

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FORJA ABIERTA PARA
EVITAR DEFECTOS INTERNOS

POR

ADRIAN ESAU CONTRERAS HERNANDEZ

T E S I S

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

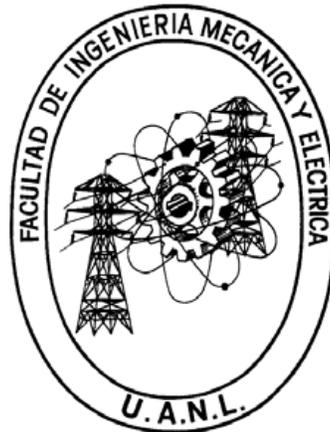
CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FORJA ABIERTA PARA
EVITAR DEFECTOS INTERNOS

POR
ADRIAN ESAU CONTRERAS HERNANDEZ

T E S I S

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

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DE 2013

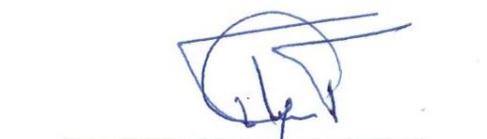
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de la tesis recomendamos que la tesis “**Optimización del Proceso de Forja para Evitar Defectos Internos**” realizada por el Ing. Adrián Esaú Contreras Hernández sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales

El Comité de Tesis


Asesor
Dr. Ignacio Álvarez Elcoro


Coasesor
Dr. Luis Leduc Lezama


Coasesor
Dr. Florentino Fernández Guzmán

San Nicolás de los Garza, N. L., Junio de 2013.

DEDICATORIA

Especialmente a mis padres

Alejandra Hernández y Geo Contreras

A mis hermanos Denisse y Geo

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, gracias por estar conmigo, por compartir mis alegrías y tristezas; por ayudarme y apoyarme en todo lo que hago.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado, el cual es una motivación para el desarrollo de la investigación en el México.

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

A la empresa Frisa Forjado por permitirme trabajar en conjunto y poder llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mis asesores de tesis, Dr. Ignacio Álvarez, Dr. Luis Leduc, Dr. Florentino Fernández, a quienes les agradezco todo el apoyo brindado, sus consejos, su confianza, y sobre todo, su gran amistad.

Al Dr. Rafael Colas por su participación en el proyecto, además de brindarme su apoyo, confianza y amistad.

Al Dr. Octavio Covarrubias por su valiosa participación en el proyecto, además de brindarme su apoyo, confianza y amistad.

A todos y cada uno de los doctores con quienes lleve clase durante mis cursos de maestría, les agradezco por todas las enseñanzas y el apoyo brindado.

Al M.C. Rene Cerda por su ayuda en el proyecto, a mis compañeros y amigos del DIMAT y Frisa, Carlos, Claudia, Douglas, Edgar, Lampazos, Cindy, Mauricio, Vicente, Torres, Diego, Carlos Vázquez, Vladimir, Saúl Carmona, Edtson, Ari, Pepe y todos los que de alguna u otra forma me ayudaron, enseñaron y aconsejaron para realizar este trabajo.

ÍNDICE

CAPITULO I INTRODUCCION	1
1.1 Problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Hipótesis	3
CAPITULO II HIERRO Y SUS ALEACIONES	4
2.1 Introducción	4
2.1.1 Acero	5
2.1.2 Criterios para la clasificación de los aceros	8
2.1.2.1 Clasificación de los aceros	8
2.1.3 Acero 4340	20
CAPITULO III PROCESO DE FORJA	23
3.1 Introducción	23
3.1.1 Diferentes procesos de forja	25
3.1.1.1 Forjado en dado abierto	25
3.1.1.2 Forjado en dado cerrado	28
3.1.1.3 Forjado de precisión	30
3.1.1.4 Forjado sin rebaba	31
3.1.1.5 Forjado de recalcado	33

3.1.1.6 Forjado con rodillos	34
3.1.1.7 Forjado orbital	34
3.1.1.8 Forjado isométrico y forjado en dado caliente	35
3.1.1.9 Estampado con forja y forjado radial	36
3.1.1.10 Laminado de anillos	37
3.1.2 Equipo para forja: dados, martinets y prensas	39
3.1.2.1 Martinets de forja	39
3.1.2.2 Prensas de forjado	43
3.1.2.3 Dados de forjado	46
3.1.3 Defectos en forja	48
3.1.3.1 Métodos de detección de defectos en forja	52
CAPITULO IV METALURGIA DE LA DEFORMACION EN CALIENTE	53
4.1 Deformación en caliente	53
4.2 Recuperación	56
4.3 Recristalización	57
4.4 Crecimiento de grano	59
CAPITULO V PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	61
5.1 Introducción	61
5.2 Plan Experimental	61
5.2.1 Selección y preparación del material	62
5.2.2 Ensayos	64

5.2.2.1 Forja I	64
5.2.2.2 Forja II	68
5.2.2.3 Forja III	69
5.3 Pruebas de laboratorio	72
5.3.1 Líquidos Penetrantes	72
5.3.2 Ultrasonido	75
5.3.3 Macroataque	81
5.3.4 Dureza	83
CAPITULO VI RESULTADOS	87
6.1 Introducción	87
6.2 Ensayos	87
6.2.1 Ensayo de Forja I	88
6.2.2 Ensayo de Forja II	90
6.2.3 Ensayo de Forja III	91
6.2.3.1 Medición de temperatura al centro de la pieza	92
6.3 Prueba de Líquidos Penetrantes	95
6.4 Inspección de Ultrasonido	99
6.5 Ensayos de Macroataque	107
6.6 Ensayo de Durezas	109
6.7 Simulación	121
CAPITULO VII DISCUSIONES	126
7.1 Evolución de la porosidad en los procesos de forjado	126

7.1.1 Variabilidad de la porosidad	127
7.1.2 Comportamiento de la porosidad durante la deformación en forja	128
7.1.2.1 Temperatura	128
7.1.2.2 Deformación (generación de esfuerzos a tensión)	136
CAPITULO VIII CONCLUSIONES	141
8.1 Conclusiones	141
8.2 Recomendaciones	142
8.2.1 Recomendaciones a la Industria	142
8.2.2 Trabajo a futuro	142
BIBLIOGRAFIA	144
LISTA DE TABLAS	149
LISTA DE FIGURAS	151
ANEXO I	159
ANEXO II	163
ANEXO III	177
ANEXO IV	182
ANEXO V	187

RESUMEN

El entendimiento del comportamiento de la porosidad (defectos internos) debido a la deformación en caliente en los materiales utilizados para la fabricación de componentes de alta resistencia mediante el proceso de forja abierta, es de vital importancia para la optimización y el desarrollo de productos de alta calidad.

Hoy en día, la forja de lingotes de fundición de grandes dimensiones, es el proceso primordial para la producción de estos productos. Sin embargo, existe una problemática, ya que estos lingotes presentan defectos internos debido a su proceso de fabricación, por lo que la consolidación de estos defectos es de suma importancia.

Debido a esta problemática industrial, en el presente trabajo de investigación se desarrollaron una serie de pruebas y ensayos en la empresa Frisa Forjados, la cual cuenta con el proceso de forja abierta, con el fin de poder determinar la deformación real mínima que permitiera cerrar los defectos internos en un lingote cónico de acero 4340.

Mediante pruebas de ultrasonido se pudo llevar a cabo una caracterización efectiva de los defectos internos en el material, estas pruebas se realizaron en la condición inicial del material, así como al término de cada ensayo de forja, logrando tener una comparativa del comportamiento de la porosidad y la deformación en todos los ensayos.

En total se realizaron tres ensayos de forja (compresión), en los cuales se varió la reducción del material, presentándose dos fenómenos relacionados con la deformación en los dos últimos ensayos. El primero fue al término del ensayo de forja II, en el cual se presentó un agrietamiento central, aumento de tamaño y generación de defectos. Se pudo justificar que este fenómeno fue a consecuencia de una deformación heterogénea en el material, la cual derivó

diferentes estados de esfuerzos a tensión, provocando así, el fenómeno antes mencionado.

El segundo fue al término del ensayo de forja III, donde se presentó una pequeña concentración de defectos en el material (“zona muerta”). Demostrando que este remanente de defectos internos no alcanzaron su total consolidación debido a una deformación insuficiente en el material; durante este proceso el herramental no cubrió el traslape de inicio de la primera operación, generando así una zona con poca deformación.

Finalmente se pudo determinar que una deformación real de 1.37, es suficiente para la consolidación de defectos internos en un lingote cónico, además, se pudo considerar que la deformación real mínima con un valor de 0.55, es capaz de cerrar los defectos internos presentes en el material durante la última secuencia de pasos en el proceso de forja, asegurando así una pieza sólida al término del proceso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la forja es un proceso industrial importante mediante el cual se hacen una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Estos componentes incluyen flechas y barras de conexión para motores de combustión interna, engranes, componentes estructurales para aviación y partes para turbinas, entre otros. Además, las industrias del acero y de otros materiales usan este proceso para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

Existe una creciente necesidad de producir grandes componentes forjados para las industrias antes mencionadas. La forja de lingotes de fundición de gran tamaño es el proceso principal que se utiliza para producir componentes de alta calidad.

A menudo estos lingotes contienen defectos o características microestructurales indeseables, como huecos y zonas relacionadas con la solidificación. El cierre de estos defectos es un tema frecuentemente estudiado, pero todavía desafiante en la industria de forja abierta.

1.1 Problema

En la práctica, la forja abierta se emplea como un eficaz proceso de conformación en caliente para hacer la forma deseada de productos de metal, así como para asegurar la consolidación de los defectos internos que resultan del proceso de fundición. Actualmente, las grandes piezas forjadas han sido cada vez más necesarias para satisfacer la demanda de las industrias. Sin embargo, el aumento en el tamaño del lingote tiende a causar considerables macrosegregaciones, cavidades de contracción o huecos, que tienen que ser trabajadas a fondo durante el proceso de forjado, pero el tamaño de los productos y limitaciones de capacidad de fabricación, tales como la carga de la prensa, hacen que sea difícil lograr una deformación local adecuada para cerrar dichos defectos.

Si estos defectos no se cierran durante la primera etapas de deformación, pueden producir grietas en los siguientes pasos del proceso de forja, produciendo piezas no aptas para las aplicaciones deseadas.

1.2 Justificación

La finalidad de realizar este proyecto, se debe al interés de la industria dedicada al proceso de forja abierta en conocer la deformación real mínima que permitirá cerrar los defectos internos en lingotes de acero 4340; además de contribuir al desarrollo tecnológico y científico.

1.3 Objetivos

- Optimización de proceso en Forja Abierta en lingotes de acero 4340.
- Optimización de diseño de pasos del proceso de forja abierta.

1.4 Hipótesis

Mediante diferentes condiciones de reducción es posible determinar una deformación real mínima para producir un lingote libre de defectos.

CAPÍTULO 2

HIERRO Y SUS ALEACIONES

2.1 Introducción

Los metales y aleaciones poseen muchas propiedades útiles en ingeniería, por lo que presentan gran aplicación en los diseños de ingeniería. Desde su utilización como materiales estructurales, resistentes a la oxidación, resistencia a altas y bajas temperaturas, resistencia a la fatiga y elevada tenacidad son las propiedades que han permitido el enorme desarrollo de los metales hasta la actualidad y la optimización de sus propiedades.

El hierro y sus aleaciones (principalmente el acero) son aproximadamente el noventa por ciento de la producción mundial de metales, fundamentalmente por la combinación de buena resistencia, tenacidad y ductilidad a un coste relativamente bajo. [1]

Las propiedades y datos referentes al hierro se especifican en la siguiente Tabla:

Tabla 2.1 Datos básicos del elemento metálico Hierro. [1]

Símbolo:	Fe
Numero atómico:	26
Gravedad específica:	7.87 gr/cm ³
Estructura cristalina:	Cubica centrada en el cuerpo (BCC)
Temperatura de fusión:	1535°C (2802 °F)
Módulo de elasticidad:	209x10 ³ Mpa (30x10 ⁶ lb/pulg ²)
Mineral principal:	Hematita (Fe ₂ O ₃)
Elementos de aleación:	Carbono, cromo, manganeso, níquel, molibdeno, vanadio y silicio
Aplicaciones típicas:	Construcción, maquinaria, automotores, vías, equipo ferroviario

Las aleaciones basadas en hierro y carbono se denominan *aleaciones ferrosas*, y las que se basan en los demás metales son *aleaciones no ferrosas*. Estas aleaciones ferrosas incluyen los aceros al carbono, aceros aleados y de herramientas, los aceros inoxidables y los hierros fundidos. [2]

2.1.1 Acero

El acero es una aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2.11% de carbono en peso. Los aceros típicamente se producen de dos formas: refinando el material de hierro o reciclando chatarra de acero.

Para la producción de acero primario, el mineral de hierro (óxido de hierro) se calienta en un alto horno en presencia de coque (carbono) y oxígeno. El carbono reduce el óxido de hierro a hierro en bruto líquido, produciendo monóxido de carbono y bióxido de carbono como subproductos. La piedra caliza, agregada para ayudar a eliminar impurezas, se funde produciendo escoria líquida. Dado que el hierro bruto líquido contiene cantidades muy

grandes de carbono, se sopla oxígeno en el horno de oxigenación o de aceración básico para eliminar carbón excedente y producir acero líquido.

También se produce acero reciclando la chatarra del mismo metal. A menudo esta se introduce en un horno de arco eléctrico, en el cual el calor la funde. Muchos aceros aleados y aceros especiales también se producen utilizando hornos eléctricos.

El acero líquido en ocasiones se vacía directamente en moldes para producir fundiciones de acero terminadas; otra manera es que se le permite solidificar en formas que posteriormente son procesadas por técnicas de conformado de metales como es el laminado o el forjado. En este último caso, el acero es vaciado en grandes lingoteras o se funde de manera continua en formas regulares. [2]

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo que resume las etapas de los procesos principales que tienen lugar en la conversión de las materias primas en las formas de los principales productos de acero.

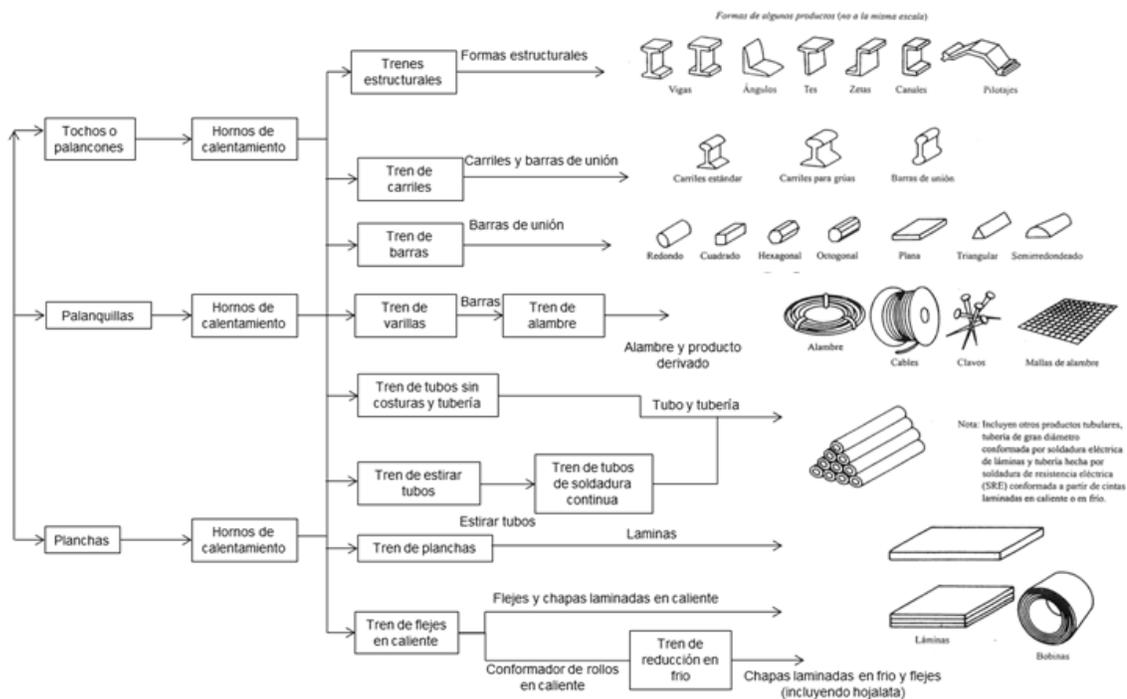
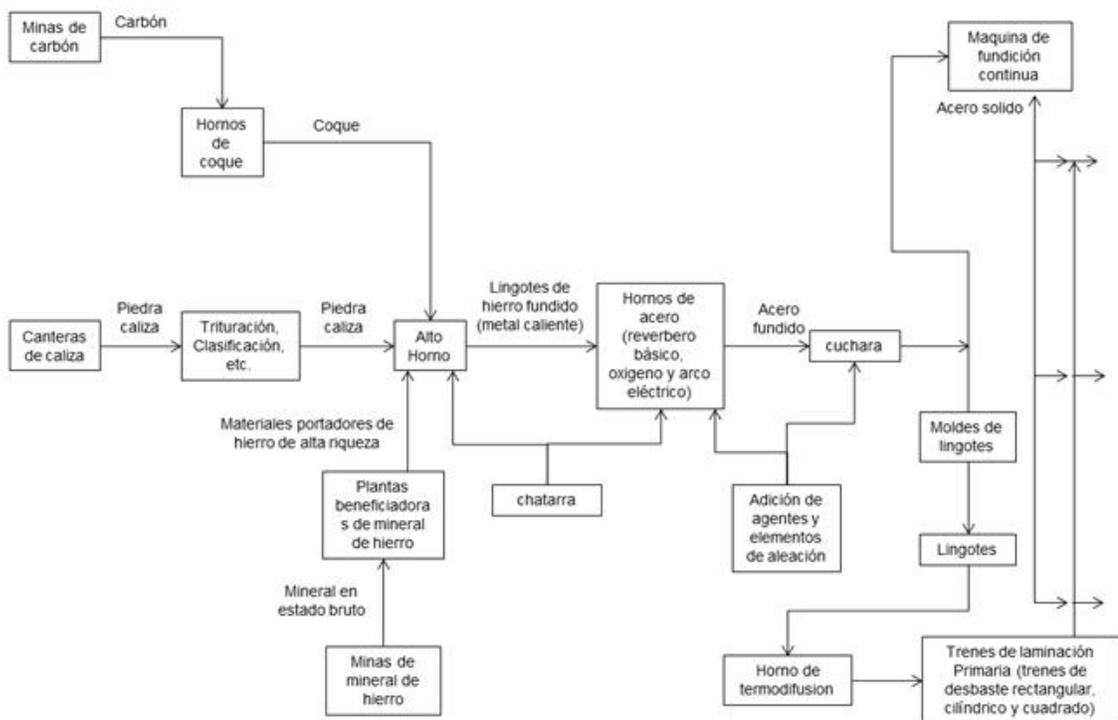


Figura 2.1 Diagrama de flujo que muestra las etapas de los procesos principales que tienen lugar en la conversión de las materias primas en las formas de los productos principales de acero, sin incluir productos recubiertos. [2]

2.1.2 Criterios para la clasificación de los aceros

El acero se caracteriza por su gran resistencia. La versatilidad del acero como material de ingeniería se debe al proceso de fabricación del acero desde su inicio en la etapa de reducción de mineral, pasando por varios procesos aplicados, hasta los productos semiterminados y terminados.

En la familia de las aleaciones de hierro, la principal diferencia es el contenido de carbono que contienen. El hierro como elemento puro resiste muy poco la deformación plástica por estar constituido solo de cristales de ferrita; cuando se alea con carbono se forman estructuras de cristales diferentes que permiten gran incremento de su resistencia. Un 92% de todo el acero es simple Acero al Carbono, el resto es Acero Aleado, en el cual el hierro está en aleación con diversas cantidades adicionadas de elementos, como Níquel, Cromo, Molibdeno, Vanadio, Manganeso. [2]

2.1.2.1 Clasificación de los aceros

Se consideran comúnmente las siguientes categorías para la clasificación de los aceros: 1) Aceros al carbono, 2) Aceros aleados, 3) Aceros inoxidable, 4) Aceros de herramientas y 5) Hierros fundidos.

Aceros al carbono. Estos aceros contienen carbono como principal elemento de aleación, con solamente pequeñas cantidades de otros elementos. La resistencia de los aceros al carbono se incrementa con el contenido de carbono; en la Figura 2.2 se ilustra una gráfica típica de esta relación.

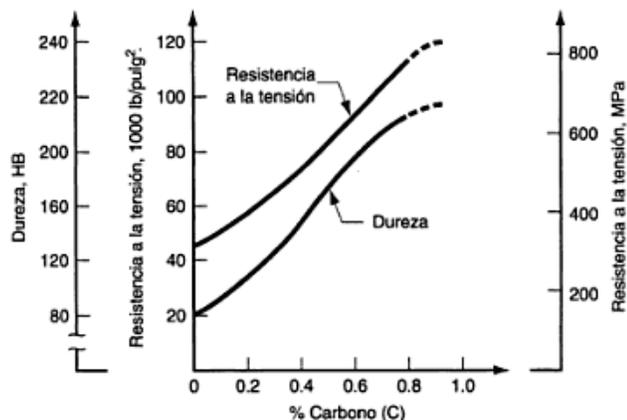


Figura 2.2 Resistencia a la tensión y dureza como una función del contenido de carbono en los aceros al carbono (laminados en caliente) [3]

De acuerdo a un esquema de especificaciones desarrollado por la American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), los aceros al carbono se especifican por un sistema de numeración de cuatro dígitos: 10XX, donde 10 indica que el acero es al carbono, y XX indica el porcentaje en cientos o puntos porcentuales.

Los aceros al carbono se clasifican típicamente en tres grupos de acuerdo con su contenido de carbono:

1. Aceros al bajo carbono, con menos de 0.20% de carbono, son los más usados. Generalmente son tenaces, dúctiles, fáciles de conformar, maquinar y soldar, responden bien a los tratamientos térmicos. Sus aplicaciones típicas son en carrocerías de automóviles, maquinaria eléctrica, para alambres, perfiles, tornillos, etc.
2. Aceros al medio carbono, fluctúan en contenido de carbono entre el 0.2 y 0.50%, se utilizan en piezas estructurales para la industria ferroviaria, ejes, engranes, carriles, etc.

3. Aceros al alto carbono, contienen más de 0.50% de carbono. Se especifican aun para aplicaciones de alta resistencia y donde se necesita rigidez y dureza. Se utilizan para equipo de minería, herramientas de corte, brocas, partes resistentes al desgaste, etc. [3]

Aceros aleados. Son aceros cuyas propiedades características se deben a algún elemento de aleación diferente del carbono. Los aceros de carbono ordinario presentan algunas limitaciones en cuanto a oxidación, corrosión, resistencia al impacto, etc. Para superar estas deficiencias se han desarrollado aceros de aleación, que contienen elementos que mejoran sus propiedades. Estos aceros cuestan más que los aceros ordinarios pero para muchas aplicaciones son los únicos que pueden ser utilizados garantizando su aplicación.

Se añaden elementos de aleación al hierro y al acero con el objetivo de modificar la estructura del cristal y la microestructura, produciendo así un cambio en las propiedades del material. Podemos resumir como los principales elementos de aleación y sus efectos como sigue:

- Cromo (Cr): Mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente. Es uno de los más efectivos elementos de aleación para incrementar la templabilidad. El cromo mejora significativamente las propiedades de resistencia a la corrosión.
- Manganeso (Mn): Mejora la resistencia y dureza del acero. Cuando el acero se trata térmicamente, el incremento de manganeso mejora la templabilidad. Debido a esto, el manganeso se usa ampliamente como elemento de aleación en el acero.
- Molibdeno (Mo): Aumenta la tenacidad, la dureza en caliente y la resistencia a la termoinfluencia. También mejora la templabilidad y forma carburos para resistencia al desgaste.

- Níquel (Ni): mejora la resistencia y tenacidad. Incrementa la templabilidad, pero no tanto como los otros elementos de aleación del acero. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión y es otro de los elementos mayoritarios (además del cromo) en ciertos tipos de aceros inoxidable.
- Vanadio (V): Inhibe el crecimiento de los granos durante el procesamiento a temperaturas elevadas y durante el tratamiento térmico, lo cual mejora la resistencia y tenacidad del acero. También forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

Los aceros de Aleación se clasifican en:

Aceros de Baja Aleación, contienen menos de 8-10% de elementos de aleación.

Aceros de Alta Aleación, contienen más del 10% de elementos de aleación.

