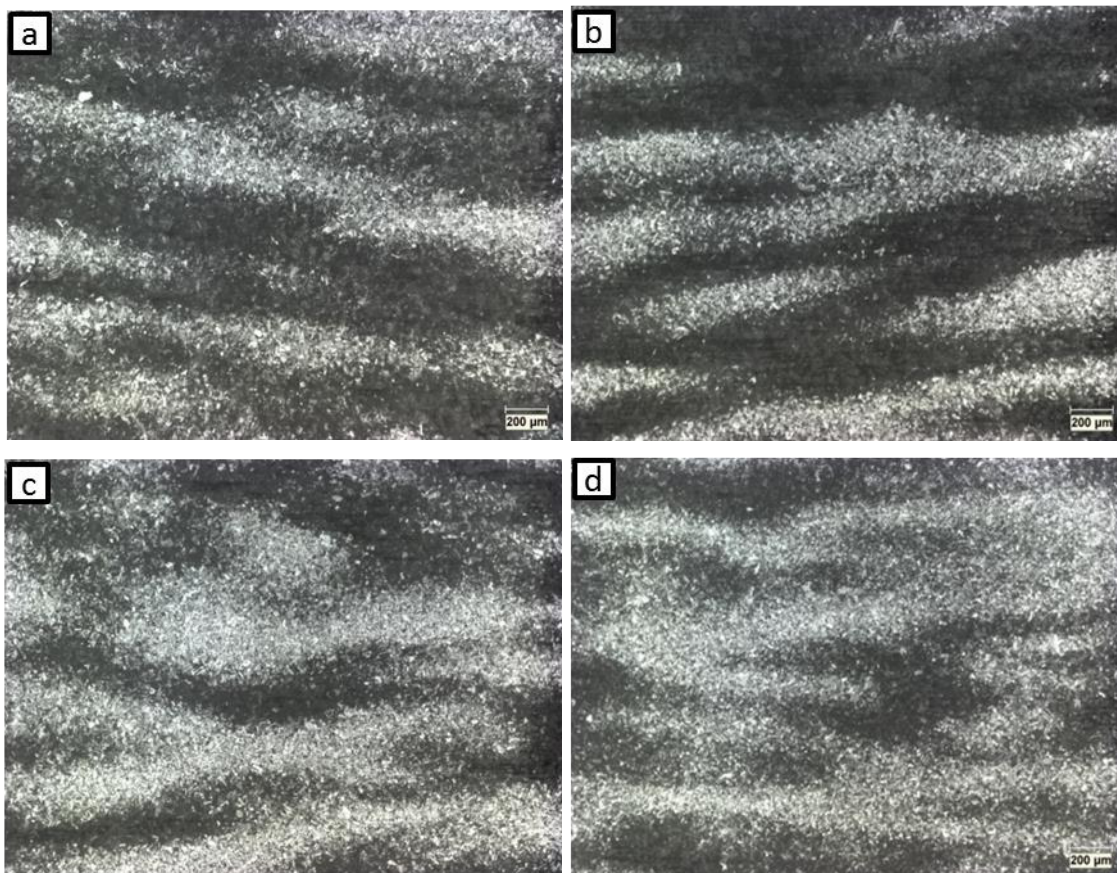


Figura 4.33. Metalografías de microestructura a 50X. a) centro, b) $\frac{3}{4}$ radio, c) $\frac{1}{2}$ radio, d) $\frac{1}{4}$ radio.

En la comparación de la figura 4.33, la diferencia que se logra apreciar es que en el centro del disco hay un bandeo más pronunciado y las bandas son más finas en comparación al resto de las zonas del disco. El bandeo químico es promovido cuando hay una alta concentración de elementos como manganeso, cromo y molibdeno, por lo que se efectuaron pruebas de análisis químico [54].

3. Análisis químico

Siguiendo con la caracterización del disco número 1 (reducción de forja 1), se realizó un análisis químico por medio de espectrometría, dando la respuesta al fenómeno ocurrido en este disco.

En la Tabla 4.10 se muestra una comparativa de la composición química de los discos en la posición del centro del disco. Donde se aprecia que los resultados de la química en el centro del disco número 1 es diferente al resto de los discos, teniendo una mayor concentración en la mayoría de los elementos, esto se relaciona a las elevadas propiedades de resistencia a la tensión y dureza, al presentar un 0.07% de C, 0.085% de Mn, 0.078% de Cr, 0.076% de Mo y un 0.048% Ni por encima del promedio.