El carbono es el elemento principal que afecta las características de los aceros. Tiene efecto importante en el comportamiento mecánico y físico de la aleación resultante. El modo en que se distribuyen los elementos de aleación en el acero depende de la tendencia a formar carburos u otros compuestos por parte de cada elemento. [4]

En la siguiente tabla (Tabla 2.2) se muestra el sistema de asignación de aceros de aleación SAE-AISI.

Tabla 2.2 Asignación de aceros aleados SEA-AISI [4]

NOMBRE	NUMERO SAE-AISI	ELEMENTO DE ALEACION % APROXIMADO
Acero al carbono	10XX	Acero simple al carbono (0.05-0.9%C)
	11XX	Acero al carbono de corte libre
Acero al manganeso	13XX	1.75% Mn
Acero al níquel	23XX	3.5% Ni
	25XX	5%Ni
Acero al níquel-cromo	31XX	1.25% Ni y 0.65 %Cr
	32XX	1.75% Ni y 1.07 %Cr
	33XX	3.5% Ni y 1.57 %Cr
	34XX	3% Ni y 0.77 %Cr
	303XX	Resistente a la corrosión y al calor
Acero al molibdeno	40XX	0.25% Mo; carbono-molibdeno
	44XX	0.4-0.52% Mo
Acero al cromo molibdeno	41XX	0.5-0.95% Cr, 0.12-0.3% Mo; cromo- molibdeno
Acero al níquel-cromo- molibdeno	43XX	0.82% Ni, 0.5 %Cr, 0.25% Mo
	47XX	1.05% Ni, 0.45 %Cr, 0.2% Mo
	86XX	0.55% Ni, 0.5 %Cr, 0.2% Mo
	87XX	0.55% Ni, 0.5 %Cr, 0.25% Mo
	93XX	3.25% Ni, 1.2 %Cr, 0.12% Mo
	98XX	1.00% Ni, 0.8 %Cr, 0.25% Mo
Acero al níquel-molibdeno	46XX	0.85-1.82% Ni, 0.2-0.25% Mo
	48XX	3.5% Ni, 0.25% Mo
Acero al cromo	50XX	0.27-0.65% Cr; bajo cromo
	51XX	0.8-1.05% Cr; bajo cromo
	51XXX	1.02% Cr; mediano cromo
	52XXX	1.45% Cr; alto cromo
	514XX	Resistente a la corrosión y al calor
Acero al cromo-vanadio	61XX	0.6-0.95%Cr, 0.15%V
Acero al tungsteno-cromo	72XX	0.75%Cr, 1.75% W
Acero al silicio-manganeso	92XX	0.65-0.87%Mn, 0.82-2% Si

Aceros inoxidables. Es un acero con alta aleación de cromo (elemento principal de aleación) adicionado con níquel, para mejorar la resistencia a la corrosión y oxidación; contiene relativamente grandes cantidades de cromo, mínimo 11-12% para obtener una resistencia adecuada a la corrosión.

La propiedad de resistencia a la corrosión se debe a una película delgada, adherente, estable, de óxido de cromo u óxido de níquel, que se genera cuando el cromo del acero reacciona con el oxígeno del medio ambiente, que protege efectivamente la superficie del acero contra muchos medios corrosivos. Existe solo cuando el contenido de cromo excede del 10%. Un bajo contenido de carbono genera un acero no endurecible; un alto contenido de carbono genera un acero endurecible por tratamiento térmico. [4]

Un sistema de numeración de 3 dígitos se utiliza para identificar los aceros inoxidables. El primer dígito indica el grupo de acero, los dos últimos dígitos no tienen significado propio. (Tabla 2.3)

Tabla 2.3 Sistema de numeración para identificación de aceros inoxidables. [4]

SERIE	ELEMENTO DE ALEACION	ACERO
2XX	Cromo-Níquel-Manganeso	Austenítico
3XX	Cromo-Níquel	Austenítico
4XX	Cromo	Martensítico
4XX	Cromo	Ferrítico
5XX	Cromo 4-6% (bajo contenido)	Martensítico

Los aceros inoxidables se dividen tradicionalmente en tres grupos, esta clasificación depende de sus componentes químicos y de la estructura o propiedades que demuestren. Los nombres en la clasificación se determinan por la fase predominante en la aleación a temperatura ambiente:

Aceros martensíticos inoxidables: contienen entre 11.5-18% de cromo y entre 0.15-0.75% de carbono, formando una estructura martensítica (tetragonal centrada en el cuerpo). Aceros más comunes: 403, 410, 416, 420, 440, 501, 502.

Propiedades: Estos aceros son magnéticos, pueden trabajarse en frío o caliente sin dificultad, maquinarse, presentan buena tenacidad, gran resistencia a la corrosión, resisten el ablandamiento a elevadas temperaturas, pueden endurecerse con tratamiento térmico.

Aplicaciones: Se usan en aletas para turbina, piezas de fundición resistente a la corrosión, equipo de refinerías petroleras, instrumentos quirúrgicos, piezas de maquinaria, etc.

Aceros ferríticos inoxidables: contienen entre 14-27% de cromo, y máximo 0.25% de carbono. Presenta una estructura ferrítica (cúbica centrada en el cuerpo). Aceros más comunes: 405, 430, 446.

Propiedades: No se pueden endurecer por tratamiento térmico, solo moderadamente mediante trabajo en frío, son magnéticos, pueden trabajarse en frío o en caliente, alcanzan su máxima suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido, poseen buena resistencia mecánica.

Aplicaciones: Recipientes para industrias químicas y alimenticias, tanques para ácido nítrico, piezas para maquinar tornillos, piezas de hornos, entre otras.

Aceros austeníticos inoxidables: tienen como mínimo 23% de cromo y níquel, de 0.03-0.1% de carbono. Presentan una estructura austenítica (cúbica centrada en las caras). Aceros más comunes: 201, 202, 302, 303, 309, 316, 410.

Propiedades: Son no magnéticos, no endurecen por tratamiento térmico, se pueden trabajar fácilmente en caliente o frío, este último les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas, son muy resistentes al impacto y

difíciles de maquinar, tienen la mejor resistencia a elevadas temperaturas, su resistencia a la corrosión es la mejor de todos los aceros inoxidable.

Aplicaciones: Señalamientos, molduras de autos, accesorios de aeronaves, implantaciones quirúrgicas, alambres tornillos, placas, etc. [4]

Aceros de herramientas. Son una clase de alta aleación diseñados para usarse como herramientas industriales de corte, dados y moldes. Para cumplir adecuadamente con su desempeño en estas aplicaciones deben poseer alta resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste y tenacidad al impacto. Estos aceros se tratan térmicamente para obtener estas propiedades. Las razones principales para los altos niveles de elementos de aleación son: templabilidad mejorada, reducción de la distorsión durante el tratamiento térmico, dureza en caliente, formación de carburos metálicos duros para resistencia a la abrasión y tenacidad mejorada.

Los aceros de herramienta se dividen en diversos tipos de acuerdo con su aplicación y composición. La AISI utiliza un esquema de clasificación que incluye un prefijo alfabético para identificar el acero herramienta, (Tabla 2.4). En la siguiente lista de tipos de aceros de herramienta identificamos los prefijos y se presentan algunas composiciones típicas.

Aceros para herramienta de alta velocidad (T, M). Se usan como herramientas de corte en procesos de maquinado. Se formulan para alta resistencia al desgaste y dureza en caliente. Las dos designaciones AISI indican el elemento principal de aleación: T para tungsteno y M para molibdeno.

Aceros de herramienta para trabajo en caliente (H). Están diseñados para dados para trabajo en caliente, forja, extrusión y fundición en dados.

Aceros de herramienta para trabajo en frío. Estos aceros para dados se usan en operaciones como: estampado de láminas metálicas, extrusión en frío y ciertas operaciones de forja. La especificación D representa dado. Las especificaciones AIS más estrechamente relacionadas son A y O, las cuales simbolizan a los

procesos de templado por aire y por aceite (oil). Todos representan una buena resistencia al desgaste y baja distorsión.

Aceros de herramienta endurecibles con agua (W). Estos aceros tienen alto contenido de carbono con poco o ningún otro elemento de aleación. Solo pueden ser endurecidos mediante un rápido enfriamiento en agua. Los dados o matrices para encabezamiento en frío son una aplicación típica.

Aceros de herramienta resistentes al choque (S). Estos aceros se proyectan para usarse en aplicaciones donde se requiere una alta tenacidad, como en muchas cizallas para corte de metal para operaciones de punzonado y doblado.

Aceros para molde (P). Como indica su nombre, estos aceros de herramienta son para moldeado de plásticos y hule.

Aceros de herramienta de baja aleación (L). Estos materiales se reservan generalmente para aplicaciones especiales. [4]

Tabla 2.4 Método de clasificación de aceros de herramienta según AISI. [4]

GRUPO	PREFIJO	ELEMENTOS DE ALEACION
Templado en agua	W	0.6-1.4% C, Cr, V
Resistente al impacto	S	0.45-0.665% C, Si, Cr, Mo, W
Trabajo en frío (Grupo más importante)	O templable en aceite A mediana aleación D alto carbono, alto cromo	Mn, Cr, W 1% C, Mn, Cr, Mo, V Hasta 2.25% C, hasta 12% Cr, Mo, V, Co
Trabajo en caliente (Sometido a calor excesivo)	H H01-H19 base cromo H20-H39 base tungsteno H40-H59 base molibdeno	Mínimo 5% de Cr, W, V, Mo Y menos de 0.65% C
Alta velocidad (Altamente aleados)	T (Base tungsteno) M (Base molibdeno)	0.7-1.5% C, Cr, V, W 0.7-1.5% C, Mo, W, V, Co, Cr
Moldes (Para inyección o compresión de plásticos)	P P01-P19 bajo carbono P20-P39 otros tipos	Cr, Ni, Al, Mo Bajo contenido de C
Propósitos específicos (Especiales)	L (baja aleación) F (carbono-tungsteno)	Cr, V C, W

Hierros fundidos. Son básicamente aleaciones de hierro y carbono, pueden contener entre 2-6.67% de carbono, silicio (0.5-3%) y otros elementos en cantidades insignificantes. Como altos contenidos de carbono tienden a hacer muy frágil al Hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados comercialmente están en el intervalo de 1.8-4.5% de carbono. La fundición se presenta a menudo en forma de bloques denominados lingotes de primera fusión o lingotes de arrabio. [4]

El método para clasificar los hierros fundidos es de acuerdo a su estructura metalográfica, dependiendo del contenido de carbono, de los elementos de aleación y de impurezas, la rapidez de enfriamiento y el tratamiento térmico aplicado después de fundirse, clasificándose de la siguiente manera:

Tipos primarios de hierro fundido producido en el horno de cubilote:

- Hierro fundido gris. Es la más importante, representa el mayor tonelaje entre las fundiciones de hierro. Tiene una composición que varía entre 2.5-4% de carbono y de 1-3% de silicio. Las reacciones químicas internas derivan en la formación de hojuelas de grafito (carbono) distribuidas a todo lo largo del producto fundido en la solidificación. La dispersión de las hojuelas de grafito representa dos propiedades atractivas: buena amortiguación a la vibración y cualidades de lubricación internas, que hacen maquinable la fundición.
- Hierro fundido blanco. Posee menor contenido de carbono (hasta 2.5% de carbono) y silicio (hasta 1.5% de silicio) que la fundición gris. Se forma mediante un enfriamiento más rápido del metal fundido después de haberlo vaciado, esto causa que el carbono permanezca combinado químicamente con el hierro en forma de cementita (carburo de hierro), en lugar de precipitar la solución en forma de hojuelas. Debido a la cementita, la fundición es dura y frágil, y su resistencia al desgaste es excelente.
- Hierro fundido dúctil o nodular. Es un hierro con la composición del hierro gris. El metal fundido se trata químicamente antes de vaciarlo para provocar la formación de nódulos de grafito en lugar de hojuelas. El resultado es un hierro más fuerte y más dúctil.

Tipos secundarios de hierro fundido producido por tratamiento térmico y aleación de los tres tipos primarios:

- Hierro fundido aleado. La fundición de hierro puede alearse para obtener propiedades y aplicaciones especiales. Esta fundición de hierro aleado se puede clasificar en los siguientes tipos:
 1. Tratables térmicamente, pueden endurecerse con la formación de martensita.
 2. Resistentes a la corrosión, cuyos elementos aleantes son el níquel y el cromo.
 3. Resistentes al calor, que contienen una alta proporción de níquel para mejorar la dureza en caliente y la resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

- Hierro fundido maleable. Tipo de hierro fundido que se consigue a partir de la fundición blanca mediante un proceso de recocido. El contenido de carbono varía de 2-3%. El método de recocido da tenacidad, elasticidad, y posibilidad de mecanización a la fundición. Durante el recocido, la totalidad o la mayor parte del carbono es precipitado en nódulos desiguales de grafito (o carburo revenido) y ferrita.

- Hierro fundido enfriado rápidamente. Las piezas fundidas de hierro moldeado en frío se hacen vaciando el metal fundido contra un enfriador metálico, lo cual da como resultado una superficie dura de hierro fundido blanco, resistente a la abrasión; en el interior se forma un núcleo más suave de hierro gris. Esta estructura externa-interna se obtiene mediante un cuidadoso control de la composición aleada total (esto es contenido de hierro y los elementos de aleación; carbono, silicio, manganeso, cromo, molibdeno, etc.) y un ajuste de la rapidez de enfriamiento. [4]

En la siguiente tabla (Tabla 2.5) se presenta una lista de los principales tipos de hierros fundidos:

Tabla 2.5 Principales tipos de hierros fundidos y su composición química [4]

COMPOSICION TIPICA %					
TIPO	Fe	C	Si	Mn	otros
Fundiciones grises					
Clase 20	93	3.5	2.5	0.65	0.67 Mo
Clase 30	93.6	3.2	2.1	0.75	
Clase 40	93.8	3.1	1.9	0.85	
Clase 50	93.5	3	1.6	1	
Fundiciones dúctiles					
ASTM A395	94.4	3	2.5		
ASTM A476	93.8	3	3		
Fundiciones blancas					
Bajo-C	92.5	2.5	1.3	0.4	1.5 Ni, 1 Cr, 0.5 Mo
Fundiciones maleables					
Ferríticas	95.3	2.6	1.4	0.4	
Perlíticas	95.1	2.4	1.4	0.8	

2.1.3 Acero 4340

El acero 4340 (34CrNiMo_6) es un acero de baja aleación que contiene níquel, cromo, molibdeno, como principales elementos aleantes. Se usa mucho en la industria de la aeronáutica para las partes estructurales del ensamble de las alas, fuselaje y tren de aterrizaje, ejes para hélices de aviones, así como partes de maquinarias y repuestos de mayores dimensiones sometidos a altos esfuerzos dinámicos como pernos y tuercas de alta tensión, cigüeñales, arboles de transmisión, barras de torsión, entre otros.

Esta aleación muestra muy buenas cualidades, como son: conserva la dureza y resistencia a alta temperatura, mejora la resistencia al desgaste de la superficie

endurecida y la tenacidad del núcleo, son menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, lo que permite recocerlo a altas temperaturas para eliminar tensiones; altamente resistente a la tracción, torsión y a cambios de flexión, puede utilizarse para trabajo en caliente y frío, además permite su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

A continuación se muestran algunas propiedades importantes del acero 4340 (Tabla 2.6); así como su composición química (Tabla 2.7):

Tabla 2.6 Propiedades mecánicas, físicas, térmicas del acero 4340. [5]

Densidad	7.872 x10 ³ kg/m ³
Módulo de elasticidad	205 Gpa
Expansión térmica (20 °C)	12.6x10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Calor específico	477 J/(kg*K)
Conductividad térmica	44.6 W/(m*K)
Resistividad eléctrica	2.48x10 ⁻⁷ Ohm*m
Relación de Poisson	0.27-0.30
Resistencia a la tensión	744.6 Mpa
Resistencia a la cedencia	472.3 Mpa
Elongación	22%
Punto de fusión	1426-1535 °C

Tabla 2.7 Composición química del acero 4340. [5]

ELEMENTO	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
% Peso	0.38-0.43	0.6-0.8	0-0.002	0.01-0.02	0.15-0.3	1.65-2	0.7-0.9
	Mo	Cu	V	Nb	Ti		
	0.2-0.3	0-0.25	0-0.05	0-0.06	0-0.02		

Los elementos de aleación en este acero se añaden para:

1. Incrementar la resistencia a la corrosión (carbono, cromo, níquel, molibdeno, silicio) y otras características especiales.

2. Formación de carburos. Los elementos de aleación se combinan con el carbono del acero para formar aleaciones de carburo que imparten dureza adicional, resistencia a temperaturas, tenacidad, etc. (níquel, titanio, vanadio, cromo, molibdeno, manganeso).

El níquel se disuelve en la ferrita (α) del acero, ya que tiene menos tendencia a formar carburos de hierro. El silicio se combina en una cantidad limitada con el oxígeno presente en el acero para formar inclusiones no metálicas; pero por otra parte, se disuelve en la ferrita. La mayor parte de manganeso se disuelve en la ferrita, sin embargo, formara carburos.

El cromo, que tiene una tendencia más fuerte que el hierro a formar carburos, se reparte entre las fases de carburo y ferrita. La distribución del cromo depende de la cantidad de carbono presente y de si otros elementos con más tendencia a formar carburos (como el titanio y niobio) están ausentes. El tungsteno y el molibdeno se combinan con el carbono para formar carburos. El vanadio, titanio y niobio son elementos con gran tendencia a formar carburos y se encuentran principalmente como tales.

3. Desoxidación. Algunos elementos se combinan con el oxígeno líquido removiendo el oxígeno disuelto en el material, mejorando las propiedades mecánicas del producto final a altas y bajas temperaturas (aluminio, silicio, calcio, manganeso).
4. Formación de fases secundarias. Algunos elementos de aleación permanecerán sin disolverse en el acero formando aleaciones secundarias mejorando la maleabilidad (plomo, azufre, fosforo). [4], [5]

CAPÍTULO 3

PROCESO DE FORJA

3.1 Introducción

El proceso de forja consiste en la conformación de piezas mediante la aplicación de fuerzas de compresión unidireccionales, aplicadas a través de diversos dados o matrices y herramientas. Es la operación más antigua para formado de metales y se remonta quizá al año 5000 a. C. Se pueden hacer operaciones sencillas de forja con un marro de mano, y un yunque, como lo hacen los herreros en forma tradicional, sin embargo, la mayor parte de las forjas requieren un conjunto de matrices y equipo como prensas o martinets. A diferencia de las operaciones de laminado, que en general producen placas, láminas, solera o diversos perfiles, las operaciones de forjado producen piezas discretas. [6]

Se puede controlar el flujo del metal y la estructura del grano para que las piezas forjadas tengan buena resistencia y tenacidad y se puedan usar con confianza en aplicaciones críticas, donde se requieran grandes resistencias.

El forjado se lleva a cabo de diferentes maneras. Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, el forjado en frío (temperatura ambiente) también es muy común para ciertos productos. El proceso de forja en frío requiere mayores fuerzas, por la alta resistencia del material, y los materiales de la pieza deben tener la ductilidad suficiente a temperatura ambiente. Las piezas forjadas

mediante este proceso presentan buen acabado superficial y buena precisión dimensional.

Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que los dados restringen el flujo del metal. Atendiendo a esta clasificación hay tres principales tipos de operaciones de forjado: 1) Forjado en dado abierto, la pieza de trabajo se comprime entre dos dados, ya sean planos (generalmente) o con forma, permitiendo que el material fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies de los dados; 2) Forjado en dado cerrado (forja con dado impresor), las superficies del dado contienen una forma o impresión que se imparte a la pieza de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo del material. En este tipo de operación una parte del metal fluye más allá del dado impresor formando una rebaba. 3) Forjado sin rebaba, el dado restringe completamente el material de trabajo dentro de la cavidad y no se produce rebaba excedente.

Además de estas operaciones convencionales de forja, existen otras operaciones de formado de metal, como los son la forja de recalcado, forjado con rodillos, forjado orbital, forjado isométrico, forjado en dado caliente, forjado radial, rolado de anillos, entre otros.

En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo que las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama martinete de forja, mientras la que aplica presión gradual se llama prensa de forjado.

3.1.1 Diferentes procesos de forja

3.1.1.1 Forjado en dado abierto

Es el proceso más sencillo, consiste en comprimir una pieza de trabajo entre dos dados planos o dados con forma, con una serie de impactos de compresión. [7]. (Figura 3.1).

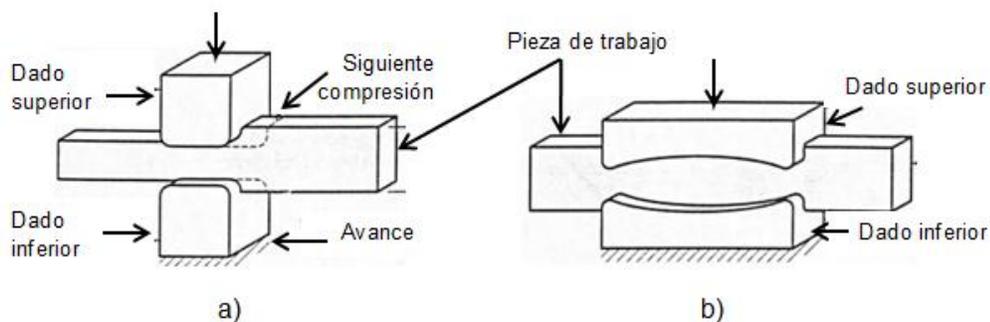


Figura 3.1 Diferentes operaciones de forjado en dado abierto: a) con dados planos, operación por secciones y b) operación con dados con forma (cóncavos). [3]

Esta operación de forjado conocida como recalado o forjado para recalcar, reduce la altura de la pieza de trabajo e incrementa su diámetro. Si el forjado en dado abierto se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre la pieza de trabajo y la superficie del dado, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura, tal como se observa en la Figura 3.2, b).

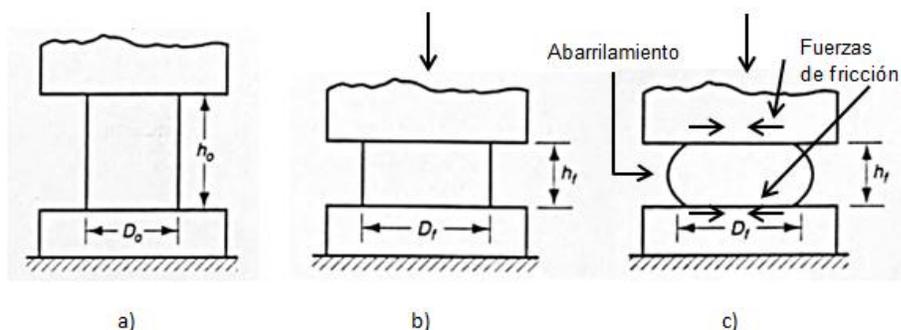


Figura 3.2 Deformación homogénea de una pieza cilíndrica entre dos dados planos: a) inicio del proceso con la pieza de trabajo a su altura (h_0) y diámetro (D_0) originales, b) deformación uniforme del material sin fricción, c) deformación con fricción, obsérvese el abarrilamiento de la pieza causado por las fuerzas de fricción en las interfaces entre la pieza de trabajo y la matriz. [3].

Una operación real de recalado no ocurre así, debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los dados. Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, el cual se muestra en la Figura 3.2, c).

Cuando se realiza un trabajo en caliente con dados fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe 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. El metal más caliente se encuentra en medio de la pieza y fluye más fácilmente que el metal más frío de 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 interfase dado-pieza. [8]

Este efecto de abarrilamiento se puede reducir al mínimo con el uso de un lubricante eficaz y con el calentamiento de los dados; además de poder utilizar barreras térmicas, como por ejemplo tela de fibra de vidrio en el contacto entre el dado y la pieza. [6]

El forjado caliente en dado abierto es un proceso industrial importante. Las formas generadas por operaciones en dado abierto son simples, como flechas, discos y anillos. Un ejemplo de forjado en dado abierto en la industria del acero es el formado de grandes lingotes cilíndricos o cónicos para convertirlos en secciones redondas o cuadradas. (Figura. 3.3)

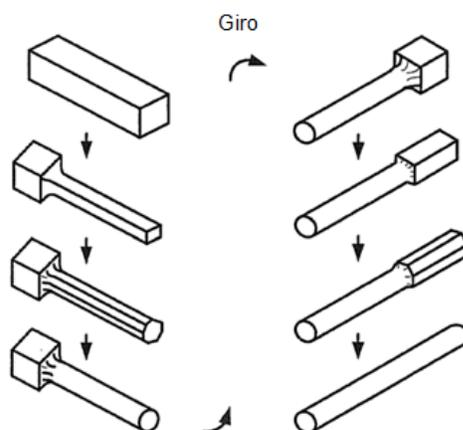


Figura 3.3 Secuencia de pasos de forja de una barra cuadrada a una barra cilíndrica.

[7]

Las operaciones de forja en dado abierto producen formas muy rudimentarias que necesitan operaciones posteriores, como el maquinado, por mencionar alguna, para refinar las partes a sus dimensiones y geometría final. Una contribución importante del proceso de forjado en dado abierto es la creación de un flujo de granos y de una estructura metalúrgica favorable en el metal.

Las operaciones clasificadas en la categoría de dado abierto son operaciones relacionadas y pueden realizarse con dados convexos, con dados cóncavos y por secciones. El forjado con dados convexos es una operación de forja que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una parte de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. Se realiza con dados de superficies convexas. El forjado con dados cóncavos

es básicamente el mismo que el de dados convexos, excepto que los dados que se utilizan tienen superficies cóncavas.

La operación de forjado por secciones consiste en una secuencia de compresiones forjadas a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la producción de flechas, ejes y otros productos a partir de lingotes fundidos, en la operación se utilizan dados abiertos con superficies planas, dados con superficie en forma de “V” o “U” (cóncavos). A menudo se utiliza el término de forjado incremental para este proceso. [3, 8]

3.1.1.2 Forjado en dado cerrado

Llamado algunas veces forjado con dado impresor, se realiza con dados que tienen la forma inversa de la requerida para la parte. La pieza de trabajo inicial generalmente es cilíndrica o cuadrada, la cual se corta a una longitud para proporcionar el volumen de metal necesario para llenar las cavidades de los dados. Al cerrarse el dado y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del dado y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las superficies del dado (Figura 3.4). Aunque la rebaba se corta posteriormente, tiene una función importante en el forjado por impresión, ya que cuando esta empieza a formarse, la fricción se opone a que el metal siga fluyendo hacia la abertura, y de esta manera fuerza al material de trabajo a permanecer en la cavidad. [8]

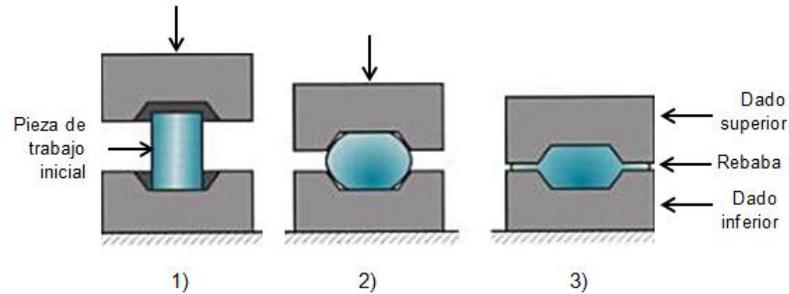


Figura 3.4 Secuencia en el forjado con dado impresor: 1) Posición inicial antes del contacto con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial, 3) cierre final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre los dados. [3]

En el formado en caliente, la restricción del flujo de metal es mayor debido a que la rebaba delgada se enfría rápidamente contra las placas del dado, incrementando la resistencia a la deformación en esa región. La restricción del flujo de metal en la abertura hace que las presiones de compresión se incrementen significativamente, forzando al material a llenar los detalles algunas veces intrincados de la cavidad del dado, con esto se obtiene un producto de alta calidad.

Con frecuencia se requieren varios pasos de formado en el forjado con dado impresor para transformar el metal en la forma inicial y posteriormente en la forma final. Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la parte de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida en las etapas siguientes. [9]

El proceso de forjado con dado impresor no tiene tolerancias estrechas de trabajo y frecuentemente se requiere el maquinado para lograr la precisión necesaria. El proceso de forjado genera la geometría básica de la parte y el maquinado realiza los acabados de precisión que se requieren en algunas porciones de la parte, por ejemplo, perforaciones, cuerdas y superficies que deben coincidir con otros componentes. Las ventajas del forjado sobre el

maquinado completo de la parte son: velocidades de producción más altas, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos del metal.

3.1.1.3 Forjado de precisión

Los mejoramientos de la tecnología del forjado con dado impresor han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de ahusamiento en los dados, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de concesiones al maquinado. Los procesos de forjado con estas características se conocen como forjado de precisión. [3]

En el forjado de precisión se emplean dados especiales, los cuales producen piezas especiales con mayores precisiones que las que se obtienen en otros procesos similares de forjado. Se requiere equipo de mayor capacidad, por la necesidad de aplicar mayores fuerzas para obtener los detalles finos de la pieza. Debido a que las fuerzas y temperaturas que se requieren son relativamente bajas, las aleaciones de aluminio y magnesio se prestan en especial para hacer el forjado de precisión; además los dados presentan un menor desgaste y el acabado superficial de la pieza es bueno. También se puede hacer forjado de precisión con los aceros, titanio y otras aleaciones; entre los productos característicos producidos están los engranes, bielas, cajas y alabes de turbina. [6]

En la Figura 3.5 se muestra una comparación de forjado de precisión y forjado convencional con dado impresor. En este ejemplo el forjado de precisión no elimina las rebabas, aunque si las reduce considerablemente; algunas otras operaciones de este proceso se realizan sin producir rebaba. Este proceso se clasifica propiamente como un proceso de forma neta o casi neta, dependiendo de la necesidad del maquinado para acabar la forma de la pieza.

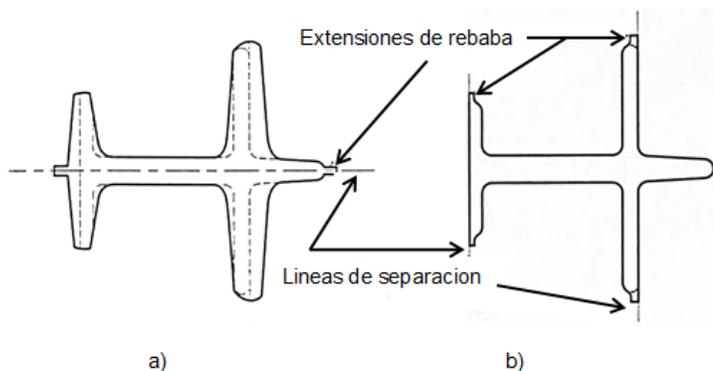


Figura 3.5 Secciones transversales de a) forjado convencional y b) forjado de precisión.

Las líneas punteadas en a) indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos hay excedente de rebaba. [3]

3.1.1.4 Forjado sin rebaba

La distinción en este proceso es que la pieza de trabajo original queda contenida dentro de la cavidad del dado durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la Figura 3.6.

El forjado sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que el forjado con dado impresor. Más importante es que el volumen del material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad del dado dentro de muy estrechas tolerancias. Si la pieza inicial es demasiado grande, la presión excesiva puede causar algún daño al dado o a la prensa, en cambio, si la pieza inicial es demasiado pequeña, no se llenará la cavidad. Debido a este requerimiento especial, el proceso es más adecuado en la manufactura de partes geométricas simples y simétricas, y para trabajar con metales como el aluminio, el magnesio y sus aleaciones.

Las fuerzas en el forjado sin rebaba alcanzan valores comparables a los del forjado con dado impresor. [3]

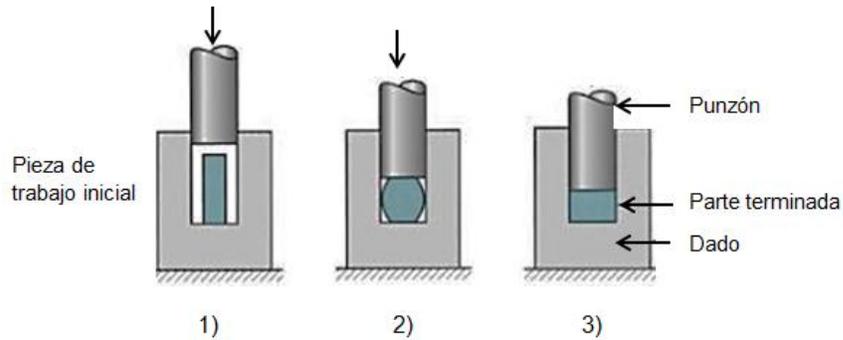


Figura 3.6 Forjado sin rebaba: 1) Posición inicial antes del contacto con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial, 3) final de la carrera del punzón y cierre del dado. [3]

El *acuñado* es una aplicación especial del forjado sin rebaba mediante el cual se imprimen los finos detalles del dado en la superficie superior y en el fondo de la pieza de trabajo. Figura 3.7 En este proceso hay poco flujo de metal; no obstante, las presiones requeridas para producir los detalles superficiales de la cavidad del dado son altas. El proceso se usa también para dar acabados superficiales y de precisión dimensional a algunas partes fabricadas por otras operaciones. Las aplicaciones más comunes del acuñado es en monedas, medallones y joyería. [8]

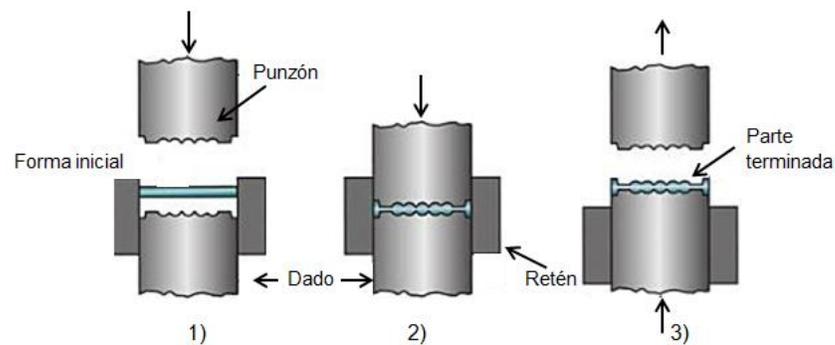


Figura 3.7 Operación de acuñado: 1) Inicio del ciclo, 2) tiempo de compresión y 3) remoción de la parte terminada [3]

3.1.1.5 Forjado de recalcado

Es una operación de deformación en la cual una parte o pieza de trabajo cilíndrica aumenta su diámetro y reduce su longitud. Es una operación industrial que puede también llevarse a cabo como un proceso de forjado en dado cerrado como se observa en la Figura 3.8.

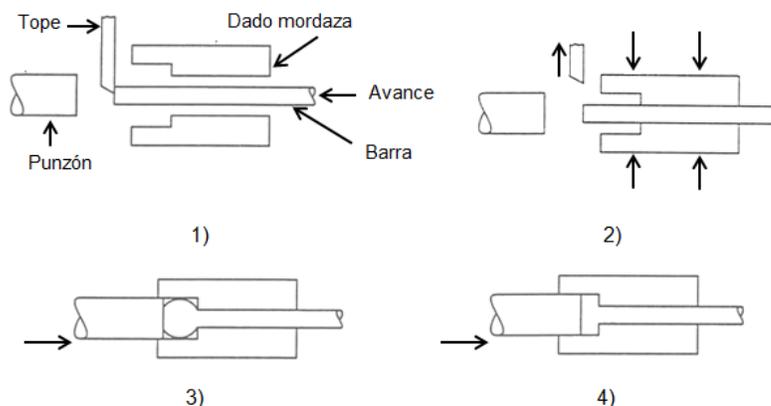


Figura 3.8 Operación de recalcado para formar la cabeza de un perno u otro artículo similar. El ciclo consiste en: 1) El alambre se alimenta hasta el tope, 2) los dados mordaza se cierran apretando el material y el tope se retira, 3) el punzón avanza y 4) toca fondo para formar la cabeza. [3]

El recalcado se usa ampliamente en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos, tornillos y productos similares de ferretería. En estas aplicaciones se emplea frecuentemente el término encabezamiento para denotar la operación. Debido a este tipo de aplicaciones, se producen más partes por recalcado que por cualquier otra operación de forjado. El recalcado se realiza como una operación de producción en masa, en frío, en tibio o en caliente, con máquinas especiales de recalcado por forja, llamadas formadoras de cabezas. El material con que se alimentan estas máquinas son barras o alambres, se forman en los extremos de las barras y luego se corta la pieza a la longitud deseada. Finalmente se usa el laminado de cuerdas para formar las piezas completas de pernos y tornillos. [3]

3.1.1.6 Forjado con rodillos

Es un proceso de deformación que se usa para reducir la sección transversal de una pieza de trabajo cilíndrica (o rectangular), esta pasa a través de una serie de rodillos opuestos con canales que igualan la forma requerida por la parte final. La operación típica se ilustra en la Figura 3.9. Los rodillos no giran continuamente, sino solamente a través de una porción de revolución que corresponde a la deformación que requiere la parte. Las partes forjadas con rodillos son generalmente más fuertes y poseen una estructura granular favorable con respecto a otros procesos competidores, como el maquinado, que puede usarse para producir estas mismas parte.

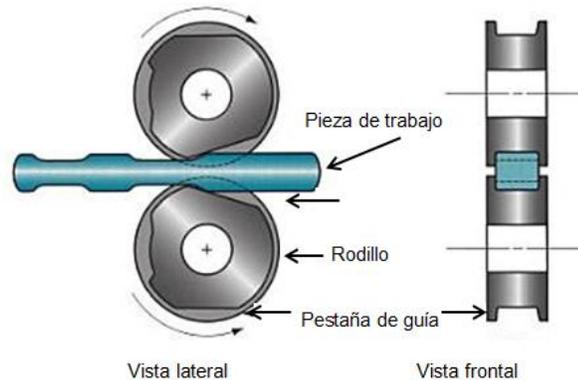


Figura 3.9 Forjado con rodillos. [3]

3.1.1.7 Forjado orbital

En este proceso, la deformación ocurre por medio de un dado superior en forma de cono que presiona y gira simultáneamente sobre la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 3.10. La pieza de trabajo se comprime sobre un dado inferior que tiene una cavidad. Debido a que el eje del cono está inclinado, solamente una pequeña área de la superficie de la pieza de trabajo se comprime en cualquier momento. Al girar el dado superior, el área bajo compresión también gira. Estas operaciones características de este proceso

producen una reducción sustancial en la carga requerida de la prensa para alcanzar la deformación del trabajo.

Las piezas que se suelen forjar con este proceso tienen forma de disco y formas cónicas, por ejemplo los engranes cónicos. [8]

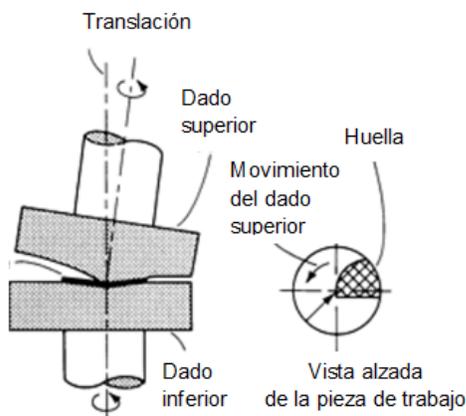


Figura 3.10 En el forjado orbital, el dado superior (inclinado con respecto al dado inferior), gira alrededor de la pieza de trabajo. El ángulo de inclinación y la forma del dado superior dan como resultado una pequeña área de contacto (huella) entre la pieza y el dado superior momento. Debido a que la huella es aproximadamente un quinto de la superficie de la pieza, el proceso de forjado orbital requiere una fuerza considerablemente menor que la forja convencional. [8]

3.1.1.8 Forjado isométrico y forjado en dado caliente

Son categorías especiales de procesos de forja en las que las temperaturas de los dados son significativamente más altas que los que se utilizan en los procesos de forja en caliente convencionales. [8]

Los dados se calientan a la misma temperatura que la de la pieza de trabajo. Se evita que la pieza de trabajo se enfríe al contacto con la superficie fría de los dados, como se hace en el forjado convencional, el metal fluye más fácilmente y la fuerza requerida para desempeñar el proceso se reduce. Se pueden forjar piezas complicadas, con buena precisión dimensional y casi hasta su forma

neta, los dados de trabajo suelen hacerse con aleaciones de níquel o de molibdeno.

Este proceso es costoso y su producción es lenta. Sin embargo, puede ser económico para forjas complejas, hechas de materiales como titanio o superaleaciones, siempre que la cantidad necesaria sea lo suficientemente grande como para justificar los costos. El proceso se puede llevar a cabo al vacío para evitar el fenómeno de la oxidación.

Similar al forjado isotérmico es el forjado con dado caliente, con la diferencia que los dados se calientan a una temperatura menor que la de la pieza de trabajo. [6]

3.1.1.9 Estampado con forja y forjado radial

El estampado y forjado radial son procesos de forjado que se usan para reducir el diámetro de un tubo o barra sólida.

El estampado es un proceso para reducir el área de la sección transversal de piezas de trabajo, como lo son las barras, tubos o cables; el proceso se muestra en la Figura 3.11, se realiza por medio de dados rotatorios que golpean la pieza de trabajo radialmente hacia dentro para ahusarla conforme la pieza avanza dentro de los dados.

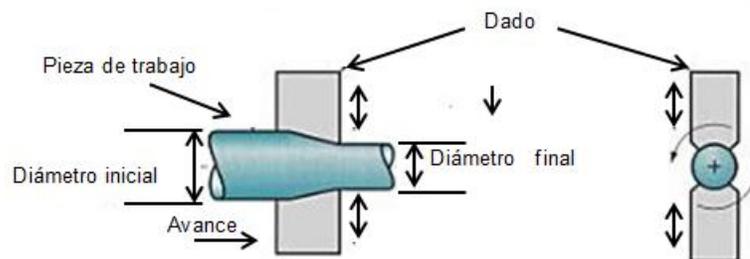


Figura 3.11 Proceso de estampado para reducir material en barra sólida; los dados giran alrededor de la pieza de trabajo. [3]

La pieza de trabajo es generalmente redonda, cuadrada o de otro modo simétrico en la sección transversal, aunque otras formas, tales como rectángulos, puede ser estampados. Algunas veces se requiere el uso de un mandril para controlar la forma y tamaño del diámetro interno de las partes tubulares que se estampan.

El forjado radial es similar al estampado, en su acción contra la pieza y se usa para crear formas similares. La diferencia es que en el forjado radial los dados no giran alrededor de la pieza de trabajo; en su lugar, la pieza es la que gira al avanzar dentro de los dados. En la Figura 3.12, se muestra el proceso de forjado radial. [3, 8]

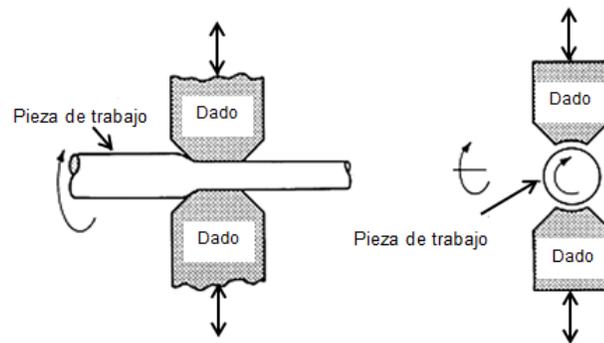


Figura 3.12 En el forjado radial la pieza de trabajo gira mientras los dados permanecen en posición fija. [8]

3.1.1.10 Laminado de anillos

Es un proceso de conformado muy versátil para manufacturar forjas anulares sin costura con dimensiones precisas y flujo de grano circunferencial. El laminado de anillos usualmente requiere menos material de entrada que otros métodos de forja alternativos y puede producirse en cualquier cantidad. [8]

En el laminado de anillos, la pieza debe ser preformada, en una prensa o en un martillo de forja, para que sea puesta sobre un mandril de diámetro ligeramente

menor al del agujero de la pieza. Los principales componentes del proceso de laminado de anillos son ilustrados en la Figura 3.13.

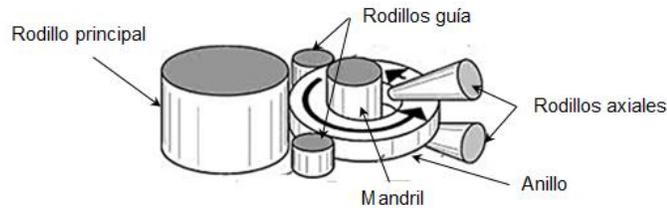


Figura 3.13 Ilustración esquemática del proceso de rolado de anillos. [10]

Un laminado de anillos típico está conformado de tres juegos de rodillos, cada uno con funciones específicas. El primer juego corresponde al de rodillos radiales, los cuales incluyen al rodillo principal y el mandril, estos son los que reducen el espesor radial del anillo. El segundo es un conjunto de rodillos axiales los cuales restringen el crecimiento axial y controlan la altura del anillo. Finalmente, los rodillos guías que son los que mantienen la forma circular del anillo y proporcionan soporte durante la operación de laminado.

El laminado de anillos en caliente es un proceso avanzado utilizando típicamente para la fabricación de partes con geometrías complejas, anillos de grandes dimensiones y anillos que pasarán por procesos posteriores. Posee características como deformación en tres dimensiones, linealidad baja, conformado progresivo continuo y asimetría. Además, existen notables cambios de calor entre el anillo y sus alrededores, mientras tanto, el trabajo plástico como la fricción convertida en energía calorífica, hace que el anillo cambie continuamente de temperatura y que no sea uniforme. El cambio en la temperatura hace que tenga un efecto notable en el comportamiento de la deformación, microestructura y propiedades mecánicas del anillo.

Los anillos producidos no tienen costuras y sus aplicaciones incluyen guías de cojinetes antifricción, anillos de rotación, rodamientos de ruedas de ferrocarril, anillos de conmutadores, componentes de reactores nucleares, rines, etc. [12]

3.1.2 Equipo para forja: dados, martinets y prensas

El equipo que se usa en el proceso de forjado consiste en máquinas de forja, con distintas capacidades, velocidades y características de carrera. Estas máquinas se clasifican, en general, en martinets o martillos y prensas. Además, se utilizan dados y herramientas especiales en estas máquinas; así como equipos auxiliares como hornos para calentar las piezas, dispositivos mecánicos para cargar y descargar el material y estaciones de corte.

3.1.2.1 Martinets de forja

Los martinets obtienen su energía de la energía potencial del ariete, que a su vez se convierte en energía cinética. A diferencia de las prensas hidráulicas, éstos trabajan con grandes velocidades, y el tiempo de conformación minimiza el enfriamiento del proceso de forjado en caliente. Las bajas velocidades de enfriamiento permiten forjar formas más complicadas, en especial las que tienen cavidades profundas. Para completar el forjado se suelen dar varios golpes sucesivos en el dado mismo. Los martinets pueden tener varios diseños; son los más versátiles y menos costosos entre los equipos de forjado. Los martinets se usan con mayor frecuencia para forjado con dado impresor y se clasifican generalmente de la siguiente manera: martinete de gravedad, martinete accionado por energía, martinete de contragolpe y martinete de gran potencia.

Martinete de gravedad (caída libre). En la operación de este martillo, la energía se obtiene de la caída libre del ariete. El dado superior se fija al ariete y el dado inferior al yunque. La pieza de trabajo se coloca en el dado inferior, el ariete se eleva y luego se deja caer sobre el material. Cuando el dado superior golpea la pieza, la energía del impacto ocasiona que la pieza tome la forma de la cavidad del dado inferior. Se necesitan varios golpes de martillo para lograr el cambio deseado de forma. En la Figura 3.14 se muestra los componentes principales de este tipo de martinete.

La energía disponible en el martinete es el producto del peso del ariete por su altura de caída. Los pesos de martinete van de 180kg a 4,500Kg (400 a 10,000 lb), y las capacidades de energía llegan hasta los 120 KJ (90,000 pies-lb).

Una desventaja del martinete de gravedad es que una gran parte de la energía del impacto se transmite a través del yunque al piso del edificio.

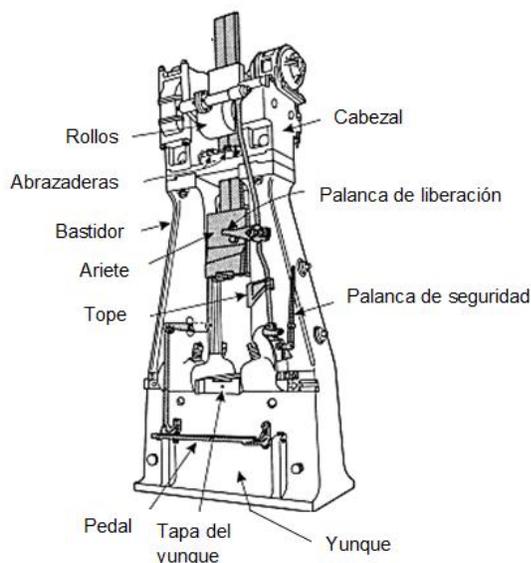


Figura 3.14 Componentes de un martinete de caída libre. [13]

Martinete accionado por energía. En estas máquinas la carrera del ariete hacia abajo se acelera con vapor, aire o presión hidráulica, a unos 750KPa (100 psi). El peso del ariete varía de 225Kg a 22,500Kg (500 a 50,000 lb), y las capacidades de energía son hasta de 1,150 KJ (850,000 pies-lb). La Figura 3.15 muestra los principales componentes.