Tabla 4.10. Comparación química entre los distintos discos en posición del centro.

Disco con reducción	%C	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
Promedio	0.306	0.881	0.962	0.424	0.829
1 (Disco 1)	0.376	0.966	1.04	0.5	0.877
1.25 (Disco 2)	0.325	0.892	0.978	0.434	0.843
1.5 (Disco 3)	0.298	0.884	0.961	0.428	0.829
2 (Disco 4)	0.303	0.871	0.957	0.412	0.821
3 (Disco 5)	0.296	0.875	0.953	0.421	0.821

Se realizó una segunda comparación, en dos distintas zonas del disco número 1 (reducción de forja 1) y número 5 (reducción de forja 3) para ver la presencia de alguna segregación, como se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Comparación química entre las posiciones de centro y $\frac{1}{4}$ de radio en un mismo disco.

Disco con Reducción	Posición	%C	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
1 (Disco 1)	Centro	0.376	0.966	1.04	0.5	0.877
1 (Disco 1)	$\frac{1}{4}$ radio	0.338	0.919	0.99	0.444	0.862
3 (Disco 5)	Centro	0.296	0.875	0.953	0.421	0.821
3 (Disco 5)	$\frac{1}{4}$ radio	0.309	0.898	0.964	0.43	0.837

Con los resultados de la tabla 4.11, podemos concluir que el disco número 1 (reducción de forja 1) cuenta con una evidente segregación química en el centro del disco lo cual ocasiono un incremento en las propiedades resistencia a la tensión y dureza.

No se cuenta con el dato de la posición de extracción del disco número 1 en el lingote, pero por los resultados se puede suponer que la extracción fue en una zona cercana a la mazarota del lingote con una velocidad de solidificación lenta permitiendo esta segregación química, como se observa en la figura 4.34.

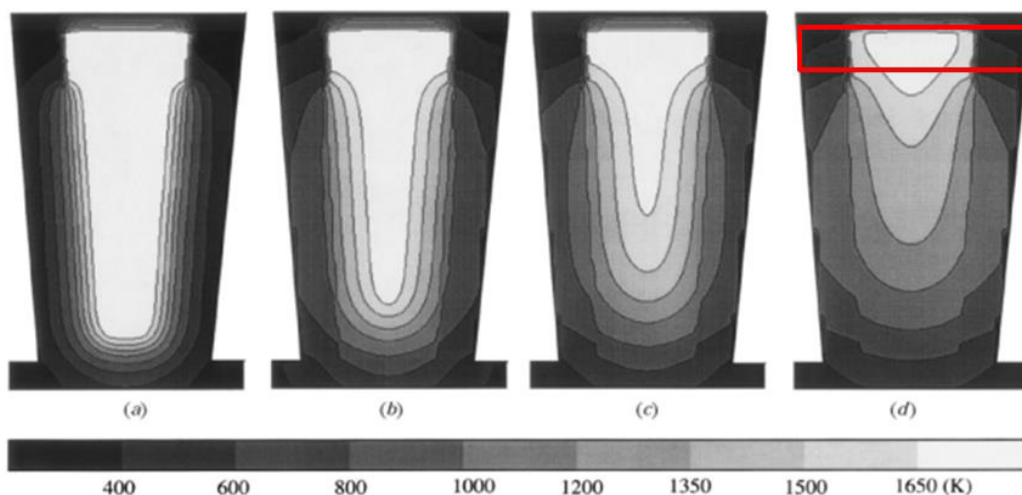


Figura 4.34. Representación teórica de donde se extrajo el disco con alta segregación, figura con distintas temperaturas teóricas en la solidificación a distintos tiempos a) 3000s, b) 9000s, c) 15000s, d) 24000s.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Respecto al comportamiento anisotrópico en el material:

- La prueba de macroataque dio indicios de como es el flujo preferencial del grano en los distintos discos, es una prueba cualitativa que ayudó a entender el flujo de metal en la pieza.
- El flujo preferencial y el grado de anisotropía varía en cada disco, incluso en el mismo disco hay distintos grados de anisotropía y flujos preferenciales dependiendo la posición analizada.
- Conforme incrementa la reducción de forja de tipo *upsetting* incrementaron los valores de las propiedades en el sentido radial y disminuyeron en el sentido axial, debido a la reorientación de flujo.
- Con los resultados de las propiedades mecánicas se logró identificar que a partir de una reducción de forja tipo *upsetting* de 1.5 ocurre una reorientación de flujo hacia el sentido radial solo en la posición del centro

del disco, una reducción de forja de forja de 2 para reorientar el flujo en las posiciones de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de radio, mientras que la posición de $\frac{1}{4}$ de radio requirió de una reducción de forja de 3 para su reorientación, estas posiciones fueron evaluadas a media altura del disco.

- La energía de impacto es la propiedad con un mayor comportamiento anisotrópico, en comparación con la propiedad de resistencia a la tensión.

Respecto a la simulación:

- Con la simulación numérica se determinó un valor mínimo de 0.95 mm/mm de deformación Von Mises para que ocurra la reorientación de flujo de un sentido axial a uno radial durante el proceso de forjado de tipo *upsetting*.
- Se identificaron las zonas con mayor y menor deformación, la zona con mayor deformación fue en el centro del disco, mientras que la zona con menor deformación fue a $\frac{1}{2}$ diámetro en las zonas en contacto con los dados herramienta.
- En los discos de mayor reducción se logró identificar distintos patrones de flujo, a media altura del disco se observó un flujo radial, en cambio en una altura cercana a los dados de trabajo, el flujo preferencial se encontró en un sentido diagonal con una inclinación de alrededor de 45° .

Caracterización de disco número 1:

- El valor más alto de resistencia a la tensión y dureza se encontraron en el centro de la pieza, se logró identificar una segregación química en el centro de la pieza, proviniendo dicha segregación de la materia prima, ya que la extracción de la pieza fue de una zona del lingote con una velocidad de solidificación lenta permitiendo esta segregación.

5.2 Recomendaciones

A continuación se presentan recomendaciones para futuras investigaciones derivadas de este proyecto:

1. Estudiar el flujo en anillos rolados y remanentes de flujo de procesos anteriores.
2. Realizar simulaciones de discos forjados en distintas condiciones de forjado y grados de acero.
3. Estudiar el efecto en el flujo de grano, del proceso de redondeo en discos durante el forjado para reducir el abarrilamiento.
4. Analizar si el bandeado químico afecta en la heterogeneidad de valores en el set de impactos, y la influencia de la orientación de la ranura.
5. Estudiar si la segregación química decrece con los procesos de formado y tratamiento térmico.

Referencias bibliográficas

1. WALTERS, J.; VAN TYNE, C. J. Grain flow in forgings - The basics. **Forge magazine**, p. <http://www.forgemag.com/articles/84265-grain-flow-in-forgings---the-basics>, 2014.
2. HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, n. 281-297, 1948.
3. BYRER, T. G.; SEMIATIN, S. L.; VOLLMER, D. C. **Forging handbook**. [S.I.]: Forging Industry Association, 1985.
4. VERLINDEN, B. et al. **Thermo-mechanical processing of metallic materials**. [S.I.]: Elsevier, 2007.
5. WENK, H.-R.; VAN HOUTTE, P. Texture and anisotropy. **Institute of physics publishing**, p. 1367-1428, 2004.
6. MORRAL, F. R.; JIMENO, E.; MOLERA, P. **Metalurgia general. 2**. [S.I.]: Barcelona : Reverté, 1985.
7. CAMINERO TORIJA, M. A. **Elastoplasticidad anisótropa de metales en grandes deformaciones**. Cuenca. 2010.
8. GRANGE, R. A. Effect of microstructural banding in steel. **Metallurgical Transactions**, v. Volume 2, n. Issue 2, p. pp 417–426, February 1971.
9. WEVER, F. **Z. Phys.** [S.I.]. 1924. (28 69).
10. SCHULZ, L. G. **J. Appl. Phys.** [S.I.]. 1949. (20 1033).
11. BROCKHOUSE, B. N. **Can. J. Phys.** [S.I.]. 1953. (31 339-55).