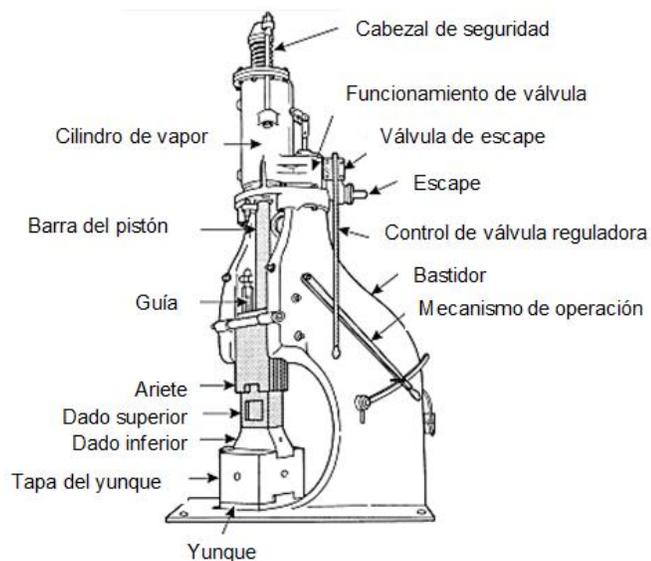


Figura 3.15 Componentes de un martinete accionado por energía. [13]

Martinete de contragolpe. Este martinete tiene dos arietes que se acercan entre sí, en forma simultánea, en dirección horizontal o vertical, para forjar la pieza. Como en las operaciones de forjado con dado abierto, puede girar la pieza de trabajo entre los golpes, para conformarla bien durante el proceso de forjado. Los martinetes de contragolpe trabajan a grandes velocidades y transmiten menos vibración a sus cimientos. Sus capacidades llegan hasta 1,200 KJ (900,000 pies-lb). En la Figura 3.16 se ilustra los principales componentes de este tipo de martinete.

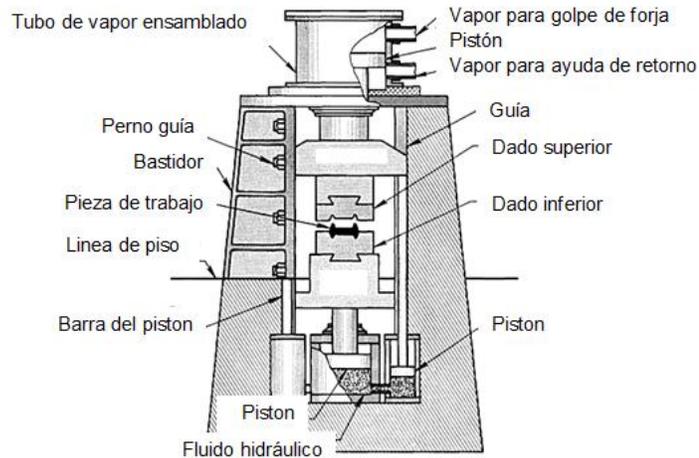


Figura 3.16 Componentes principales de un martinete de contragolpe vertical con un sistema de accionamiento hidráulico de vapor. [8]

Martinete de gran potencia. En una máquina de gran potencia, el ariete se acelera mediante un gas inerte a alta presión, y la pieza se forja en un golpe a muy alta velocidad. Aunque hay diversos tipos de estas máquinas hay varios problemas relacionados con su funcionamiento y mantenimiento, y con consideraciones de seguridad y de fractura de dados, que han limitado su uso en plantas actuales de forjado (Figura 3.17).

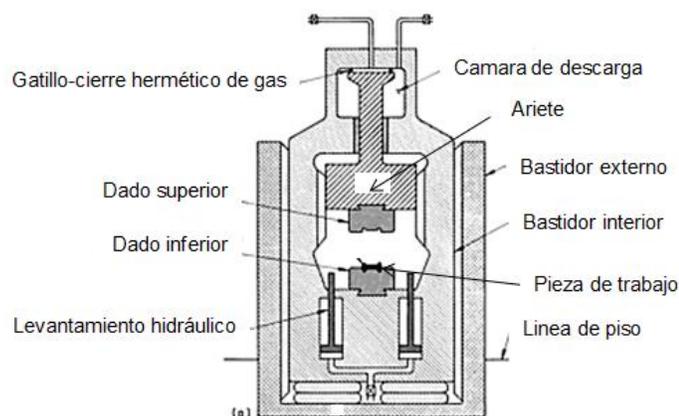


Figura 3.17 Componentes básicos de un martinete de gran potencia [8]

Existen varias consideraciones importantes en la selección de las máquinas de forjado: necesidades de fuerza o de energía, tamaño, forma y complejidad de la pieza a forjar, resistencia del material de la pieza y sensibilidad del material a la velocidad de deformación. Otros factores son la capacidad de producción, la precisión dimensional, mantenimiento, costo, etc. [3, 10, 18]

3.1.2.2 Prensas de forjado

Las prensas aplican una presión gradual, en lugar de impactos repentinos para realizar las operaciones de forja. Las prensas de forjado incluyen prensas mecánicas, prensas hidráulicas y prensas de tornillo.

Prensas mecánicas. Funcionan por medio de excéntricos, manivelas y juntas o articulaciones de bisagras. Su velocidad varía desde un máximo al centro de la carrera hasta cero, en el término de la carrera, por lo que están limitadas por la carrera. En una prensa mecánica se genera la energía mediante un gran volante, accionado por un motor eléctrico; un embrague acopla al volante con un eje excéntrico; y una biela transforma el movimiento recíprocante en movimiento lineal alternativo, (Figura 3.18).

La fuerza disponible en una prensa mecánica depende de la posición en la carrera; es muy alta en el fondo del recorrido de forjado. Por este motivo, es esencial la preparación adecuada, para evitar que se rompan los dados o las piezas del equipo. Estos mecanismos son muy similares a los que se usan en las prensas de estampado. Las prensas mecánicas tienen grandes capacidades de producción, son fáciles de automatizar y requieren menos habilidad del operador que otros tipos de máquinas forjadoras. Sus capacidades varían desde 2.7MN (300 toneladas) hasta 107MN (12,000 toneladas).

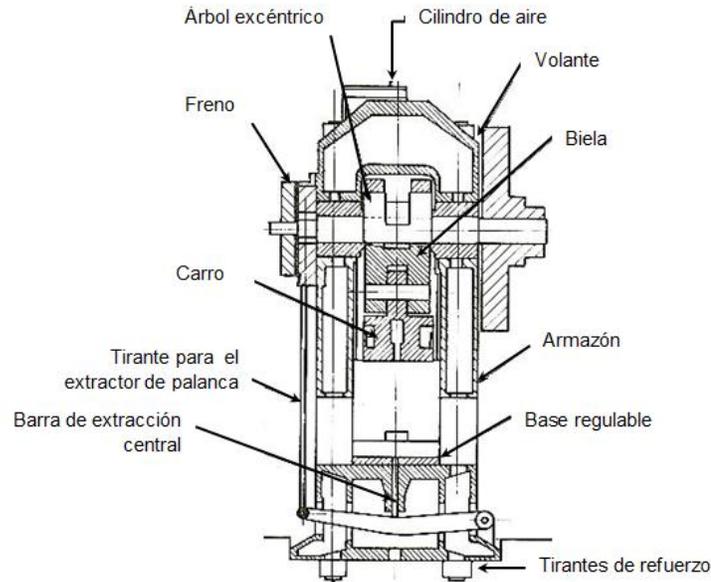


Figura 3.18 Prensa mecánica excéntrica [13]

Prensas hidráulicas. Estas prensas funcionan a velocidades constantes y están limitadas o restringidas por la carga, esto quiere decir, que 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 una carrera, cuya velocidad se puede controlar. Como el forjado en prensa hidráulica tarda más que otros tipos de máquinas para forjar, la pieza se puede enfriar con rapidez, a menos que se calienten los dados. En comparación con las prensas mecánicas, las hidráulicas son más lentas e implican mayor costo inicial, pero requieren menos mantenimiento.

Una prensa hidráulica consiste, normalmente, en un marco de carga con dos a cuatro columnas, pistones, cilindros, arietes y bombas hidráulicas impulsadas por motores eléctricos, como se ilustra en la Figura 3.19

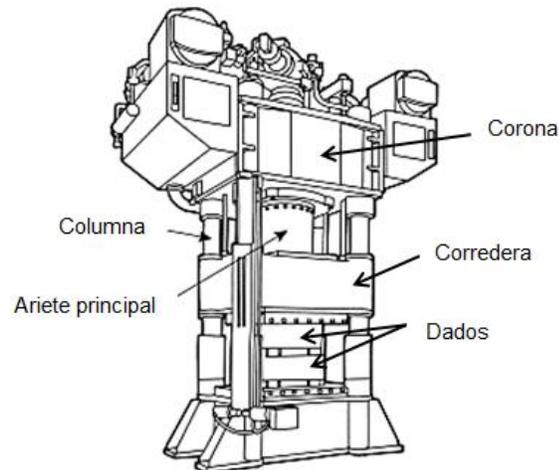


Figura 3.19 Prensa hidráulica típica de cuatro columnas. [13]

Las capacidades de prensado llegan hasta 125MN (14,000 toneladas) para forjar en dado abierto y hasta 450MN (50,000 toneladas) en Estados Unidos, 640 MN (72,000 toneladas) en Francia y 730 MN (82,000 toneladas) en Rusia, para forjado con dado cerrado.

Prensas de tornillo. Obtienen su energía de un volante, por lo que son de energía limitada. La carga de forjado se transmite por un tornillo vertical y el ariete es para cuando se disipa la energía del volante. Si no se cierran los dados al final del ciclo, se repite la operación hasta que se termina el forjado. (Figura 3.20)

Las prensas de tornillo se usan con distintas operaciones de forjado con dado abierto y con dado cerrado. Se adaptan en particular para pequeñas producciones y para piezas de precisión, como por ejemplo los álabes de las turbinas. Sus capacidades van de 1.4 MN hasta 280MN (160 a 31,500 toneladas).

Tanto las prensas de tornillo como las hidráulicas operan a velocidades bajas del ariete y pueden suministrar una fuerza constante a través de la carrera. Por

tanto, estas máquinas son apropiadas para las operaciones de forjado y otras operaciones de formado que requieren grandes carreras. [3, 10]

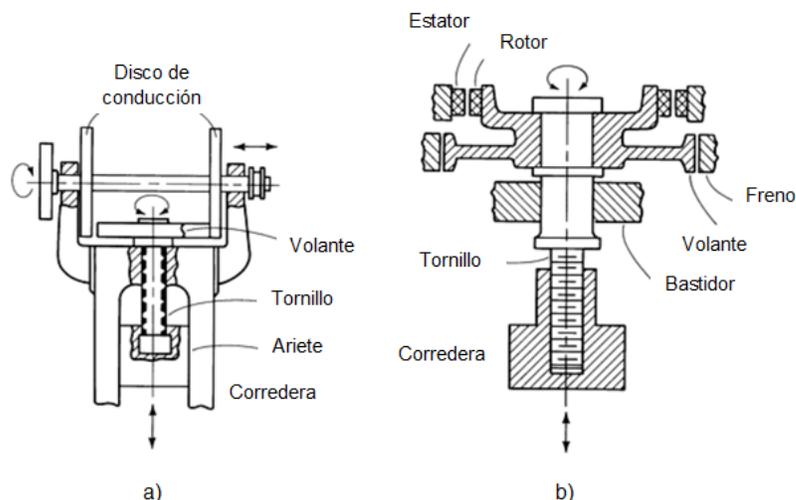


Figura 3.20 Tipos comunes de prensas de tornillo. a) Unidad con fricción y b) Unidad de accionamiento eléctrico directo. [8]

3.1.2.3 Dados de forjado

Para fabricar los dados se usan varios métodos de manufactura, sean aislados o en combinación. Entre ellos están la fundición, la forja, el maquinado, el esmerilado y los métodos electroquímico y eléctrico de estampado de dados. El proceso de punzonado de cavidades, ya sea en frío o en caliente, también se puede usar para fabricar dados pequeños con cavidades superficiales. Normalmente, los dados se tratan térmicamente para darles mayor dureza y resistencia al desgaste. Si es necesario, su contorno y acabado superficial se mejoran con rectificación y pulido.

La elección de un método de fabricación de dados depende de la operación específica en la que se va a usar el dado, así como su tamaño y forma. (Figura 3.21). Con frecuencia, los costos determinan el proceso que se selecciona, porque los costos de herramientas y dados pueden ser importantes en las operaciones de manufactura. Por otra parte, debido a que normalmente se

fabrica una gran cantidad de piezas con el mismo dado, en general, el costo por unidad (por pieza producida) suele ser solo una pequeña parte del costo de fabricación de la pieza.

Los dados se pueden clasificar como machos y hembras; también se pueden clasificar por su tamaño. En general, los dados pequeños son aquellos que tienen una superficie de 10^3 mm^2 a 10^4 mm^2 , mientras que los grandes tienen una superficie de 10^5 mm^2 o mayores.

Lo más común es que los dados se maquinen a partir de bloque forjados, con procesos como fresado, torneado, rectificado, maquinado eléctrico y electroquímico. Para mejorar la dureza, resistencia al desgaste y resistencia en general, los dados se tratan térmicamente en la mayor parte de los casos. Un mal tratamiento térmico es una de las causas más comunes de falla en los dados. El tratamiento térmico los puede distorsionar por acción de cambios microestructurales y por ciclos térmicos no uniformes.

Es importante el diseño apropiado de los dados para el éxito de la operación de forjado. Las partes que se forjan deben diseñarse con base en el conocimiento de los principios y limitaciones de este proceso. [3, 9, 10]

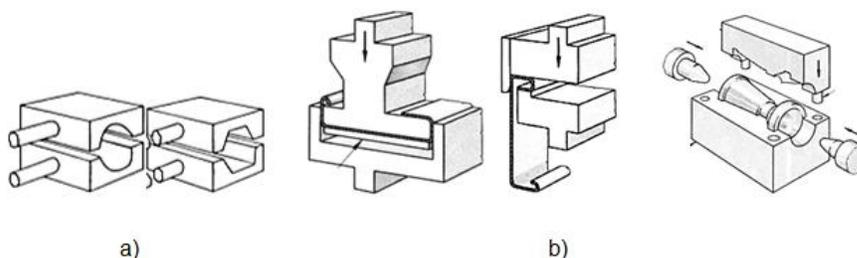


Figura 3.21 Fabricación de diferentes tipos de dados para operaciones específicas. a) Dados para estampado, producción de barras redondas y hexagonales. b) Dados para producción de piezas con formas complejas. [8]

3.1.3 Defectos en forja

En los procesos de manufactura se pueden presentar diversos defectos, dependiendo de factores como los materiales, diseño de las piezas y técnicas de procesamiento. Aunque algunos de estos defectos solo afectan a la apariencia de las piezas, otros causan efectos adversos de importancia en la integridad estructural de las piezas fabricadas.

Las piezas forjadas se utilizan ampliamente en casi todas las industrias. A menudo estas piezas desempeñan un papel crítico en el diseño global, por lo tanto, hay una gran necesidad de entender los diversos defectos de fabricación que afectan a dichas piezas forjadas. [14]

Los principales tipos de defectos en aceros forjados se pueden agrupar en dos categorías, de la siguiente manera:

1. **Materia Prima:** Durante la colada de lingotes de acero, se pueden generar distintos defectos, a continuación se describe brevemente los defectos más comunes que ocurren durante este proceso:

Proyecciones metálicas, formadas por aletas, rebabas o protecciones masivas como ondulaciones y superficies ásperas.

Cavidades por contracción, este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama “rechupe”.

Microporosidad, se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica.

Discontinuidades, como son grietas, grietas en caliente o en frío, y *puntos fríos*. Si al metal en solidificación se le restringe en su libre contracción, puede ocurrir el agrietamiento y el desgarramiento. Aunque están involucrados muchos factores en el agrietamiento, un tamaño de grano grande y la presencia de segregados de bajo punto de fusión a lo largo de las fronteras de grano (intergranular) incrementa la tendencia al agrietamiento por calor. El *punto frío* es una interfaz en una fundición que carece de una fusión completa debido a la unión de dos corrientes de metal líquido provenientes de puertas diferentes.

Superficie defectuosa, como son pliegues, traslapes, cicatrices, capas de arena adheridas y cascarilla de óxido.

Sopladuras, este defecto es una cavidad de gas en forma de esfera causada por un escape de gases del molde durante el vaciado.

Puntos de alfiler, es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella.

Inclusiones, que se forman durante la fusión, solidificación y molde. Por lo general, de naturaleza no metálica (sulfuros, óxidos, silicatos, alúminas), se consideran como perjudiciales porque actúan como elevadores de esfuerzo y reducen la resistencia de la fundición, afectando propiedades como la ductilidad, resistencia, a la fractura y a la tensión. Durante la fusión se pueden formar inclusiones cuando el metal fundido reacciona con el entorno (por lo general oxígeno) o con el material del crisol o del molde. Reacciones químicas entre los componentes del metal fundido pueden producir inclusiones, las escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido, también se convierten en inclusiones.

2. **Forja:** de acuerdo con la condición del material y las variables del proceso, los productos forjados desarrollan varios defectos que pueden afectar en forma apreciable su resistencia y su calidad. Algunos defectos son visibles a simple vista; otros sólo se pueden descubrir con técnicas o métodos de inspección, como lo es el ultrasonido, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, entre otros. A continuación se detallan algunos de los defectos más comunes del proceso de forja:

Superficie defectuosa, como son pliegues, traslapes, astillas, fisuras, cascarillas, cavidades superficiales, vetas, oxidación y la descarburación por la exposición al medio ambiente.

Agrietado superficial, es el resultado de las altas temperaturas de la pieza de trabajo que causan el desarrollo de grietas en la superficie, ocurre frecuentemente cuando la velocidad de deformación es demasiada alta asociada con generación de calor. Otros factores que contribuyen al agrietamiento superficial son la alta fricción y el enfriamiento rápido de la superficie de la pieza de trabajo.

Agrietamiento y reventado central, este defecto es una grieta interna que se desarrolla como resultado de los esfuerzos de tensión a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo durante el proceso de forja. Si los esfuerzos de tensión son suficientemente grandes, ocurre el reventado central. Algunas condiciones que promueven estas fallas son las impurezas (inclusiones), cavidades o microporosidades presentes la pieza de trabajo.

Inclusiones, son defectos internos presentes en la matriz de la pieza de trabajo que se quedan retenidas en el material durante su fundición y solidificación.

Cavidades, microporosidades, al igual que las inclusiones, estos defectos (internos) provienen de los procesos de fundición y solidificación del

material. Dichos defectos pueden ser eliminados durante el proceso de compresión, mediante una suficiente y uniforme deformación de la pieza de trabajo. [15, 16, 17]

En la Figura 3.22 se muestran los tipos de defectos más comunes posteriores al proceso de forja:

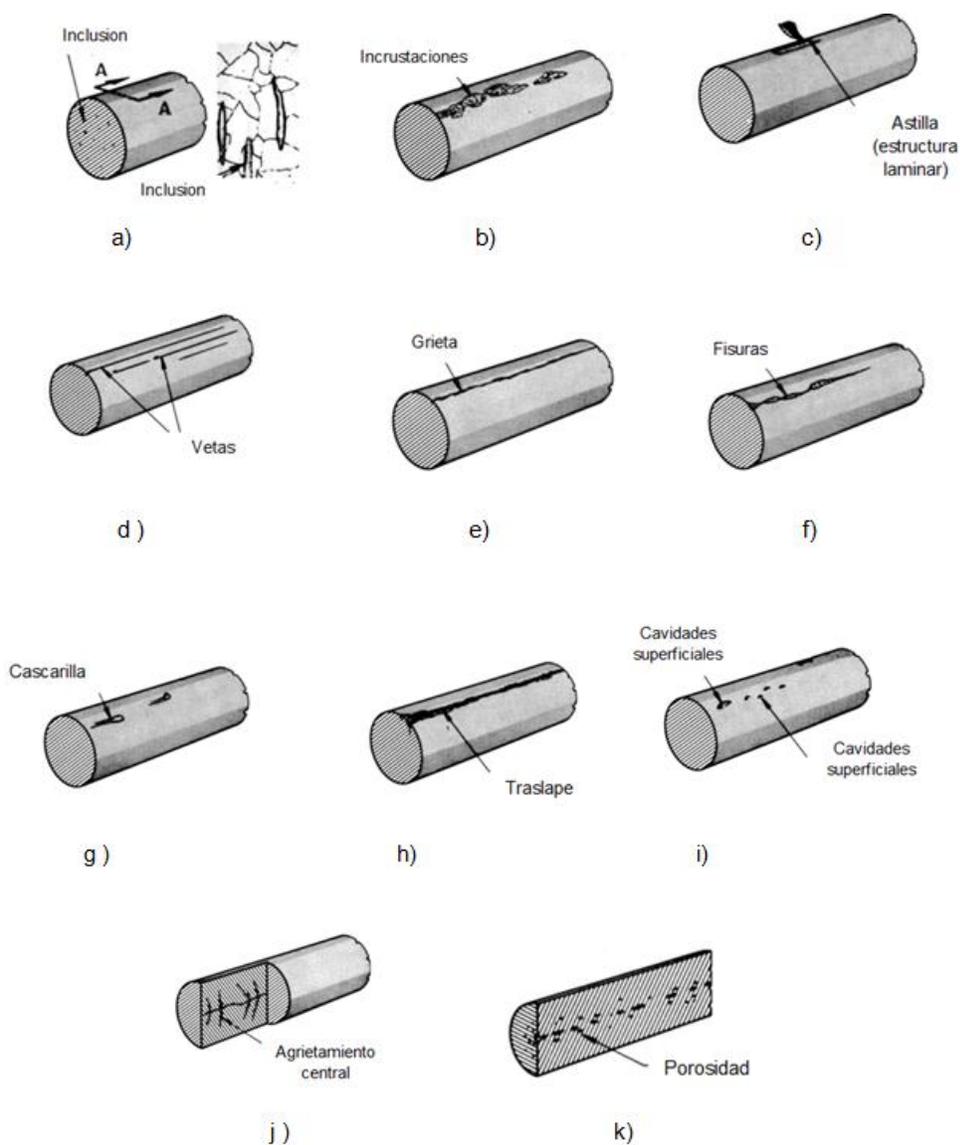


Figura 3.22 Defectos típicos posteriores al proceso de forja. [16]

Aunque podrá no considerarse como defecto, otro aspecto importante de la calidad en una forja es el patrón de flujo del grano. Hay casos en que las líneas de flujo llegan perpendicularmente a una superficie, descubriendo los límites de grano directamente al ambiente. En servicio estos granos pueden ser atacados por el ambiente, produciendo una superficie rugosa y funcionar como concentradores de esfuerzos. [3]

3.1.3.1 Métodos de detección de defectos en forja

Los defectos en forja pueden causar fallas por fatiga y originar otros problemas como la corrosión y el desgaste durante la vida del componente. Resulta de vital importancia inspeccionar las piezas forjadas antes de su puesta en servicio, especialmente en aplicaciones críticas.

La examinación metalográfica es un método comúnmente utilizado para caracterizar los defectos del proceso de forja.

La mayoría de los principales defectos de piezas de acero forjadas tienen características distintivas metalográficas, por lo que es posible diferenciarlos mediante este método. Existen ciertas técnicas de montaje, pulido, ataque químico y de examinación en las piezas, que permiten tener una relación con el tipo de defecto o defectos presentados en el material.