12. ASTM E381-01 - Standar method of macroetch testing steel bars, billets, blooms, and forgings. **ASTM**, 2012.
13. ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. **Cold and hot forging**. Materials Park, Ohio: ASM , 2004.
14. CALLISTER, W. D. **Ciencia e ingeniería de los materiales**. Barcelona: Editorial Reverté, 1995.
15. WALTERS, J.; VAN TYNE, C. J. Grain Flow in forgings II - How Forging Changes grain flow. **Forge magazine**, p. <http://www.forgemag.com/articles/84286-grain-flow-in-forgings-ii-how-forging-changes-grain-flow>, 2014.
16. WALTERS, J.; VAN TYNE, C. J. Grain flow in forgings V - Modifying grain flow and use of simulation. **Forge magazine**, p. <http://www.forgemag.com/articles/84390-grain-flow-in-forgings-v-modifying-grain-flow-and-use-of-simulation>, 2015.
17. WALTERS, J.; VAN TYNE, C. J. Grain flow in forgings VI - Preforms and Open-Die forging. **Forge magazine**, p. <http://www.forgemag.com/articles/84435-grain-flow-in-forgings-vi-preforms-and-open-die-forging>, 2015.
18. ALTAN, T. et al. **Forging equipment, materials and practices**. Batelle, Columbus, OH, USA, : [s.n.], 1973. ISBN p. 2.
19. MATAYA, M. C.; BROWN, E. L.; RIENDEAU, M. P. Effect of hot working on structure and strenght of type 304L austenitic stainless steel, v. Metallurgical Transactions A 21A, 1990. ISSN pp 1969-1987.
20. DUDRA, S. P.; IM, Y.-T. Investigation of metal flow in open-die forging with different die and billet geometries. **Elsevier**, p. 143-154, 1990.

21. MONTMITONNET, P.; CHENOT, J. L. Introduction of anisotropy in viscoplastic 2D and 3D finite-element simulations of hot forging. **Journal of materials processing technology** **53**, p. 662-683, 1995.
22. KADA, O. et al. Claculation of isthermal flow stress by combination of FEM and simple compression test. **Faculty of engineering science, Osaka University**, 1998.
23. SINCZAK, J. et al. Prediction of mechanical properties of heavy forgings. **Journalk of mayterials processing technology - Elsevier**, p. 166-173, 1998.
24. SERAJZADEH, S. et al. Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects. **Elsevier**, p. 1537-1545, 2004.
25. ALTAN, T.; SHIRGAOKAR, M. Selection of forging equipment. In: Metalworking: Bulk forming, ASM handbook, vol. 14A., Materials Park, OH, USA, 2005. ISSN pp 36-46.
26. FORGED Grain Flow Boosts Fatigue Life, v. FORGING SOLUTIONS- Design Engineering Information From FIA, 2007.
27. AKSAKAL, B.; OSMAN, F. H.; BRAMLEY, A. N. Dtermination of experimental axial and sideways metal flow in open die forging. **Material and design - Elsevier**, p. 576-583, 2008.
28. SERAJZADEH, S. Prediction of thermomechanical behavior during hot upsetting using neural networks. **Materials science and engineering A** **472**, p. 140-147, 2008.
29. ZHANG, Y.; SHAN, D.; XU, F. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging. **Journal of material processing technology, Elsevier**, p. 745-753, 2009.

30. WHY are forgings so prevalent, 2009. ISSN <https://www.forging.org/why-are-forgings-so-prevalent>.
31. SWITZNER, N. T.; VAN TYNE, C. J.; MATAYA, M. C. Effect of forging strain rate and deformation temperature on the mechanical properties of warm-worked 304L stainless steel. **Journal of materials processing technology** **210**, p. 998-1007, 2010.
32. GHASSEMALI, E. et al. Grain size and workpiece dimension effects on material flow in an open-die micro-forging/extrusion process. **Materials science and engineering A** **582**, p. 379-388, 2013.
33. WALTERS, J.; VAN TYNE, C. J. Grain flow in forgings III - Effects of forging on grain flow. **Forge magazine**, p. <http://www.forgemag.com/articles/84304-grain-flow-in-forgings-iii-effects-of-forging-on-grain-flow>, 2015.
34. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufactura, ingeniería y tecnología**. [S.I.]: PEARSON EDUCACION, 2002.
35. GROOVER, M. P. **Fundamentos de manufactura moderna**. [S.I.]: PEARSON, 1997.
36. ALTAN, T. **Metal forming fundamentals and applications**. [S.I.]: American society for metals, 1983.
37. ALTAN, T. **heat generation and temperatures in wire and rod drawing**. [S.I.]: [s.n.], 1970. ISBN p 54.
38. SCHEY, J. **Tribology in metalworking: lubrication, friction and wear**. [S.I.]: american society for metals, 1983.
39. BECKER, A. A. **The boundary element method in engineering**. [S.I.]: McGraw Hill International editions, 1992.