Se debe reconocer que hay limitaciones en cuanto a que tan lejos podemos llegar en el análisis de la causa raíz de los defectos de forja con estas técnicas metalográficas, por lo que existen otras técnicas de caracterización que en ocasiones son necesarias para resolver el problema, tales como Microscopia Electrónica de Barrido / Microanálisis por Energía Dispersiva (SEM / EDS) y análisis con Microsonda electrónica. [14]

CAPÍTULO 4

METALURGIA DE LA DEFORMACION EN CALIENTE

4.1 Deformación en caliente

Es posible darle una forma útil a un metal mediante trabajo en caliente, en vez de hacerlo en frío. El trabajo en caliente se define como la deformación plástica del metal a una temperatura superior a la temperatura de recristalización (Figura 4.1), en la cual, el metal se está recristalizando continuamente. Este proceso implica un cambio en la microestructura y en el tamaño de grano del material. [17]

Durante la deformación en caliente, independientemente del proceso industrial realizado, los procesos que controlan el tamaño de grano resultante son la recristalización estática y dinámica, que dependen a su vez de la microestructura de partida del material y su composición química y de las condiciones de deformación (temperatura, velocidad de deformación, etc.). [19]

Parámetros como el tamaño de grano, textura cristalográfica y la frontera de grano son importantes debido a que estos afectan las propiedades mecánicas y físicas de los materiales [15]

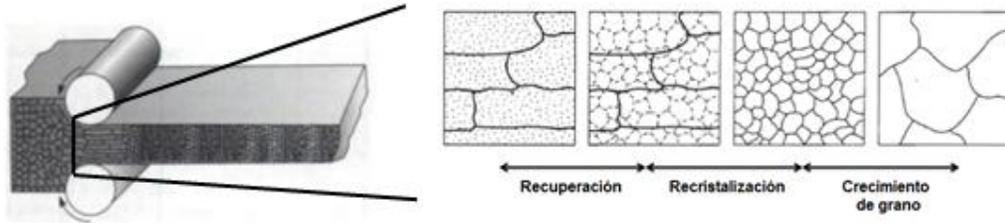


Figura 4.1 Durante el trabajo en caliente, los granos alargados anisotrópicos se recrystalizan de inmediato. Si la temperatura de trabajo en caliente se controla adecuadamente, el tamaño final de grano puede resultar muy fino. [2]

En la práctica, el trabajo en caliente se lleva a cabo usualmente por encima de 0.5 de su punto de fusión (T_m). El metal de trabajo se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de 0.5 T_m , mejorando así la ventaja de trabajo en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo el proceso de deformación genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de trabajo en caliente se mantienen normalmente dentro del rango de 0.75 T_m .

Durante la deformación por trabajo en caliente no hay endurecimiento; en consecuencia, prácticamente es ilimitada la deformación plástica. Los primeros pasos en el proceso se realizan a temperaturas muy por encima de la temperatura de recrystalización, esto es con el fin de aprovechar la menor resistencia del metal. El último paso se efectúa justo por encima de la temperatura de recrystalización, con una deformación porcentual grande, a fin de producir el tamaño de grano más fino posible.

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recrystalización. La razón principal es que la curva de fluencia

del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos teóricamente), y la ductilidad del metal se incrementa significativamente. Todo esto da por resultado las siguientes ventajas con respecto al trabajo en frío:

- La forma de la pieza de trabajo se puede alterar significativamente.
- Se requiere menor potencia para deformar el metal.
- Los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío, pueden formarse en caliente.
- Las propiedades de resistencia son generalmente isotrópicas debido a la ausencia de una estructura orientada de granos creada en el trabajo en frío.
- El trabajo en caliente no produce endurecimiento de la pieza de trabajo.

Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente una ventaja del trabajo en frío.

Algunas desventajas del trabajo en caliente son las siguientes:

- Precisión dimensional baja.
- Mayores requerimientos de energía (energía térmica para calentar la pieza de trabajo).
- Oxidación de la superficie de trabajo (incrustaciones).
- Acabado superficial pobre.

- Menor duración en la vida de las herramientas.

La recristalización del metal en el trabajo en caliente involucra difusión atómica, proceso que depende del tiempo. Las operaciones de formado del metal se desempeñan frecuentemente a altas velocidades que no dejan tiempo suficiente para completar la recristalización de la estructura granular durante el ciclo de deformación, sin embargo, debido a las altas temperaturas, la recristalización sólo ocurre eventualmente; ya sea inmediatamente después del proceso de formado o más tarde, al enfriarse la pieza de trabajo. [2, 3, 20]

4.2 Recuperación

Durante la recuperación, una parte de la energía interna almacenada como energía de deformación es liberada debido al movimiento de dislocaciones (en ausencia de una tensión externamente aplicada); esto ocurre como resultado del aumento de la difusión atómica a temperaturas elevadas.

También se produce alguna reacción en el número de dislocaciones, y las configuraciones de dislocaciones tienden a adoptar bajas energías de deformación de la red. Además, las propiedades físicas tales como las conductividades eléctricas y térmicas se recuperan hasta valores similares a los correspondientes a los estados predeformados. Finalmente, la recuperación a menudo mejora la resistencia del material a la corrosión. [20]

La recuperación dinámica implica la aniquilación de dislocaciones y el rearreglo en fronteras de subgranos de baja energía, la restauración de dislocaciones no es un solo proceso microestructural sino una serie de micromecanismos. [21] (Figura 4.2)

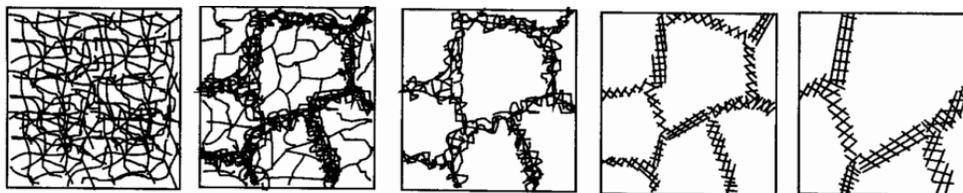


Figura 4.2 Diferentes etapas de la recuperación dinámica para un material deformado.

A) generación de dislocaciones. B) formación de celdas, c) aniquilación de dislocaciones dentro de las celdas, d) formación de subgranos, e) crecimiento [22]

4.3 Recristalización

La recristalización se produce por nucleación y posterior crecimiento de nuevos granos a expensas de los átomos que constituyen los granos deformados. La nucleación tiene lugar básicamente en los bordes de grano porque son zonas muy distorsionadas debido a la alta densidad de dislocaciones producidas durante la deformación plástica. Los nuevos granos formados son en un primer momento pequeños, pero van creciendo por incorporación de átomos a través del límite de grano formado entre el grano deformado y el no deformado. De este modo, el límite de grano migra hacia el interior del grano deformado. Este proceso continúa hasta que los nuevos granos absorben por completo la estructura distorsionada producida por la deformación en caliente y se genera una nueva estructura formada por granos equiaxiales sin deformación. Este sistema de nucleación y crecimiento de granos no deformados reduce la energía asociada a los defectos presentes en los granos deformados. Precisamente esta disminución de la energía asociada a los granos deformados actúa a modo de motor del proceso de recristalización. [23, 24]

La recristalización es un proceso cuya extensión depende tanto del tiempo como de la temperatura. El comportamiento de recristalización para una determinada aleación se suele especificar mediante *la temperatura de recristalización*, temperatura a la cual la recristalización ocurre en exactamente una hora; generalmente, esta temperatura se sitúa entre un tercio y la mitad de

la temperatura absoluta de fusión del metal o aleación ($0.3-0.5 T_m$). Cabe mencionar que este fenómeno ocurre de forma más rápida en metales que en aleaciones. El hecho de alear aumenta la temperatura de recristalización, algunas veces de forma muy substancial. [6]

La recristalización dinámica empieza antes de alcanzar la deformación correspondiente al esfuerzo máximo, llamada deformación de pico, a un valor de deformación crítica, en la que aparecen los primeros núcleos, es rápida y los intervalos de deformación entre la deformación crítica y la deformación de pico es relativamente pequeña. [25]

Tiene una manifestación tanto mecánica como microestructural. Consiste en la nucleación y el crecimiento de nuevos granos que permiten eliminar un parte de las dislocaciones generadas durante la etapa de endurecimiento y la recuperación dinámica.

La recristalización dinámica es diferente de la recristalización estática, en el sentido de que en el segundo caso, los nuevos granos crecen hasta ocupar toda la estructura deformada, además, la estructura resultante está totalmente recristalizada y con una tensión interna prácticamente nula. Mientras en el caso de la recristalización dinámica, los nuevos granos formados endurecen y crecen simultáneamente, afectando tanto al comportamiento mecánico como la microestructura.

La microestructura resultante de la recristalización dinámica es mucha más fina que la obtenida en la recristalización estática, debido a que la nucleación es más intensa y continua, mientras el crecimiento esta frenado por el endurecimiento.

La recristalización dinámica es una herramienta muy importante para el control de la evolución microestructural y propiedades mecánicas durante el proceso industrial. [26]

La evolución del proceso de recristalización se puede medir por métodos directos tales como la microscopía óptica o electrónica de barrido, o por métodos indirectos en los que uno supervisa el comportamiento de ciertas propiedades del material, tales como pruebas de microdureza, resistividad eléctrica entre otros. [24]

4.4 Crecimiento de grano

Después que ha terminado la recristalización, los granos libres de deformación continúan creciendo si el material es dejado a temperatura elevada, fenómeno que se denomina crecimiento del grano. Existe una energía asociada con los límites de grano; a medida que el grano crece en tamaño, el área total de límite de grano disminuye, produciendo una reducción en la energía total; ésta es la fuerza motriz para el crecimiento del grano.

El crecimiento del grano se produce por la migración de los límites de grano. No todos los granos pueden crecer, pero algunos crecen a expensas de otros que se encojen. Así, el tamaño medio del grano aumenta con el tiempo, y en cualquier instante existe una gama de tamaños de grano.

El movimiento del límite de grano es justamente la difusión de corto alcance de los átomos de un lado del límite al otro. El movimiento del límite y la migración de átomos ocurren en sentidos opuestos. [5]

Para muchos materiales policristalinos, el diámetro del grano (d) varía con el tiempo (t) de acuerdo con la relación,

$$d^n - d_o^n = Kt \quad (1)$$

Donde d_o es el diámetro inicial del grano a $t=0$, y k y n son dos constantes independientes del tiempo; el valor de n es generalmente igual o mayor que dos.

Gottstein [27], sugiere que el exponente "n" con un valor igual a 0,5 sólo se produce experimentalmente durante tratamiento térmico para metales de alta pureza, a una temperatura cercana de sus temperaturas de fusión.

CAPÍTULO 5

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1 Introducción

En este capítulo se describe la parte experimental del presente trabajo de investigación, la cual se llevó a cabo bajo condiciones, procedimientos y proceso de la industria. El material de estudio es un acero 4340, el cual se caracterizó en condición forja. Con los resultados obtenidos de caracterización se desarrollaron modelos de simulación para determinar la deformación necesaria para cerrar defectos internos en dicho material bajo condiciones de proceso.

5.2 Plan Experimental

La figura 5.1 muestra de forma esquemática los pasos que se siguieron durante la experimentación de la investigación.

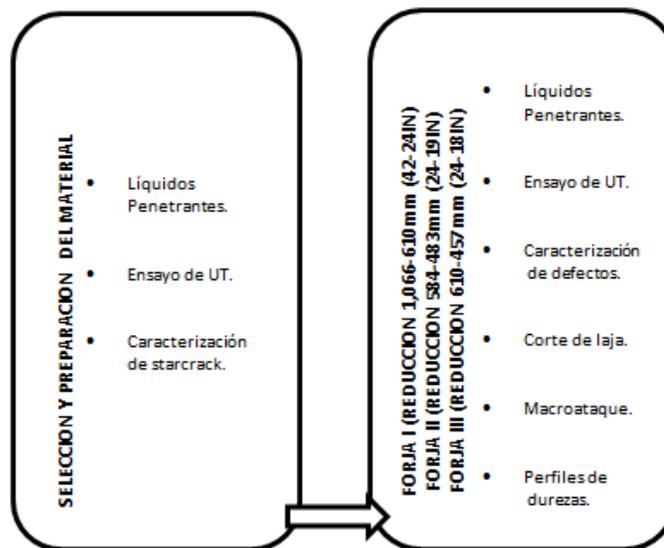


Figura 5.1 Pasos a seguir durante la experimentación.

5.2.1 Selección y preparación del material

En el presente estudio se utilizó un corte de un lingote cónico de acero 4340, el corte tenía un peso aproximado de 9000 toneladas, 1,524mm (60in) de longitud con un diámetro mayor de 1,066mm (42in) y un diámetro menor de 940mm (37in). (Figura 5.2)



Figura 5.2 Corte de acero 4340.

La composición química del material fue proporcionada por el proveedor Ellwood Quality Steels Company y se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 5.1 Composición química del acero 4340.

ELEMENTO	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
% Peso	0.42	0.76	0.008	0.013	0.24	1.75	0.88
	Mo	Cu	V	Nb	Ti	Al	B
	0.26	0.18	0.007	0.005	0.003	0.023	0.0001
	N	Ca	O₂	H₂	Pb		
	0.0082	0.0003	0.0025	0.0001	0.0001		

Además se aplicó soldadura a una de las caras del material, cubriendo el starcrack revelado por la prueba de líquidos penetrantes, esto con el fin de evitar el fenómeno de oxidación en los defectos internos de la pieza durante el proceso de forja. (Figura 5.3)



a)



b)

Figura 5.3 Aplicación de soldadura en la cara de la pieza.

5.2.2 Ensayos

En esta etapa se llevó a cabo el proceso de forja abierta, el cual se realizó en la prensa hidráulica “4B”. Esta prensa transfiere una gran cantidad de energía a la pieza, mediante una carga constante durante una carrera, y cuya velocidad es controlada; teniendo una capacidad de 3,600 toneladas aproximadamente. (Figura 5.4). A continuación se detallan los tres procedimientos de forja realizados.



Figura 5.4 Prensa hidráulica “4B”.

5.2.2.1 Forja I

El material se carga en el horno siguiendo la rampa de calentamiento establecida, (Figura 5.5).

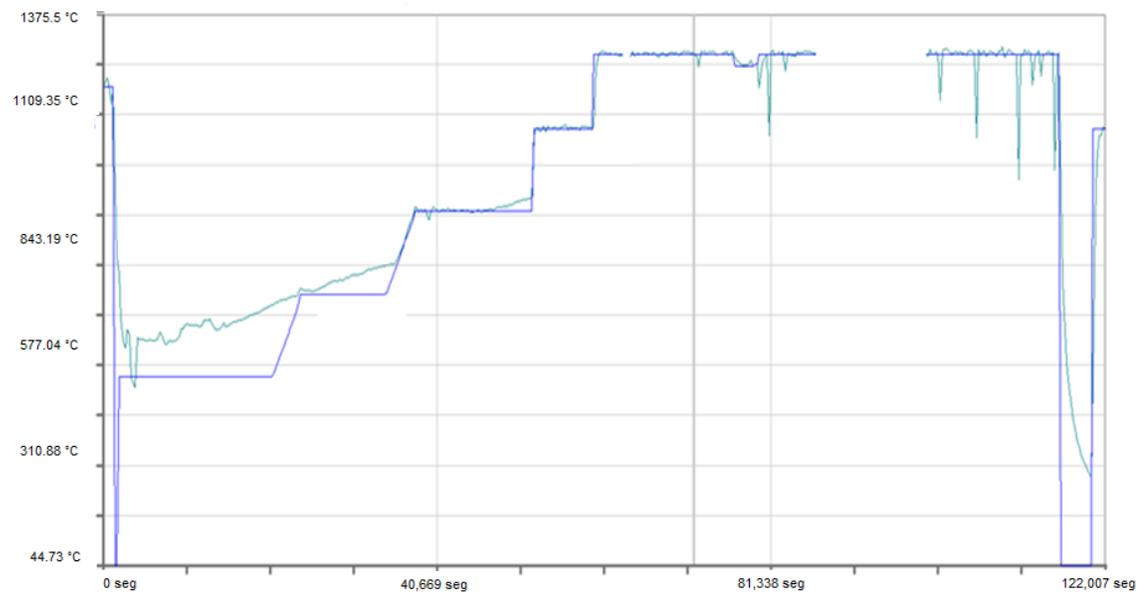


Figura 5.5 Rampa de calentamiento para el Ensayo de Forja I.

Cumpliendo este ciclo, el material se forja a una temperatura de 1270°C siguiendo el diseño de pasos establecido (Figura 5.6).

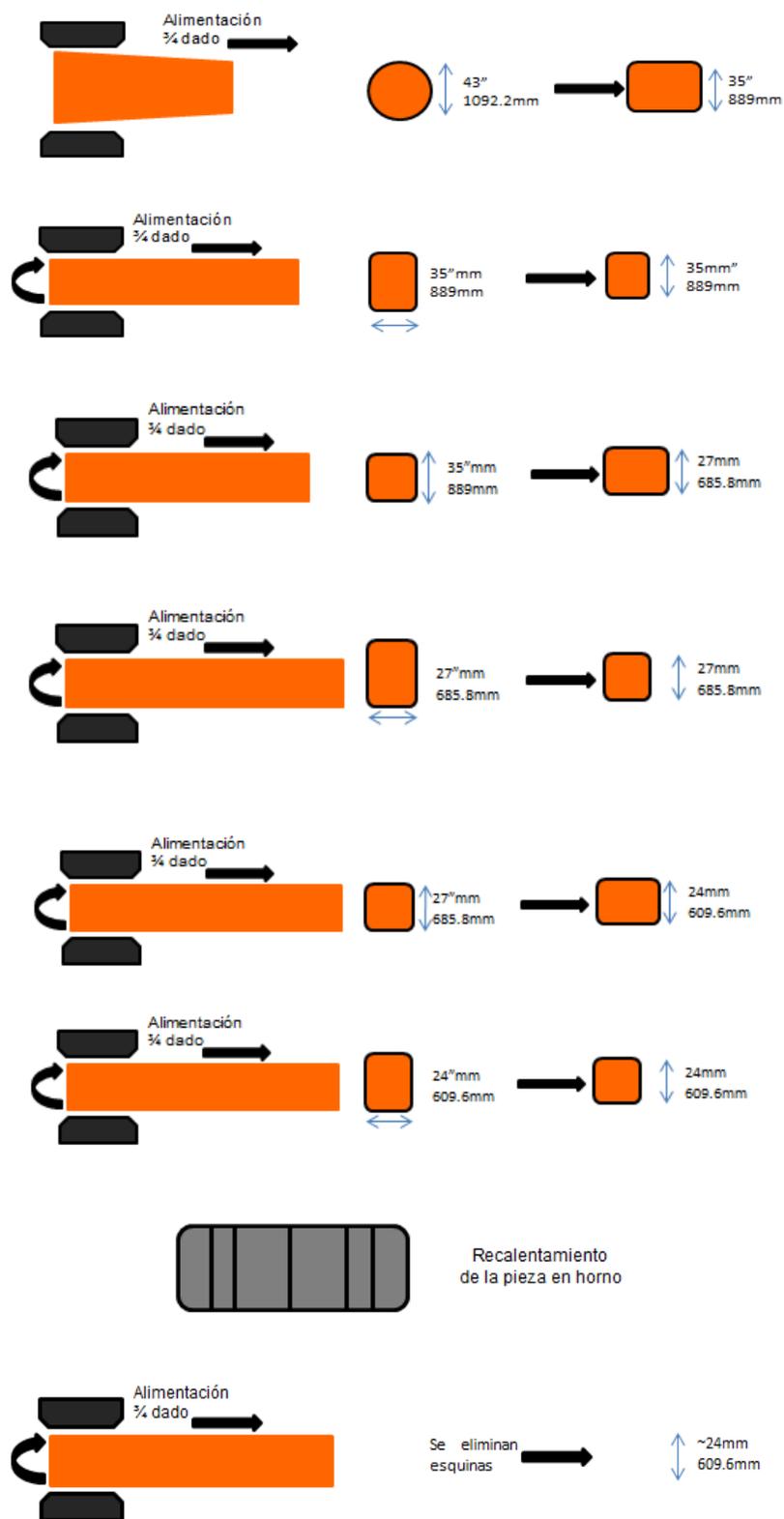


Figura 5.6 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja I.

Debido a las dimensiones adquiridas por la pieza durante la forja, es necesario realizar un recalentamiento, después del empape el material se extrae del horno a una temperatura de 1269 °C para terminar de forjar la pieza. (Figura 5.7).



Figura 5.7 Pieza de trabajo forjada, 3,746mm (147.5in) de longitud.

Posterior a este proceso, se procedió a cortar el material en 2 partes, el primer corte teniendo una longitud de 1,072mm (42.2in), del cual se realizó un despunte (50.8mm), un corte (laja) para pruebas de laboratorio (114mm de ancho) y un maquinado para acabado superficial (Figura 5.8), el segundo corte queda con acabado superficial-forja con una longitud de 2,672mm (105.2in), Figura 5.9.



a)



b)

Figura 5.8 a) Corte de 1,072mm de longitud, con marca para despunte, acabado superficial forja. b) Mismo corte con acabado superficial maquinado.



Figura 5.9 Corte con acabado superficial-forja, 2,672mm de longitud.

5.2.2.2 Forja II

Para este proceso se utilizó el corte maquinado, se cargó al horno cumpliendo con la rampa de calentamiento de la Figura 5.10. Teniendo un ciclo de calentamiento de 16:34hrs.

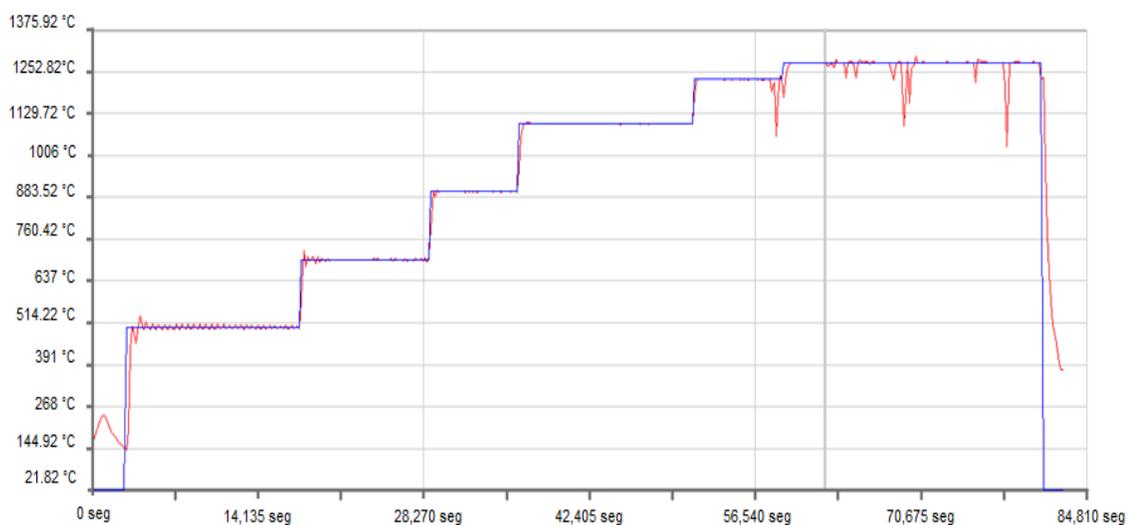


Figura 5.10 Rampa de calentamiento programada en horno 23 para el corte maquinado.

El material se sacó del horno a una temperatura de 1185 °C y se procedió a forjar de acuerdo al diseño de pasos siguiente, (Figura 5.11):

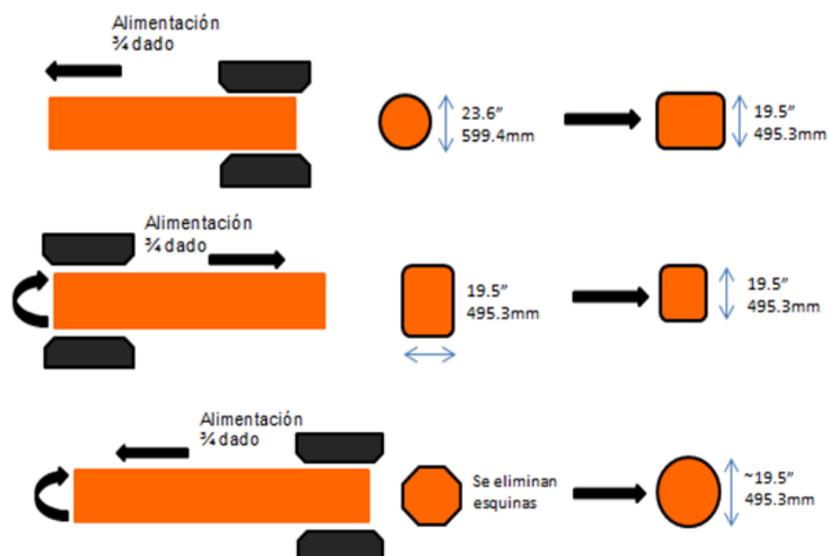


Figura 5.11 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja II.

Se cortaron dos láminas de material, la primera con un ancho de 114mm (4.5in) y la segunda con un ancho de 38mm (1.5in), las cuales se utilizaron para pruebas de laboratorio y obtención de muestras.