40. NGAILE, G.; ALTAN, T. **Simulations of manufacturing processes: past, present and future.** [S.I.]: ICTP, 2002. ISBN p 271.
41. VASQUEZ, V.; WALTERS, J.; ALTAN, T. **Forging process simulation-state of the art in USA.** Stuttgart, Germany: proceedings of the conference on new developments in forging technology, 1999.
42. SFTC. **DEFORM 7.2 User manuals, Scientific Forming Technologies Corporation.** Columbus, OH: [s.n.], 2002.
43. ARAI, T.; BAKER, G. M.; BATES, C. E. **ASM HANDBOOK - VOLUME 4 Heat Treating.** [S.I.]: ASM, 1991.
44. PAZOS PEINADO, N. **Tecnología de los metales y proceso de manufactura.** Caracas: [s.n.], 2005.
45. CHANDLER, H. **Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels 2nd Edition.** [S.I.]: ASM International, 1995.
46. COMPANY, B. S. **Modern Steels and Their Properties.** [S.I.]: Bethlehem Steel Company, 1961.
47. ASTM A370 -11a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [S.I.]: ASTM International, 2011.
48. ASTM E415-15 - Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
49. ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. [S.I.]: ASTM International, 2011.
50. ASTM E8/E8M – 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. [S.I.]: ASTM International, 2011.

51. ASTM E 23 – 07a Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. [S.I.]: ASTM International, 2007.
52. ASTM E 10 – 07a Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. [S.I.]: ASTM International, 2007.
53. ASTM E407-07(2015), Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. [S.I.]: ASTM International, 2015.
54. MAJKA, T. F.; MATLOCK, D. K.; KRAUSS, G. Development of microstructural banding in low-alloy steel with simulated Mn segregation. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 33, 2002.
55. HUMPHREYS, F. J. **8th Int. Conf. on textures of materials**. Warrendale, PA. 1988. (p 171).
56. SCHAWARZER, R. A.; SUKKAU, J. **Mater. Sci. Forum**. [S.I.]. 1998. (273-275 215).
57. RANDLE, V.; ENGLE, O. **Introduction to texture analysis: Macrotecture, microtexture and orientation mapping**. London: Gordon and breach science. 2000.
58. WRIGHT, S. I.; ADAMS, B. L. **Metall. Trans. A**. [S.I.]. 1992. (23 759).
59. KOBASHI, S.; ALTAN, T. **Metal forming and the finite element method**. Oxford university press: [s.n.], 1989.
60. THOMSEN, E. G.; YANG, C. T. **An experimental investigation of the mechanics of plastic deformation of metals**. [S.I.]: Univ. of california, 1954. ISBN pub. eng., vol 5.
61. ASTM E112 – 13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. [S.I.]: ASTM International, 2013.

62. ASTM E384-11e1, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Composición química acero AISI 8630	42
Tabla 2.2. Principales elementos aleantes acero AISI 8630.....	42
Tabla 3.1. Composición química del acero de baja aleación tipo AISI 8630	45
Tabla 3.2. Diámetros y reducciones, deformación tipo cogging.....	47
Tabla 3.3. Alturas y reducciones, deformación tipo upsetting.....	48
Tabla 3.4. Resumen de reducciones de forja en cada disco	49
Tabla 4.1. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 1 (reducción de forja 1).....	66
Tabla 4.2. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 2 (reducción de forja 1.25).....	70
Tabla 4.3. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 3 (reducción de forja 1.5).....	72
Tabla 4.4. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 4 (reducción de forja 2).....	74
Tabla 4.5. Resultados de propiedades mecánicas en disco número 5 (reducción de forja 3).....	76
Tabla 4.6. Resultados de % de anisotropía en la energía de impacto ...	76
Tabla 4.7. Resultados de pruebas mecánicas en disco 4 con reducción de forja 2 (posiciones a ¼ de altura).....	93