5.2.2.3 Forja III

En este último ensayo se utilizó el segundo corte (2,672 de longitud), mencionado en el punto 5.2.1.1, el cual tiene una condición superficial forja; al igual que los dos ensayos anteriores, el material se introdujo al horno cumpliendo con la siguiente rampa de calentamiento (Figura 5.12):

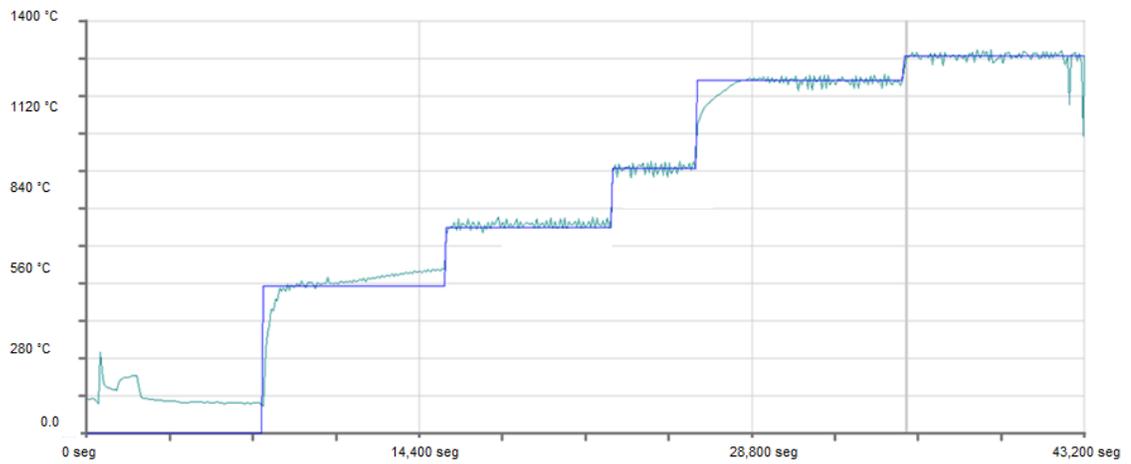


Figura 5.12 Curva de calentamiento programada en el horno 22, para el corte con acabado superficial forja.

Se extrajo la pieza del horno a una temperatura de 1248 °C y se realizó el proceso de forja de acuerdo al siguiente diseño de pasos (Figura 5.13):

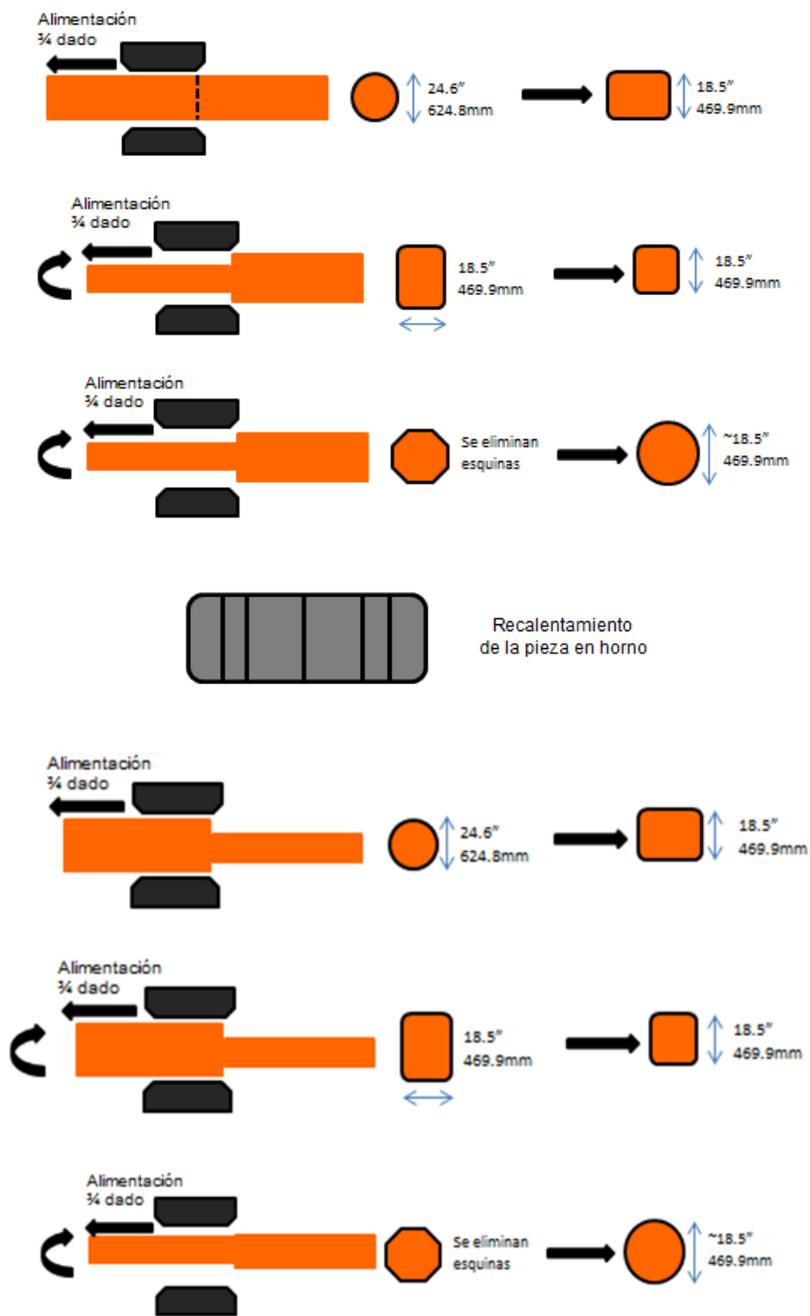


Figura 5.13 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja III.

Debido a las dimensiones adquiridas por la pieza fue necesario dar un recalentamiento para terminar completamente el proceso de forja; el material se

extrajo del horno a una temperatura de 1249 °C, continuando con el diseño de pasos arriba mencionado.

De este material se cortó una laja de 38mm (1.5in) de espesor para realizar pruebas de laboratorio y obtención de muestras.

Cabe mencionar que además del material de prueba, se introdujo otra pieza al horno con dimensiones y peso similar, con el fin de monitorear y asegurar el calentamiento al centro de la pieza (“temperatura de empape”).

5.3 Pruebas de laboratorio

A continuación se describen las pruebas de laboratorio efectuadas en la investigación.

5.3.1 Líquidos Penetrantes

La inspección de líquidos penetrantes (LP) es un ensayo no destructivo, es uno de los métodos más usados que permite detectar e identificar discontinuidades como poros, grietas, rechupes, etc. presentes en la superficie de los materiales examinados.

El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie en estudio, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad, este es el principio básico sobre el cual se basa la prueba de líquidos penetrantes, la acción capilar es un fenómeno de tensión superficial que permite a los líquidos ser arrastrados dentro de aberturas estrechas como resultado de la energía que está presente en la superficie de las aberturas.

Después de un determinado tiempo se elimina el exceso de líquido y se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas. (Figura 5.14)

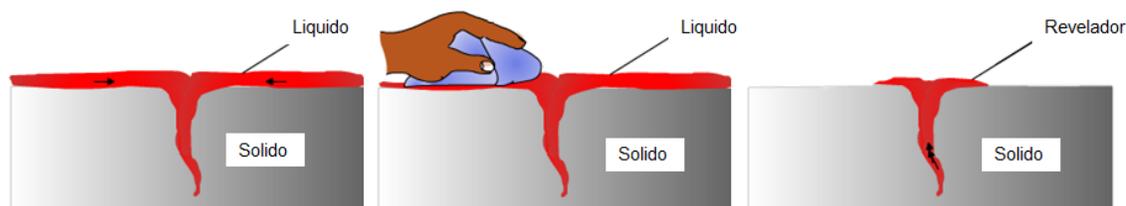


Figura 5.14 Procedimiento para realizar la prueba de líquidos penetrantes. [29]

La característica más importante que afecta la habilidad de un líquido de penetrar en una cavidad es la Humectabilidad, los penetrantes con menor ángulo tendrán la mejor Humectabilidad y proveen buena penetración para un material dado.

Existen diversas clasificaciones de técnicas y métodos de líquidos penetrantes, en este trabajo de investigación se utilizó la técnica Tipo II: visible, contraste color, por el Método C: removible con solvente. [28, 29].

Las inspecciones de líquidos penetrantes se llevaron a cabo en la preparación del material, se pulió la superficie de una de las caras de la pieza y se procedió a realizar LP con el fin de revelar las discontinuidades y así poder dimensionar el “starcrack” presente en la pieza.

Posterior a este primer ensayo, se realizó inspección de LP a cada una de las lajas obtenidas en los procesos de forja mencionados en la sección 5.2.1 para revelar imperfecciones en las mismas. Todas las pruebas se llevaron a cabo bajo las especificaciones de la Norma ASTM E1220-10. A continuación se detalla el procedimiento utilizado:

Pre-Limpieza: Es necesario remover todos los contaminantes de la superficie, después de esto, nada de evidencia de ningún residuo deberá quedarse. Después de la pre-limpieza deberá dejar el solvente evaporarse y la superficie secarse antes de aplicar el penetrante.

Aplicación de Penetrante: El penetrante puede ser aplicado a la superficie de la pieza de prueba virtualmente de cualquier manera efectiva incluyendo: brocha, inmersión, rociado o solo vertiéndole el penetrante en la superficie. La clave está en asegurar que el área de interés sea efectivamente humedecida y que el líquido penetrante no se seque durante el tiempo de penetración. Es muy común tener tiempos de penetración de 10 a 15 minutos para muchas aplicaciones.

Remoción de Penetrante: En este paso el método de remoción del exceso de penetrante fue con solvente.

Aplicación de Revelador: Se utilizó revelador seco en lata. El revelador deberá aplicarse de manera uniforme y de capa delgada. Las capas gruesas pueden enmascarar las discontinuidades.

Tiempo de Revelado: El revelador debe de permanecer el tiempo suficiente para sacar el penetrante atrapado de la discontinuidad hacia la superficie de prueba. Se requirió un tiempo de 10 a 15 minutos.

Interpretación: Una vez completado el tiempo de revelado, las indicaciones de las discontinuidades o de otras fuentes que se hayan formado deberán ser interpretadas. Las indicaciones son interpretadas primeramente basadas en su tamaño, forma e intensidad.

Post Limpieza: Después de que la pieza ha sido evaluada, todas las indicaciones de remanentes de penetrante y revelador deberán ser completamente removidas de la superficie. [30]

5.3.2 Ultrasonido

La inspección por Ultrasonido (UT) se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

El termino de Ultrasonido corresponde a las ondas de sonido que tienen frecuencias mayores a 20,000 ciclos x segundo (Hertz). El método de Ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. En la Figura 5.15, se muestra un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material. Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los megahertz (inaudible al oído humano). El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad o hasta que topa con una interfase, es decir algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.

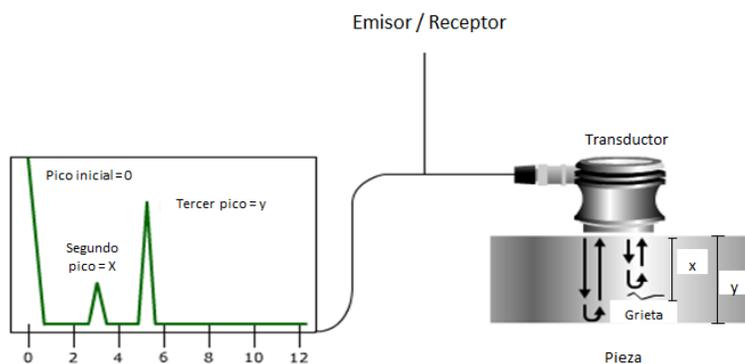


Figura 5.15 Aplicación típica del método de Ultrasonido.

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Las ondas de ultrasonido se comportan igual que las ondas de sonido audible, se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío. Cada onda viaja con características diferentes las cuales dependen del medio en que se propaguen, y no de las características de la onda.

De esta manera, es posible aplicar el método de ultrasonido para determinar ciertas características de los materiales tales como: velocidad de propagación de ondas, tamaño de grano en metales, presencia de discontinuidades (grietas, poros, laminaciones, etc.), adhesión entre materiales, inspección de soldaduras, medición de espesores de pared, entre otras.

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.
- Un transductor (puede ser el mismo que el transductor que inicia las ondas ultrasónicas o puede ser otro diferente) para aceptar y convertir las ondas de ultrasonido de salida de la pieza de trabajo en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte (impresa o en pantalla).

Métodos básicos de inspección

Existen diferentes métodos de inspección, como lo es el de frecuencia modulada, análisis espectral, conducción de sonido, eco-pulsado, transmisión, entre otros. Siendo estos dos ultimo métodos los más importantes y usados hoy en día.

A continuación se describe a detalle el método, equipo y calibración empleado para los ensayos realizados en nuestro trabajo de investigación:

Método de eco-pulsado: Es el más utilizado en inspecciones ultrasónicas, involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o una interface en una pieza de trabajo. Este método es utilizado para detectar la localización de la falla y para medir espesores.

La profundidad de la falla está determinado por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La profundidad de la falla también se puede determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por una falla y el eco de la superficie de respaldo. Las dimensiones de las fallas se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas.

La información del método de eco-pulsado puede ser desplegada en diferentes formas, en esta investigación se utilizó el escaneo tipo A:

Escaneo A: Este formato provee un desplegado cuantitativo de señales y tiempo de vuelo obtenidos en un punto simple en la superficie de la pieza. El desplegado del escaneo tipo A, que es el formato más utilizado, puede ser empleado para analizar el tipo, localización y tamaño de una falla. (Figura 5.15).

Transductor de inspección: la inspección de materiales por ultrasonido no puede realizarse sin transductores de inspección, es decir, sin dispositivos para la generación de ondas sonoras. Ya que estos transductores sirven tanto como

generadores y emisores, como también de receptores, tienen una importancia decisiva dentro del sistema de inspección. Para poder deducir, a partir de una señal recibida, cual es la posición y el tamaño de un determinado punto de flexión, deben ser perfectamente conocidas las características propias de la fuente sonora y del receptor, y deben realizarse los ajustes correspondientes.

La técnica de impulsos de sonido utiliza casi exclusivamente placas piezoeléctricas (cristales) para la generación y la recepción de ondas sonoras. Estos cristales están formados por distintas sustancias cerámicas como titanato de bario, metaniobato de plomo, circonato de plomo, etc. Los cristales son excitados, mediante breves impulsos eléctricos, para producir oscilaciones mecánicas.

Mediante un amortiguador dispuesto en la parte posterior del convertidor (y también debido al acoplamiento entre el cabezal de control y la pieza inspeccionada), la oscilación de la placa piezoeléctrica es amortiguada. De esta forma es producido el impulso de ultrasonido.

El transductor utilizado en las inspecciones de ultrasonido fue un transductor normal, el cual emite un haz vertical. (Figura 5.16)

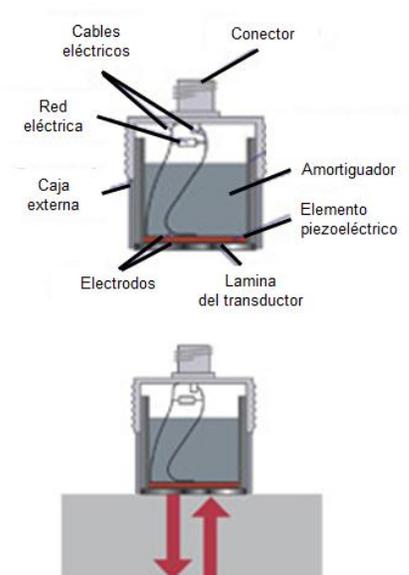


Figura 5.16 Transductor utilizado en la inspección de ultrasonido, tipo normal.

Acoplante: La técnica de ultrasonido necesita de un acoplante adecuado para transmitir el ultrasonido entre el transductor y la pieza de prueba. El acoplante puede ser líquido, semilíquido o pastoso, los acoplantes normalmente usados para la inspección por contacto son agua, aceites, glicerina, grasas de petróleo, grasa de silicón, pasta de tapiz y varias sustancias comerciales tipo pasta. Pueden usarse algunos plásticos suaves que transmiten las ondas de sonido donde puede lograrse un buen acoplamiento aplicando presión con la mano a la unidad de rastreo.

Calibración: La calibración se refiere al acto de la evaluación y el ajuste de la precisión y la exactitud del equipo de medición. En la inspección de ultrasonido, deben ocurrir distintas calibraciones. En primer lugar, la electrónica de los equipos debe ser calibrada para asegurar lo que se está realizando según lo previsto; esta operación se realiza generalmente por el fabricante del equipo. Normalmente, también es necesario que el operador realice una calibración del equipo. Esta calibración es necesaria, ya que la mayor parte de los equipos de ultrasonidos puede ser reconfigurados para su uso en una gran variedad de aplicaciones. El usuario debe calibrar el sistema, que incluye los ajustes del equipo, el transductor, y la configuración de la prueba, para validar que se logra el nivel deseado de precisión y exactitud.

En pruebas de ultrasonido, también existe una necesidad de patrones de referencia. Los patrones de referencia se utilizan para establecer un nivel general de consistencia en las mediciones y para ayudar a interpretar y cuantificar la información contenida en la señal recibida. Los patrones de referencia se utilizan para validar que el equipo y la configuración proporcionan resultados similares de un día para otro y que resultados similares se producen por diferentes sistemas. En una configuración de tipo de impulso-eco, intensidad de la señal depende tanto del tamaño del defecto y la distancia entre el fallo y el transductor. El inspector puede utilizar un patrón de referencia con un error inducido artificialmente de tamaño conocido y aproximadamente a la misma distancia para el transductor para producir una señal. Mediante la

comparación de la señal del patrón de referencia a la información recibida desde el defecto real, el inspector puede estimar el tamaño del defecto.

Corrección de Distancia Amplitud (DAC): Es una corrección de amplitud-distancia y se utiliza para realizar la evaluación del tamaño de las discontinuidades, de acuerdo a la caída de amplitud de las indicaciones con respecto a la distancia en que se encuentran. El trazo de la curva DAC se realiza con respecto a un bloque de referencia básico ASTM (Figura 5.17). Cada bloque de referencia contiene un solo tamaño de agujero de fondo plano, así como una distancia de trayectoria definida. [31, 32, 33]



Figura 5.17 Bloques de referencia básicos ASTM. [33]

Como parte de la inspección establecida por la empresa, se aprovechó esta condición para realizar a detalle pruebas de ultrasonido en el material. En total se llevaron a cabo 4 pruebas, la primera se realizó en la selección y preparación del material, con el fin de poder dimensionar el starcrack interno que se encontraba presente en la pieza, por lo que se decidió pulir 5 líneas a lo largo del material y posteriormente inspeccionar la pieza de trabajo. Para esta prueba, el ultrasonido fue contra pared posterior, por lo tanto no se utilizó bloque de calibración.

Las tres pruebas de ultrasonido restantes, se llevaron a cabo al término de cada ensayo de forja (Forja I, II y III), para estas pruebas se utilizaron bloques de calibración con distancias de trayectoria de 228.6 (9in) y 304.8mm (12in), con

un tamaño de agujero de 6.35mm (0.25in), para ambos bloques. Para la medición se utilizó un equipo portátil GE, modelo USM 35 (Figura 5.18). El procedimiento de estas pruebas de ultrasonido se realizó bajo las especificaciones de la Norma ASTM A388M-11. [34]



Figura 5.18 Equipo portátil utilizado para la inspección de ultrasonido.

5.3.3 Macroataque

El ensayo de Macro Ataque se utiliza para mostrar la heterogeneidad de los metales y aleaciones, emplea la acción de un ácido u otro agente corrosivo para revelar las características macroestructurales del material, proporcionando información sobre las variaciones en la estructura, tales como el tamaño de grano, las líneas de flujo, estructura columnar, las dendritas; además, variaciones en la composición química, como lo son las segregaciones y la presencia de discontinuidades como porosidades, grietas, vetas, entre otras.

Esta técnica se utiliza ampliamente para el control de calidad en la industria del acero, para determinar las inclusiones, la segregación, y la estructura. Los Talleres de forja, usan el Macro Ataque para revelar las líneas de flujo en el establecimiento de las mejores prácticas de forja, diseño de matriz, y el flujo de metal. [35]

En este trabajo, el ensayo de Macro Ataque se realizó en las tres lajas ya mencionadas con anterioridad. La preparación y el procedimiento se realizaron bajo las especificaciones de la Norma ASTM E381-01:

Preparación: La pieza o muestra no necesita ser muy elaborada. Cualquier método de presentar una superficie lisa con una cantidad mínima de trabajo en frío será satisfactorio, aunque en algunos casos se tiene que llevar la superficie de las muestras hasta un acabado más fino con una lija grano 800 o 1200. Debido a las dimensiones de las lajas se utilizó un pulidor para preparar la superficie de las mismas y así continuar con el ensayo.

Después de la preparación de la superficie, las lajas se limpiaron cuidadosamente con solvente. Cualquier grasa, aceite, u otros residuos producirían un ataque no uniforme o desigual. Una vez limpia, se debe tener cuidado de no tocar la superficie de las piezas o muestras.

Procedimiento: Muchas de las soluciones son agresivas y pueden emitir humos irritantes y corrosivos por lo que la prueba se debe hacer en una habitación bien ventilada, preferiblemente bajo una campana de humos.

Los reactivos utilizados fueron ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO₃), ambos disueltos en una solución de 30% de ácido y 70% de agua, cada uno por separado.

Se vertió ácido clorhídrico sobre la laja, cubriendo completamente la superficie en 7 ocasiones durante el ensayo, esta operación fue la misma para el ácido nítrico; la aplicación de los ácidos fue intercalada uno de otro. El tiempo de permanencia de cada ácido fue de 3-5 minutos aproximadamente, retirando el exceso y haciendo limpieza de la superficie al término de cada aplicación. El tiempo total del ensayo fue de aproximadamente 50 minutos para revelar en su totalidad la macroestructura.

Terminado el Macro Ataque se debe limpiar la superficie por última vez, recomendando aplicar alguna película protectora en spray para evitar contaminación, oxidación u otros agentes en la superficie. [36].

5.3.4 Dureza

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura o las deformaciones permanentes, entre otras.

En metalurgia la dureza se mide utilizando un durómetro para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y del rango de cargas aplicadas, existen diferentes escalas, adecuadas para distintos rangos de dureza.

El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido.

Las escalas de uso industrial actuales más usadas son las siguientes:

- **Dureza Brinell:** Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de Tungsteno (W_3C). Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con láminas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.
- **Dureza Knoop:** Mide la dureza en valores de escala absolutas, y se valoran con la profundidad de señales grabadas sobre un mineral mediante un utensilio con una punta de diamante al que se le ejerce una fuerza estándar.

- **Dureza Rockwell:** Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.
- **Rockwell superficial:** Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitar o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial. [37, 38]

En esta investigación se utilizaron dos escalas para medir la dureza en el material: Dureza Brinell y Dureza Pin Brinell. Las pruebas de dureza se realizaron en las tres lajas obtenidas de los procesos de forja mencionados en la sección 5.2.1 de este capítulo. La dureza Brinell se realizó solo en la mitad de cada laja, mientras que la dureza Pin Brinell se efectuó en toda la laja. (Figura 5.19)



a)



b)

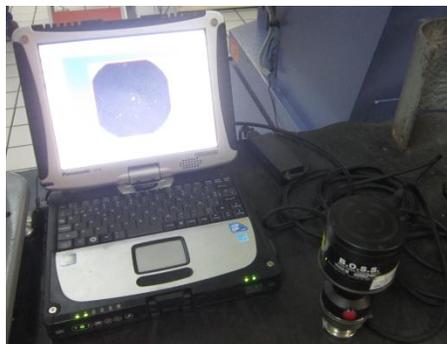
Figura 5.19 a) Laja para prueba de dureza Brinell, y b) Laja para prueba Pin Brinell, obtenidas al término del ensayo de forja III.

Dureza Brinell: Es simple y consiste básicamente en aplicar una carga constante, en este caso la carga fue de 3000 kg sobre una bola de acero endurecido de 10 mm de diámetro sobre una superficie plana de la pieza a ser medida. La prueba se llevó a cabo bajo las especificaciones de la Norma ASTM E10-07. [39]

El equipo empleado fue un durómetro de base, marca Wilson Brinell, para la medición de las indentaciones se utilizó un escáner óptico portátil de la marca B.O.S.S. (Figura 5.20).



a)



b)

Figura 5.20 a) Durómetro de base, y b) Escáner óptico para medición de indentaciones.

Dureza Pin Brinell: Se utiliza principalmente para piezas las cuales debido a su tamaño no pueden ser verificadas con un equipo portátil o de banco. Este método utiliza un martillo para aplicar la fuerza, y un perno calibrado el cual controla la carga aplicada a la pieza, esta pieza se golpea con martillo. La carga es de 1580 Kg. El diámetro del penetrador es de 7.26mm.

La huella que se imprime en la superficie de la pieza se convierte mediante una tabla a un valor de dureza Brinell. Este método se emplea para durezas en el rango de 100 – 730 BHN. El equipo utilizado para esta prueba fue un Probador Pin Brinell Portable, para la medición de las huellas se utilizó un Lente Ocular, de la marca Newage. (Figura 5.21)

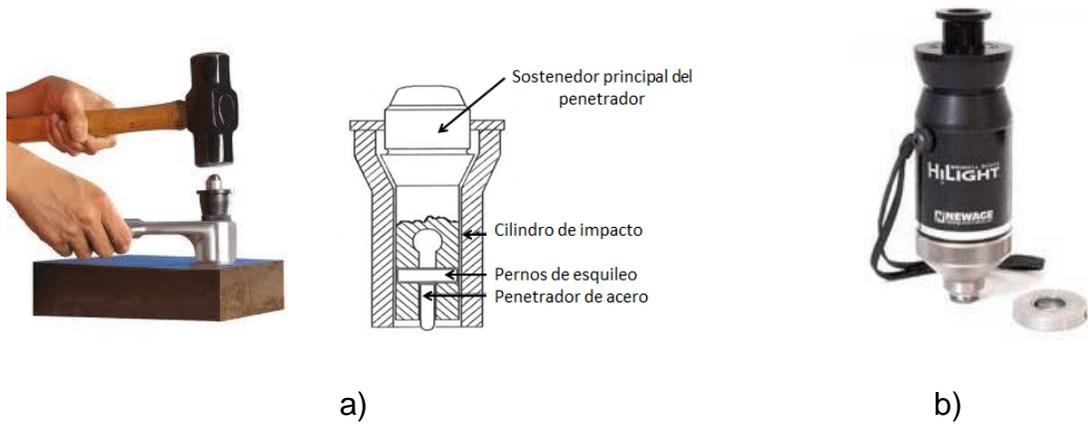


Figura 5.21 a) Probador de dureza Pin Brinell, y b) Lente ocular para medición de indentaciones.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 Introducción

En el presente Capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de la experimentación realizada en este trabajo de investigación, la cual fue descrita en el Capítulo anterior. Los resultados serán divididos en: Ensayos (Forja I, Forja II y Forja III), Pruebas de Líquido Penetrante, Ultrasonido, Ensayos de Macroataque, Durezas y Simulación.

6.2 Ensayos

Antes de llevar a cabo los procesos de forja, se realizaron los cálculos teóricos de alargamiento de la pieza de trabajo de cada proceso.

Los cálculos se efectuaron mediante fórmulas de volumen, para posteriormente encontrar la longitud final del material. Cabe mencionar que para los tres ensayos se consideró un volumen constante.

Los resultados obtenidos del cálculo teórico de alargamiento, así como las mediciones reales de la pieza de trabajo en cada uno de los procesos de forja se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Comparativa de cálculo de alargamiento en los Ensayos de Forja.

ENSAYO	LONGITUD CALCULADA (mm)	LONGITUD REAL (mm)	PORCENTAJE DE ERROR (%)
FORJA I	4,136	3,746	9
FORJA II	1,280	1,219	4
FORJA III	4,725	4,318	8

Además, se pudo obtener los valores de deformación real en el material, para este cálculo se empleó la siguiente formula (2); donde: A_o , es el área inicial y A_f , es el área final de la sección transversal de la pieza de trabajo, ambas dadas en milímetros cuadrados.

$$\epsilon_R = Ln \frac{A_o}{A_f} \quad (2)$$

6.2.1 Ensayo de Forja I

Debido a la geometría de la pieza, se optó por trabajar con los diámetros internos; se utilizaron dos fórmulas, la primera para cono truncado (3), de donde se obtuvo el volumen de la pieza, Figura 6.1, este dato se introdujo a la segunda fórmula, volumen de un cilindro (4), obteniendo finalmente la longitud alcanza por la pieza, Figura 6.2. (Ver Anexo I)

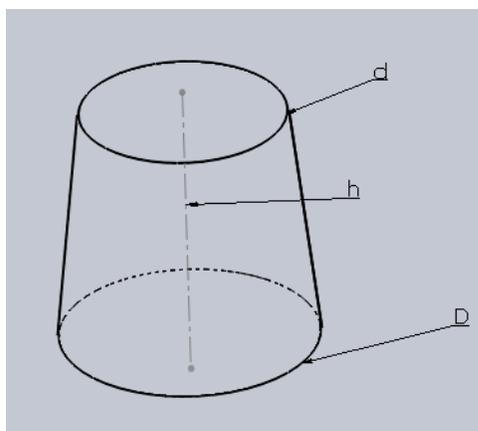


Figura 6.1 Volumen de un cono truncado.

$$V = \frac{\pi}{12} h_1 (D^2 + Dd + d^2) \quad (3)$$

Donde: h, es la longitud (mm); D, es el diámetro mayor (mm) y d, es el diámetro menor (mm).

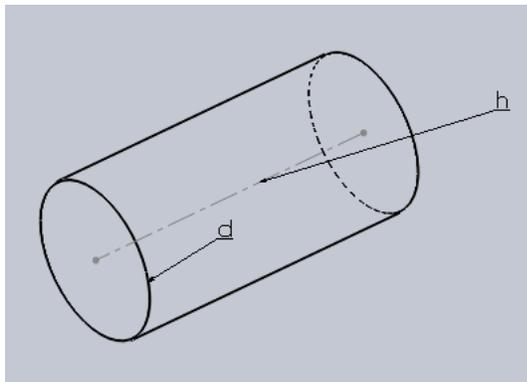


Figura 6.2 Volumen de un cilindro.

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 h \quad (4)$$

Donde: h, es la longitud (mm); d, es el diámetro (mm).

Posterior al proceso de forja el material quedó con un diámetro de 624mm (24.6in) y una longitud 3,746mm (147.5in), Figura 6.3. La relación de reducción mínima fue de 2.2:1, tomando como referencia el diámetro menor de la pieza (940mm), la relación de reducción máxima fue de 2.9:1, en base al diámetro mayor (1,066mm). La pieza obtuvo un rango de deformación real de 0.82-1.07.

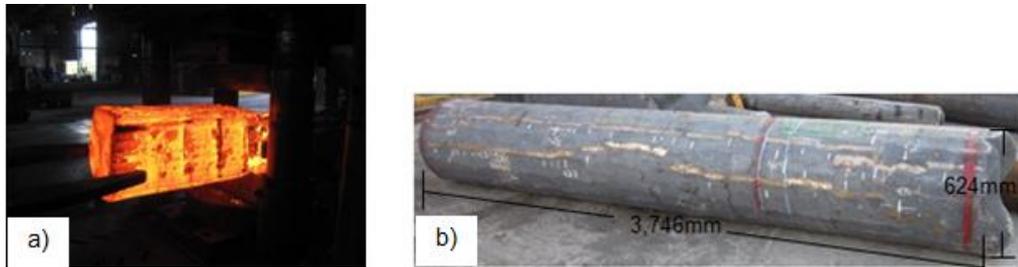


Figura 6.3 a) Deformación del material durante el Ensayo de Forja I, b) Material forjado, dimensiones finales: 3,746mm de longitud y 624mm de diámetro.

Existe un porcentaje de error del 9% del valor teórico contra el valor real, el cual se puede justificar de la siguiente manera: 1) de 5-6% de error, se considera a que en los cálculos teóricos el volumen fue constante y 2) de 3-4% de error, considerando que no se tomó en cuenta el despunte del material y la inexactitud de la medición.

6.2.2 Ensayo de Forja II

Para el cálculo teórico se utilizó la fórmula 4, de la cual se obtuvo el volumen de la pieza, así como su longitud final. (Ver Anexo I)

La pieza se forja de acuerdo al diseño de pasos establecido, después de este proceso el material termino con una longitud de 1,219mm (48in), y un diámetro de 495mm (19.5in), Figura 6.4. La relación de reducción mínima obtenida fue de 4.3:1, mientras que la relación de reducción máxima fue de 4.6:1, teniendo como base un diámetro menor de 1,038mm (40.8in) y un diámetro mayor de 1,064mm (41.9in) respectivamente, de la pieza inicial. El valor de deformación real en el material fue de 0.38.



Figura 6.4 a) Inicio del Ensayo de Forja II, b) Dimensiones finales del material forjado: 1,219mm de longitud y 495mm de diámetro.

Para este caso el porcentaje de error fue de 4%, comparando los resultados teóricos con las mediciones reales.

6.2.3 Ensayo de Forja III

Al igual que el ensayo de forja anterior, para este proceso se utilizó la fórmula 4, con el fin de obtener el volumen y la longitud final de la pieza de trabajo. (Ver Anexo 1)

El material se procedió a forjar, posterior a este proceso, se midió la pieza obteniendo lo siguiente: longitud de 4,318mm (170in), y un diámetro de 472mm (18.6in), Figura 6.5. La relación de reducción mínima obtenida fue de 4:1, tomando como base el diámetro menor inicial del material 940mm (37in), mientras que la relación de reducción máxima fue de 4.8:1, teniendo como base el diámetro mayor en la pieza inicial 1,035mm (40.74in). Para este ensayo la deformación real fue de 0.55.

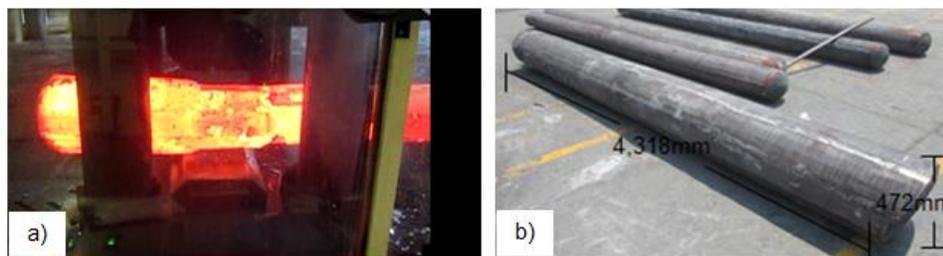


Figura 6.5 a) Ensayo de Forja III, b) Dimensiones finales de la pieza: 4,318mm de longitud, 472mm de diámetro.

El porcentaje de error obtenido fue de 8% equiparando los resultados obtenidos teóricamente con los resultados reales.

6.2.3.1 Medición de temperatura al centro de la pieza

Como se comentó en el Capítulo 5, para este ensayo, se introdujo una pieza adicional de acero 4340 en el horno (610mm de diámetro y una longitud de 2350mm), a la cual se le colocó un termopar al centro, obteniendo el siguiente comportamiento de temperatura. (Figura 6.6).

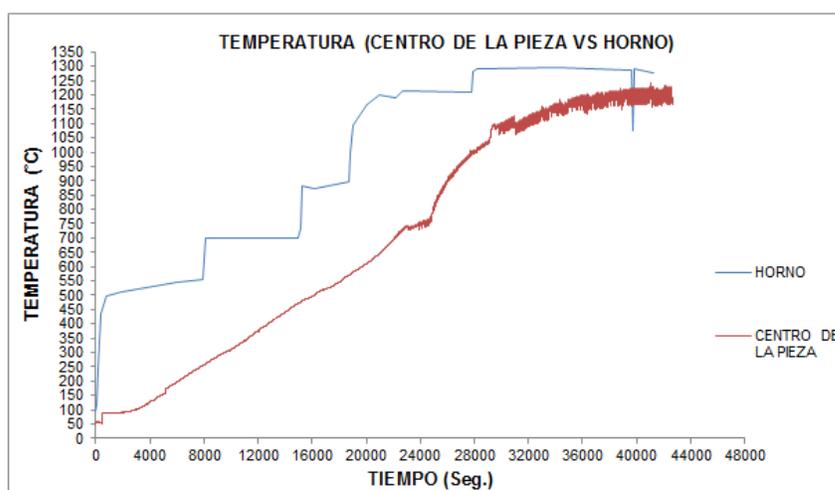


Figura 6.6 Comportamiento de la temperatura (centro de la pieza vs horno) durante el proceso de calentamiento.

En la Tabla 6.2 podemos observar los valores de temperatura del horno y la pieza, así como la diferencia entre estos en un tiempo determinado:

Tabla 6.2 Valores de temperatura. Horno vs centro de la pieza.

TIEMPO (Seg)	TEMPERATURA (°C)		
	CENTRO DE LA PIEZA	HORNO	ΔT
0	51.11	93.02	41.91
79	58.0617	117.58	59.5183
124	58.1171	239.88	181.7629
383	53.4939	435	381.5061
742	89.4809	496	406.5191
1917	90.6083	511.25	420.6417
6005	196.9451	545	348.0549
7908	254.0674	554	299.9326
8082	259.2187	700.67	441.4513
9512	299.4763	699.42	399.9437
14995	472.8397	697.22	224.3803
15112	474.5052	732.32	257.8148
15267	479.3272	883.26	403.9328
16181	501.1671	873.79	372.6229
18770	571.6814	896	324.3186
18791	572.6645	996.21896	423.55446
19065	581.2097	1093.89	512.6803
20021	609.8288	1166	556.1712
20981	645.5602	1199.21	553.6498
22189	704.0221	1189.79	485.7679
22721	731.7298	1212	480.2702
22780	731.2104	1208	476.7896
27910	991.6236	1280	288.3764
28164	1006.1131	1290.63	284.5169
34166	1135.8789	1294.42	158.5411
39675	1190.8408	1288	97.1592
39732	1210.2213	1075.94	134.2813
39832	1221.1384	1290	68.8616
41300	1170.431	1278.29	107.859

El siguiente esquema (Figura 6.7) nos muestra un resumen de los ensayos de forja realizados en este trabajo de investigación.

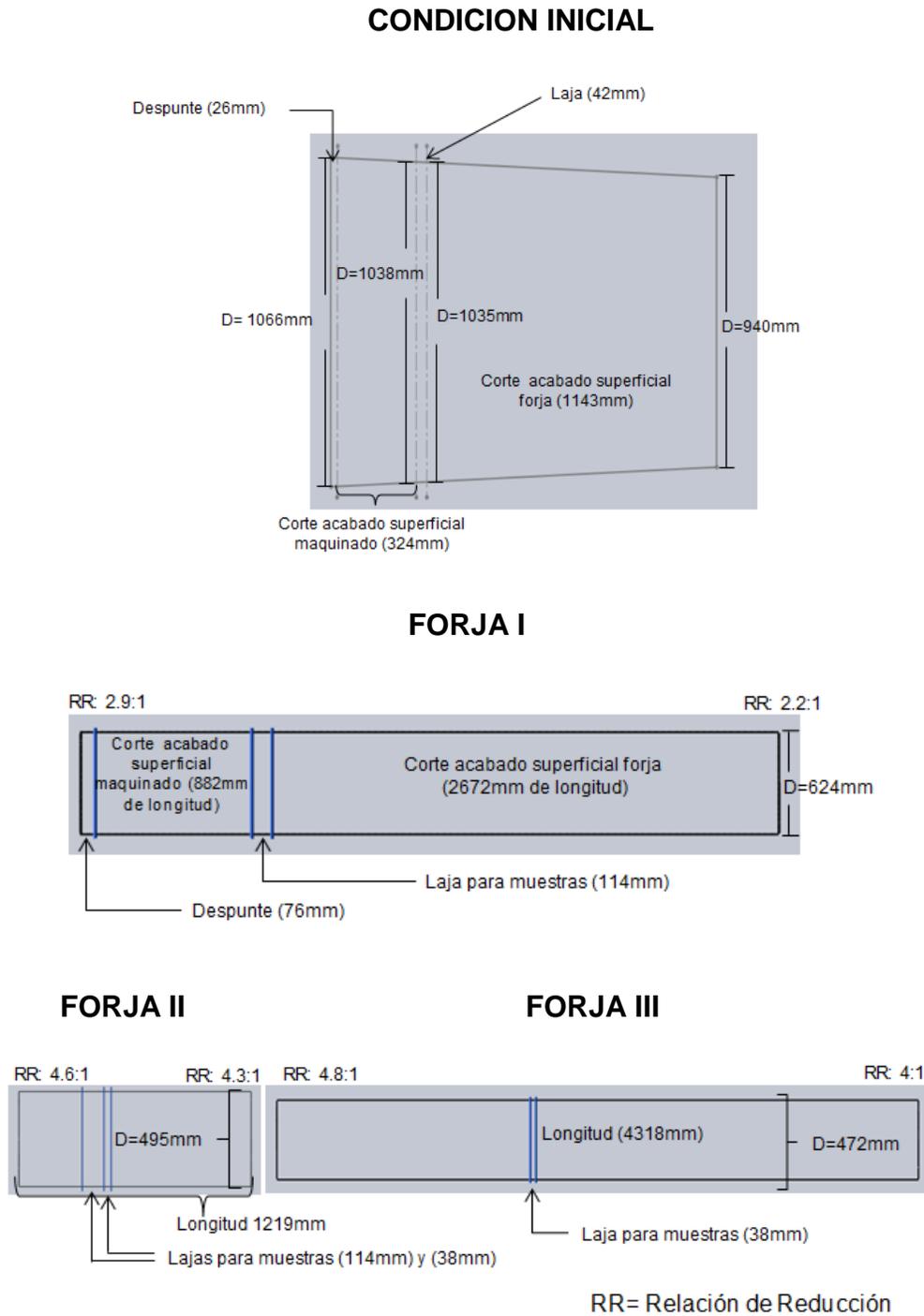


Figura 6.7 Resumen de Ensayos de Forja.

6.3 Prueba de Líquidos Penetrantes

La primera prueba de líquidos penetrantes se llevó a cabo durante la selección y preparación del material; se pudo dimensionar el “starcrack” interno en el material antes de ser forjado, el cual midió aproximadamente de 139-152mm (5.5-6in). Figura 6.8.

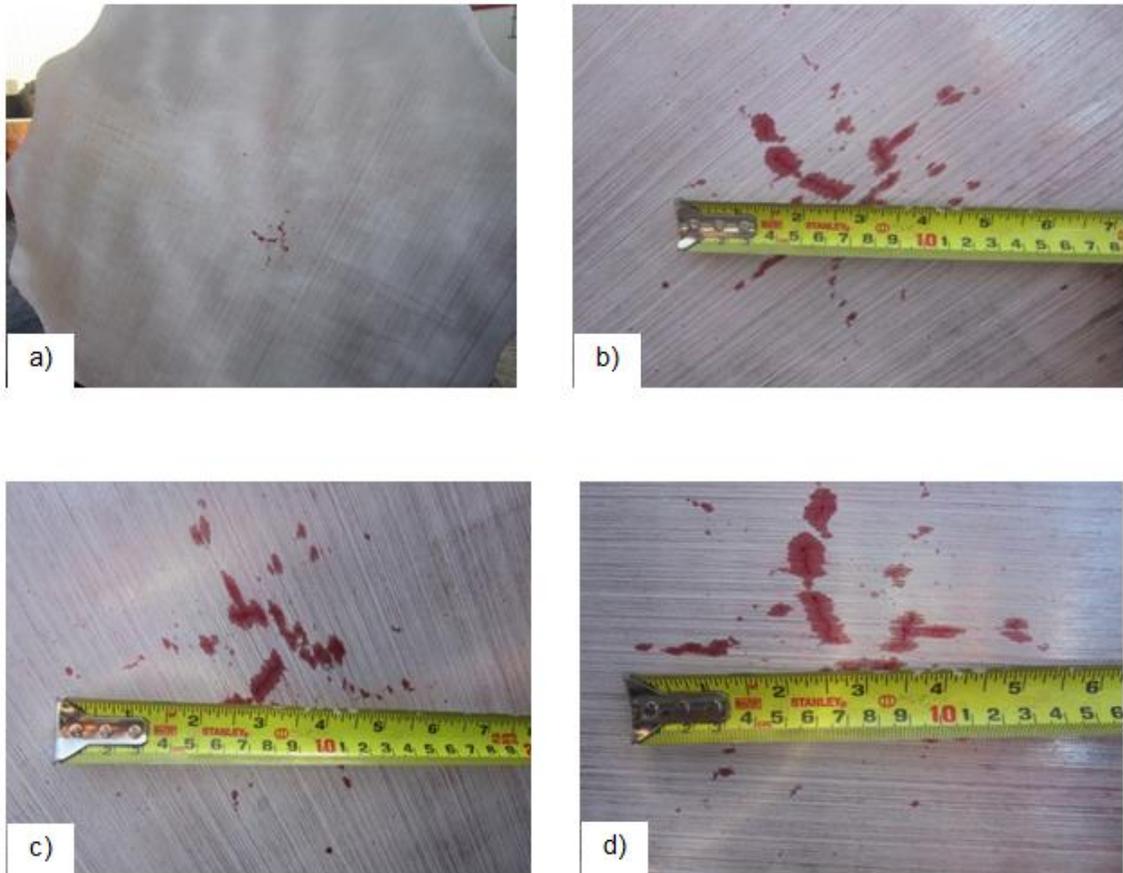


Figura 6.8 Prueba de líquidos penetrantes en la selección y preparación del material, se puede observar y dimensionar defectos internos (starcrack) en una de las caras del lingote.

Las pruebas restantes se llevaron a cabo en las lajas obtenidas al término de cada Ensayo de Forja (Figura 6.9), en las cuales se observó lo siguiente:

Ensayo de Forja I: en esta laja aparecen pequeñas indicaciones de defectos contenidas en un área aproximada de 965mm^2 .

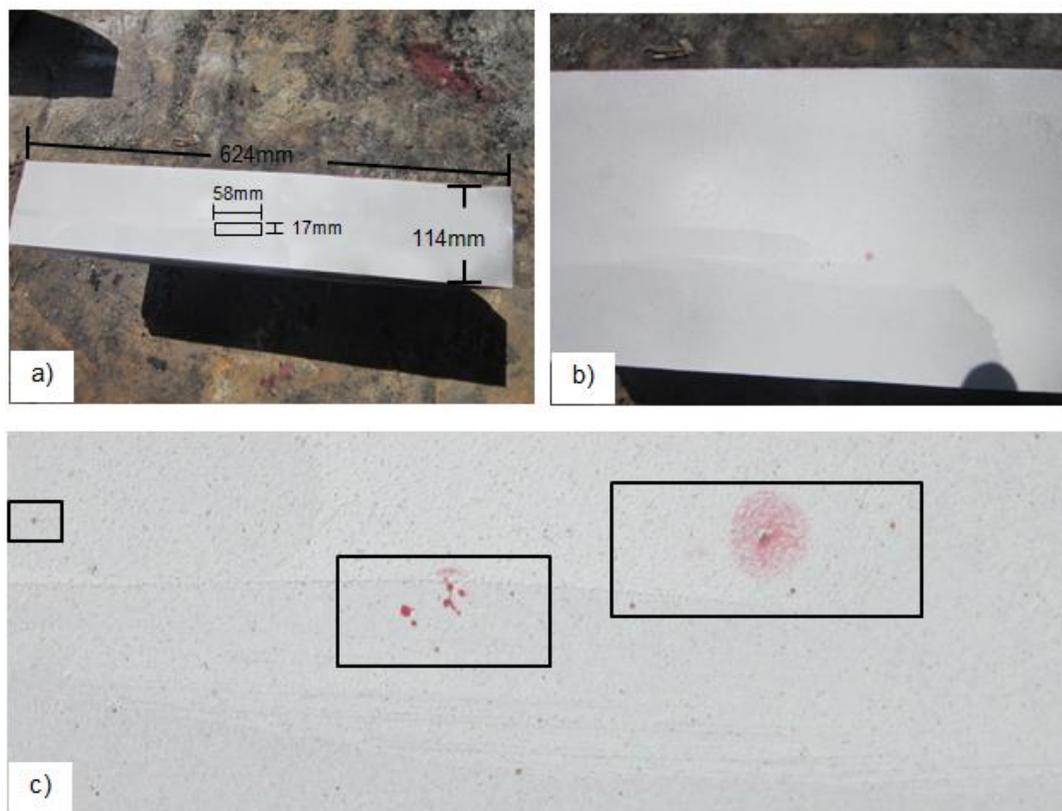


Figura 6.9 a), b) y c) Zona con defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes.

Ensayo de Forja II: en este ensayo se cortaron dos lajas, una laja con un espesor de 38mm (Figura 6.10) y otra con un espesor de 114mm (Figura 6.11). En esta última laja se encontraron los defectos más grandes, detectados por la técnica de ultrasonido.

Los defectos encontrados en la laja de la Figura 6.10 estaban concentrados en un área de $1,490\text{mm}^2$, mientras que en la laja de la Figura 6.11 se encontraron en un área de $2,970\text{mm}^2$, aproximadamente.