Tabla 4.8. Resultados de pruebas mecánicas en disco 5 con reducción de forja 3 (posiciones a $\frac{1}{4}$ de altura).....	95
Tabla 4.9. Resumen de durezas Brinell en los 5 discos, en las 4 posiciones analizadas.....	97
Tabla 4.10. Comparación química entre los distintos discos en posición del centro.....	101
Tabla 4.11. Comparación química entre las posiciones de centro y $\frac{1}{4}$ de radio en un mismo disco	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ejemplo de flujo en una probeta de tensión, la flecha indica la propagación de la grieta a) longitudinal b) transversal.....	2
Figura 1.2. Dirección de material desplazado.....	3
Figura 1.3. Comportamiento de propiedades mecánicas vs reducción de forja	3
Figura 2.1. a) Material sin textura, b) material con textura cristalográfica, c) material con textura morfológica. (Los cubos representan las orientaciones cristalográficas).....	5
Figura 2.2. Microestructura en bandas de un acero bajo carbono, atacada con nital. 75X.....	8
Figura 2.3. Comparación esquemática de la forma de los granos en una muestra con y sin deformación direccionada.....	11
Figura 2.4. Típica Influencia en la ductilidad axial y radial durante la reducción por <i>upsetting</i>	12
Figura 2.5. Obtención de pieza cilíndrica mediante distintos métodos de fabricación a) placa, b) barra, c) forjado entre prensas.....	14
Figura 2.6. El flujo de grano en la pieza puede ser completamente diferente en la misma pieza dependiendo el método de manufactura a) placa, b) barra, c) forjado entre prensas.....	14
Figura 2.7. Diagrama que muestra el incremento en la ductilidad de aceros como resultado de la reducción de porosidad y el tamaño de las inclusiones durante el forjado	19
Figura 2.8. Concepto de escalar dislocaciones fuera del plano de deslizamiento. a) Antes, b) después del intercambio de vacancias.....	21
Figura 2.9. a) Forjado en dado abierto, b) forjado en dado cerrado, c) forjado sin rebaba.....	26

Figura 2.10. Figura muestra el proceso de Forja Radial	27
Figura 2.11. Figura muestra el proceso de forja Abierta.	27
Figura 2.12. Deformación cilíndrica de una pieza de trabajo en forja abierta mostrando un abarillamiento pronunciado. a) inicio del proceso, b) deformación parcial y c) forma final.....	28
Figura 2.13. Esquema de prensa hidráulica a) con acumulador, b) directo	29
Figura 2.14. Esquema de prensa hidráulica a) Diseño de empujar: 1, cabezal estacionario del cilindro; 2, montaje del pistón; 3, asiento estacionario (b) Diseño de jalar: 1, montaje del pistón; 2, asiento estacionario; 3, Cabezal con movimiento	31
Figura 2.15. Deformación de pieza de forja con distintas condiciones de fricción, a) sin fricción, b) con fricción	32
Figura 2.16. Tipos de lubricación.....	33
Figura 2.17. Diagrama de la información necesaria previo al modelado con simulación	39
Figura 2.18. Diagrama CCT para acero AISI 8630	43
Figura 3.1. Esquema del paso 1 deformación de estirado tipo <i>cogging</i> y segmentado de barra, a) lingote inicial, b) se aplica carga para reducción de forja, c) barra forjada.....	46
Figura 3.2. Esquema de reducción de forja tipo <i>cogging</i> , a) pieza inicial, b) pieza final	46
Figura 3.3. Deformaciones tipo <i>upsetting</i> , a) pieza forjada en paso 2, b) pieza forjada final	47
Figura 3.4. Imágenes de piezas antes y después de la deformación por <i>upsetting</i>	48

Figura 3.5. Esquema de distribución de piezas durante el tratamiento térmico	50
Figura 3.6. La figura muestra cómo fue la extracción de las probetas (tensión, impacto, dureza) en las distintas posiciones (1, 2, 3, 4) de la sección transversal del disco.....	51
Figura 3.7. Medidas de probeta de tensión utilizada en este trabajo	52
Figura 3.8. Medidas de probeta de impacto utilizada en este trabajo	52
Figura 3.9. Extracción de laja para mapeo de dureza y macroataque ...	53
Figura 3.10. Comportamiento mecánico de material tipo AISI 8630 a 1050°C en distintas velocidades de deformación, obtenido mediante software JMatPro ®	57
Figura 3.11. Conductividad térmica de material tipo AISI 8630 a distintas temperaturas, obtenido mediante software JMatPro ®.....	58
Figura 3.12. Modelo numérico mediante elementos finitos del proceso de forja	59
Figura 4.1. Laja transversal en los discos utilizada para realizar ensayo de macroataque.....	61
Figura 4.2. Disco 1 (reducción <i>upsetting</i> 1), a) fotografía real, b) esquema de flujo	61
Figura 4.3. Disco 2 (reducción <i>upsetting</i> 1.25), a) fotografía real, b) esquema de flujo	62
Figura 4.4. Disco 3 (reducción <i>upsetting</i> 1.5), a) fotografía real, b) esquema de flujo	62
Figura 4.5. Disco 4 (reducción <i>upsetting</i> 2), a) fotografía real, b) esquema de flujo	63
Figura 4.6. Disco 5 (reducción <i>upsetting</i> 3), a) fotografía real, b) esquema de flujo	63

Figura 4.7. Sentido preferencial de disco número 1, a) barra forjada, b) disco	64
Figura 4.8. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial del disco número 1.....	65
Figura 4.9. Modelo numérico del tratamiento térmico de templado en un disco forjado.....	67
Figura 4.10. Patrón de flujos de disco con reducción de forja tipo <i>upsetting</i>	68
Figura 4.11. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial del disco número 2 (reducción de forja de 1.25)	69
Figura 4.12. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 3.....	71
Figura 4.13. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 4.....	73
Figura 4.14. a) Comparación de resistencia a la tensión en sentido axial y radial, b) Comparación de energía al impacto en sentido axial y radial en el disco número 5.....	75
Figura 4.15. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (centro), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto	78
Figura 4.16. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (3/4 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto	79

Figura 4.17. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (1/2 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto	80
Figura 4.18. Comparación de la resistencia a la tensión y energía al impacto en una misma posición (1/4 radio), a) resistencia a la tensión, b) energía al impacto	81
Figura 4.19. Posiciones analizadas en modelado numérico	82
Figura 4.20. Comparación de resultados de deformación Von Mises en las 4 posiciones de los 4 discos analizados por elemento finito	83
Figura 4.21. Sección transversal de disco 2 (reducción 1.25) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo	85
Figura 4.22. Sección transversal de disco 3 (reducción 1.5) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo	86
Figura 4.23. Sección transversal de disco 4 (reducción 2) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo	88
Figura 4.24. Sección transversal de disco 5 (reducción 3) a) resultados de deformación, b) patrón de flujo	89
Figura 4.25. Posiciones analizadas a 1/4 de altura a) disco 4 (reducción 2), b) disco 5 (reducción 3).....	90
Figura 4.26. Grafica de valores de deformación Von Mises para disco 4 (reducción de forja 2) y disco 5 (reducción de forja 3)	91
Figura 4.27. Graficas de resultados reales en disco 4 (reducción de forja 2) a) prueba de tensión, b) prueba de impacto	92
Figura 4.28. Graficas de resultados reales en disco 5 (reducción de forja 3) a) prueba de tensión, b) prueba de impacto	94
Figura 4.29. Representación de extracción de probetas obtenidas en disco número 5, en sentido axial y radial	95

- Figura 4.30. Mapeo de dureza Brinell realizado en la sección transversal de los discos..... 97
- Figura 4.31 Comparación microestructural de los distintos discos en la zona del centro a 100X. a) Disco 1 (Red. forja 1), b) disco 2 (Red. forja 1.25), c) disco 3 (Red. forja 1.5), d) disco 4 (Red. forja 2), e) disco 5 (Red. forja 3) 98
- Figura 4.32. Metalografías a 500X (disco número 1) a) Martensita fina revenida, b) Bainita 99
- Figura 4.33. Metalografías de microestructura a 100X. a) centro, b) $\frac{3}{4}$ radio, c) $\frac{1}{2}$ radio, d) $\frac{1}{4}$ radio..... 100
- Figura 4.34. Representación teórica de donde se extrajo el disco con alta segregación, figura con distintas temperaturas teóricas en la solidificación a distintos tiempos a) 3000s, b) 9000s, c) 15000s, d) 24000s..... 102