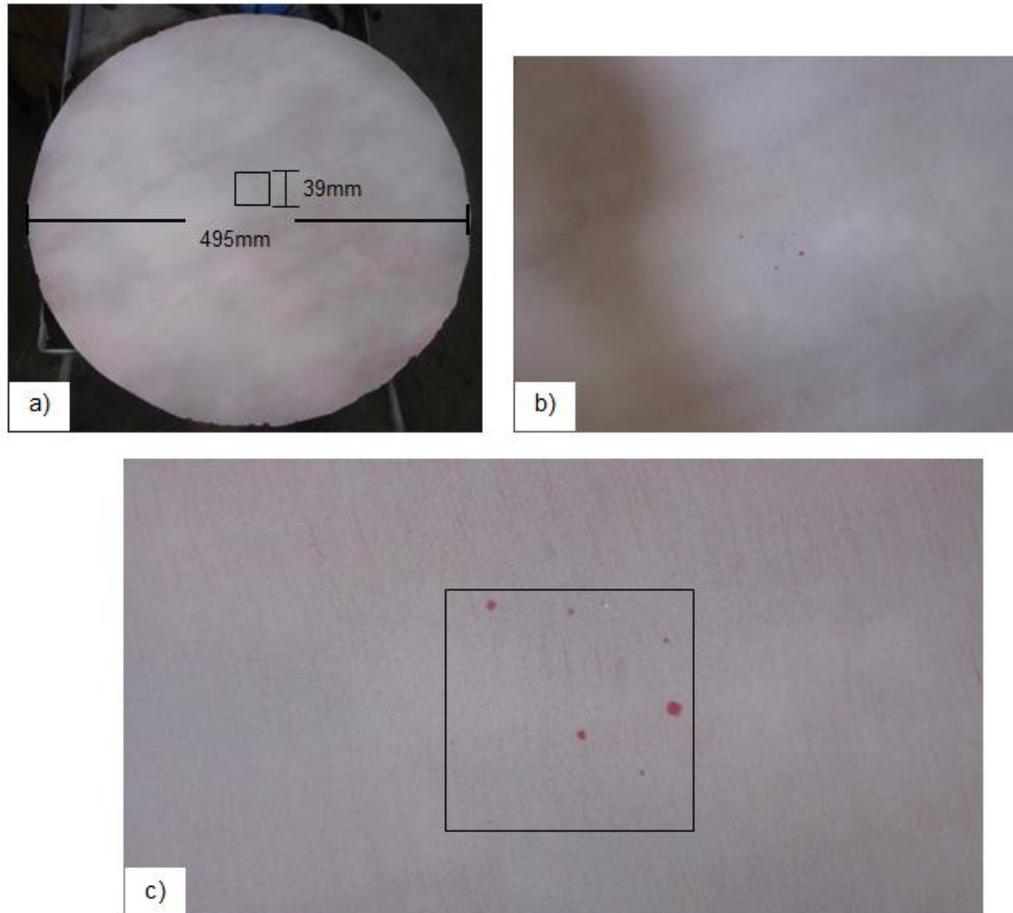


Figura 6.10 a), b) y c) Zona con defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes en la laja con espesor de 38mm (1.5in).

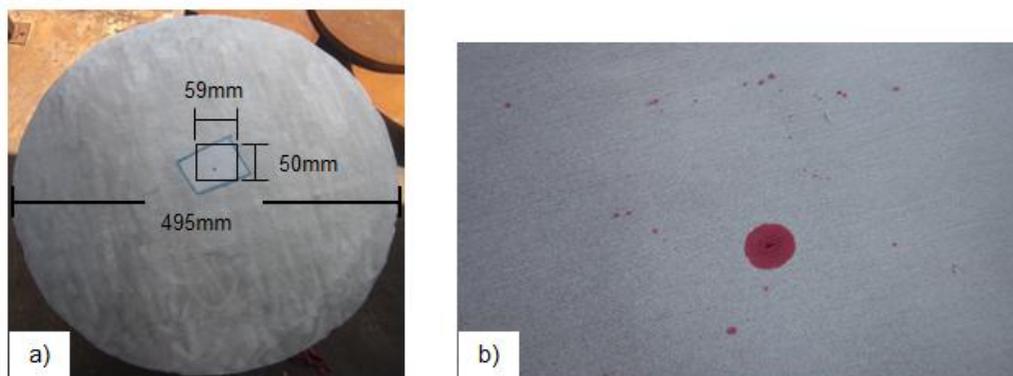


Figura 6.11 a) y b) Área con concentración de defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes en la laja con espesor de 114mm (4.5in).

Ensayo de Forja III: en la laja de este último ensayo (Figura 6.12), la prueba de líquidos penetrantes no reveló algún defecto en la superficie. Cabe mencionar, que en la pieza de la cual se extrajo esta laja, se detectó una pequeña cantidad de defectos por la técnica de ultrasonido. Debido a que el material estaba dado de alta como una orden de producción, no se pudo realizar el corte de la laja en la zona donde se concentraban los defectos y así poder realizar la prueba de líquidos penetrantes en ella.



Figura 6.12 Prueba de líquidos penetrantes en la laja (38mm de espesor) obtenida después del ensayo de Forja III, no se observó ninguna discontinuidad en la superficie de la laja.

6.4 Inspección de Ultrasonido

Se realizaron cuatro pruebas de Ultrasonido, la primera prueba se llevó a cabo en la selección y preparación del material; las mediciones del starcrack donde se concentraban los defectos se muestran en la Tabla 6.3. (Ver Anexo II); teniendo un promedio de 127mm (5in)-152.4mm (6in) de longitud. Se realizó un dibujo tridimensional de las mediciones obtenidas en la prueba. Figura 6.13.

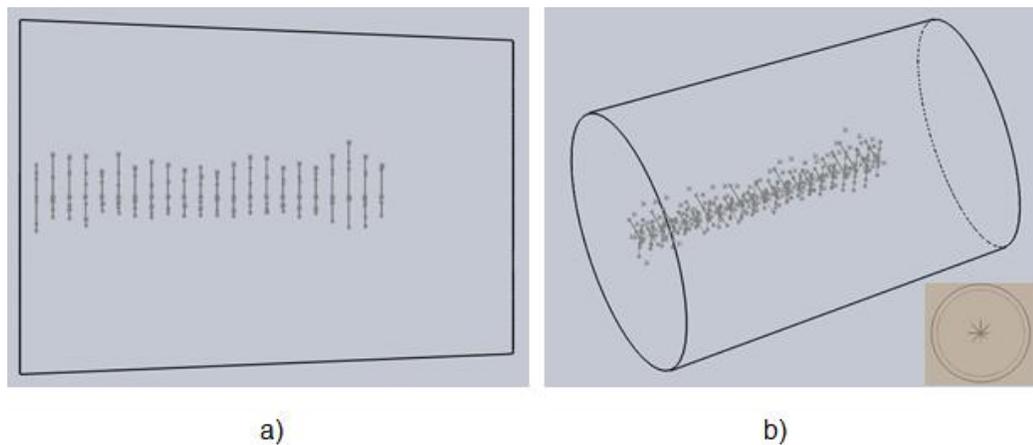


Figura 6.13 En las imágenes a) y b) se muestra el inicio, centro y final de los defectos internos (starcrack) presentes en la pieza.

Tabla 6.3 Resultados de Ultrasonido, medición de starcrack.

Longitud del corte (mm)	Línea 1 Dimensión de starcrack (mm)	Línea 2 Dimensión de starcrack (mm)	Línea 3 Dimensión de starcrack (mm)	Línea 4 Dimensión de starcrack (mm)	Línea 5 Dimensión de starcrack (mm)
50.8	113.284	204.978	124.714	146.05	170.688
101.6	149.098	143.51	140.462	153.924	55.372
152.4	155.448	161.036	144.018	184.15	143.002
203.2	136.652	194.564	134.366	181.864	167.894
254	135.636	99.822	110.744	179.324	72.644
304.8	92.964	150.114	175.26	105.664	87.63
355.6	96.266	104.394	170.18	149.606	176.022
406.4	62.738	137.414	127.762	155.702	121.158
457.2	123.698	90.678	135.382	106.426	99.822
508	140.462	107.95	158.75	145.542	136.906
558.8	183.642	99.06	75.692	147.32	120.904
609.6	69.088	82.55	166.624	126.746	102.108
660.4	127.762	144.526	98.298	164.592	167.64
711.2	113.284	90.17	164.846	149.606	121.92
762	89.916	167.894	119.38	177.8	78.232
812.8	99.314	116.078	112.522	116.332	120.396
863.6	119.634	136.652	69.088	123.444	114.808
914.4	140.97	126.492	101.6	129.286	97.79
965.2	111.506	143.764	138.43	168.91	151.638
1016	164.592	174.244	157.48	192.024	120.142
1066.8	149.098	94.996	120.904	205.486	117.602
1117.6	152.4	67.818	85.598	184.404	211.328
1168.4	0	0	0	0	0
1219.2	0	0	0	0	0
1270	0	0	0	0	0
1320.8	0	0	0	0	0
1371.6	0	0	0	0	0
1422.4	0	0	0	0	0
1473.2	0	0	0	0	0

Además, con ayuda del software (Solid Works Premium) se pudo medir las áreas aproximadas donde se concentraban los defectos (Figura 6.14) en el material, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6.4 Resultado de cálculos de áreas aproximadas con concentración de defectos.

	AREA (mm ²)		AREA (mm ²)
A₁	21189.64	A₁₂	10556.73
A₂	17412.40	A₁₃	15448.06
A₃	21934.07	A₁₄	18254.66
A₄	22152.96	A₁₅	17084.56
A₅	13036.36	A₁₆	10756.52
A₆	13250.9	A₁₇	13219.57
A₇	17570.77	A₁₈	14006.18
A₈	13318.63	A₁₉	22389.65
A₉	9354.44	A₂₀	29668.8
A₁₀	14529.41	A₂₁	23213.77
A₁₁	12707.87	A₂₂	20099.13

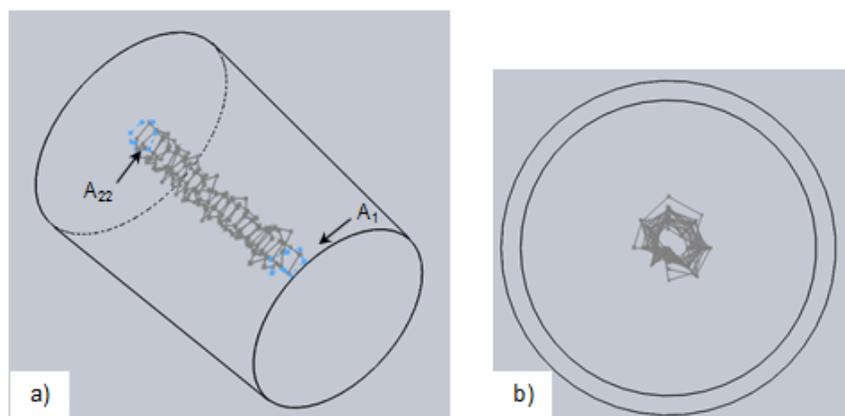


Figura 6.14 a) Vista isométrica y b) Vista frontal, Áreas aproximadas con concentración de defectos.

Las tres pruebas restantes se realizaron al término de cada Ensayo de Forja (Forja I, Forja II y Forja III), a continuación se muestra un resumen de las indicaciones de defectos de menor tamaño (área), así como las indicaciones de mayor tamaño (área) encontrados en cada uno de estos ensayos (Tablas 6.5, 6.6, 6.7, 6.8); los resultados completos se muestran en el Anexo II.

Ensayo Forja I:

Tabla 6.5 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja I. (Corte acabado superficial maquinado).

Corte acabado superficial maquinado				
	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	
LINEA 1	+5	2.38125	17.81397647	Defecto Mayor
	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Menor
LINEA 2	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Mayor
	+12	1.5875	7.917322875	Defecto Menor
LINEA 3	+5	2.38125	17.81397647	Defecto Mayor
	+26	0.71238872	1.594354738	Defecto Menor
LINEA 4	+4	2.52015625	19.95289073	Defecto Mayor
	+12	1.5875	7.917322875	Defecto Menor
LINEA 5	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Mayor
	+11	1.68671875	8.937915277	Defecto Menor

Tabla 6.6 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja I. (Corte acabado superficial forja).

Corte acabado superficial forja				
	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	
LINEA 1	-10	5.65546875	100.481961	Defecto Mayor
	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Menor
LINEA 2	-5	4.22671875	56.12515961	Defecto Mayor
	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Menor
LINEA 3	-12	6.35	126.677166	Defecto Mayor
	+6	2.24234375	15.79629622	Defecto Menor
LINEA 4	-7	4.7625	71.25590588	Defecto Mayor
	+5	2.38125	17.81397647	Defecto Menor
LINEA 5	-6	4.4846875	63.18518487	Defecto Mayor
	+7	2.12328125	14.16334837	Defecto Menor

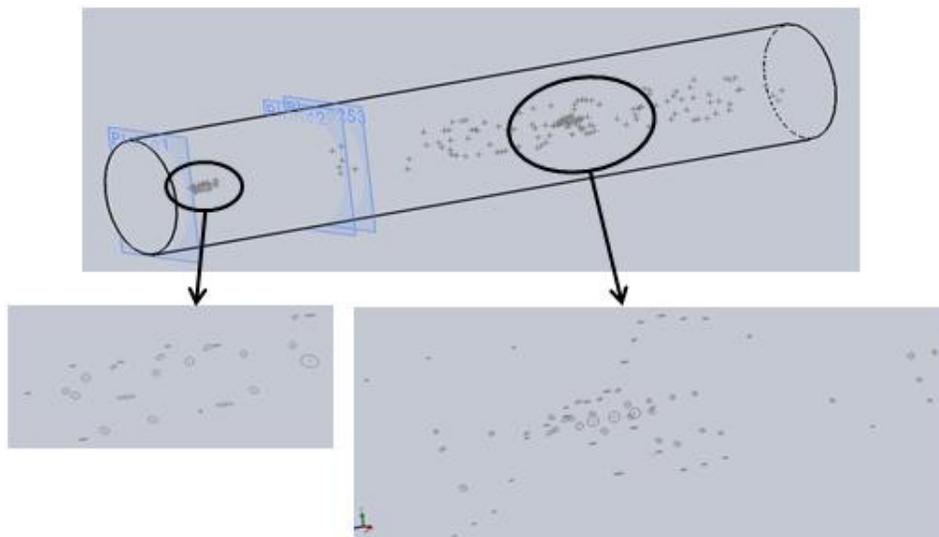


Figura 6.15 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja. I.

Ensayo Forja II:

Tabla 6.7 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja II.

	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	
LINEA 1	-10	5.65546875	100.481961	Defecto Mayor
	+4	2.52015625	19.95289073	Defecto Menor
LINEA 2	-1	3.35359375	32.87278709	Defecto Mayor
	+4	2.52015625	18.56395725	Defecto Menor
LINEA 3	-9	5.318125	88.85215596	Defecto Mayor
	+7	2.12328125	14.16334837	Defecto Menor

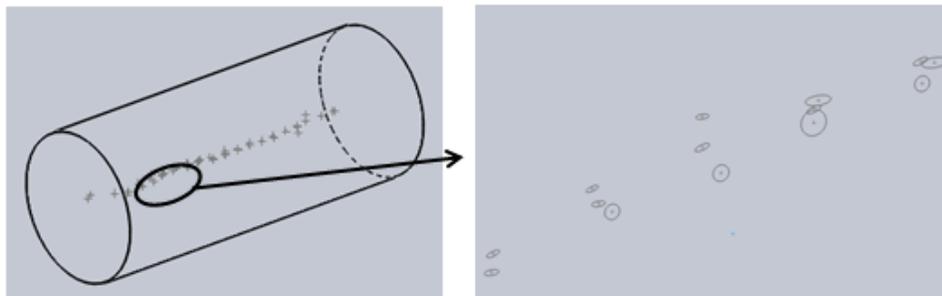


Figura 6.16 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja II.

Ensayo Forja III:

Tabla 6.8. Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja III.

	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	
LINEA 1	+4	2.52015625	19.9528907	Defecto Mayor
	+9	1.89507813	11.2824944	Defecto Menor
LINEA 2	+4	2.52015625	19.9528907	Defecto Mayor
	+9	1.89507813	11.2824944	Defecto Menor
LINEA 3	+7	2.12328125	14.1633484	Defecto Mayor
LINEA 4	+3	2.6789063	22.54581	Defecto Mayor
	+9	1.8950781	11.28249	Defecto Menor
LINEA 5	+2	2.8376563	25.29708	Defecto Mayor
	+10	1.7859375	10.02036	Defecto Menor

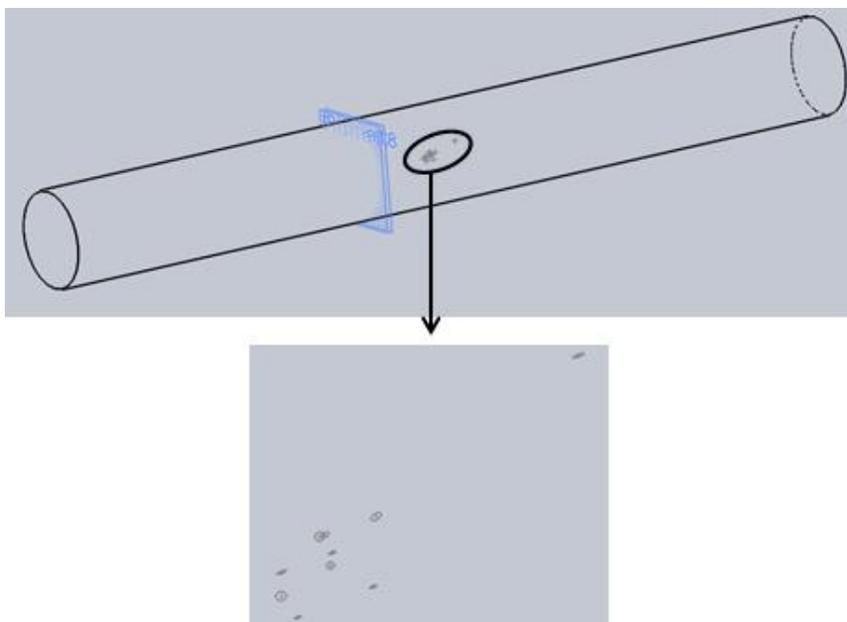


Figura 6.17 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja III.

El siguiente esquema (Figura 6.18) muestra un resumen de las pruebas de Ultrasonido llevadas a cabo en este trabajo de investigación.

PRUEBA DE ULTRASONIDO I (SELECCION Y PREPARACION DEL MATERIAL)

CORTE INICIAL

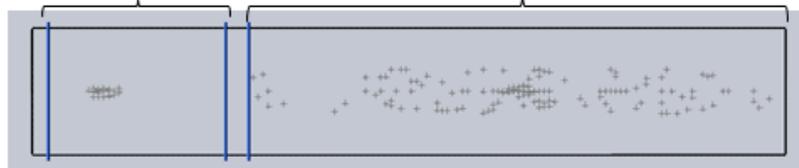


PRUEBA DE ULTRASONIDO II
(Ensayo de Forja I)

PRUEBA DE ULTRASONIDO II
(Ensayo de Forja II)

CORTE ACABADO
SUPERFICIAL MAQUINADO

CORTE ACABADO SUPERFICIAL FORJA



PRUEBA DE ULTRASONIDO IV (Ensayo de Forja III)

CORTE ACABADO
SUPERFICIAL MAQUINADO

CORTE ACABADO SUPERFICIAL FORJA



Figura 6.18 Resumen de pruebas de Ultrasonido.

6.5 Ensayos de Macroataque

Como se comentó en el capítulo anterior, los ensayos de macroataque se realizaron en las lajas obtenidas al término de cada proceso de forja, en cada caso se pudo observar la variación en la estructura, así como el refinamiento de la misma. Al centro una estructura homogénea, seguido de un afinamiento de la misma, para terminar con una estructura gruesa en la periferia. (Ver Anexo III)

A continuación se muestran los resultados del macroataque de los tres ensayos de forja:

Forja I

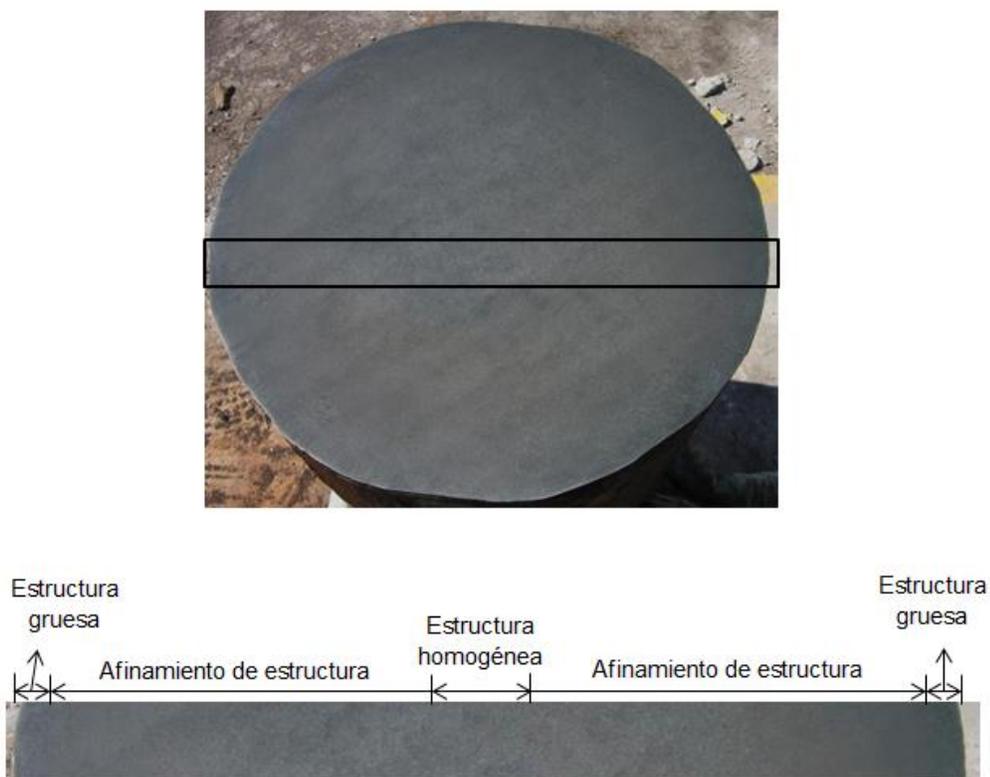


Figura 6.19 Ensayo de macroataque en laja de Forja I.

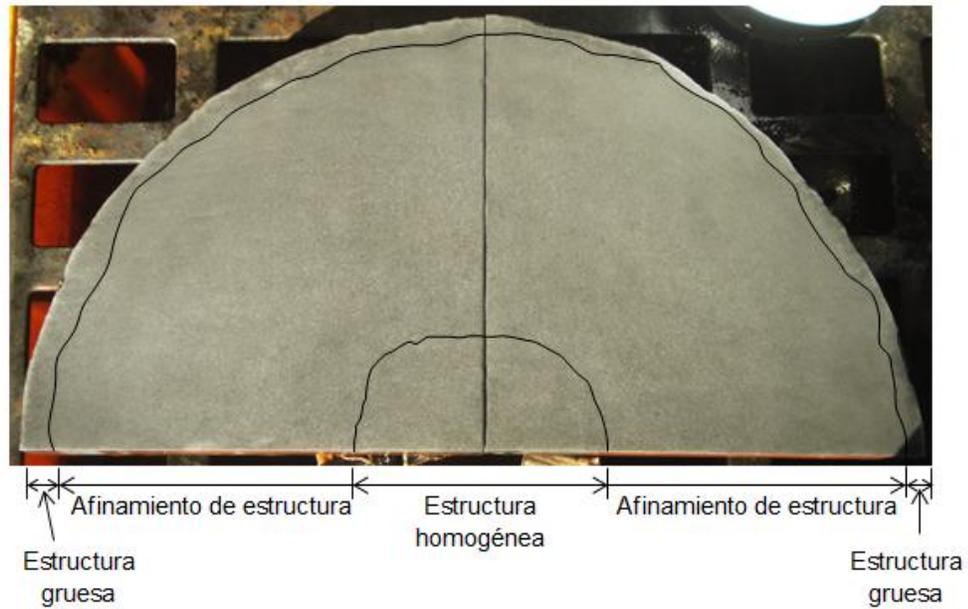
Forja II

Figura 6.20 Ensayo de macroataque en laja de Forja II.

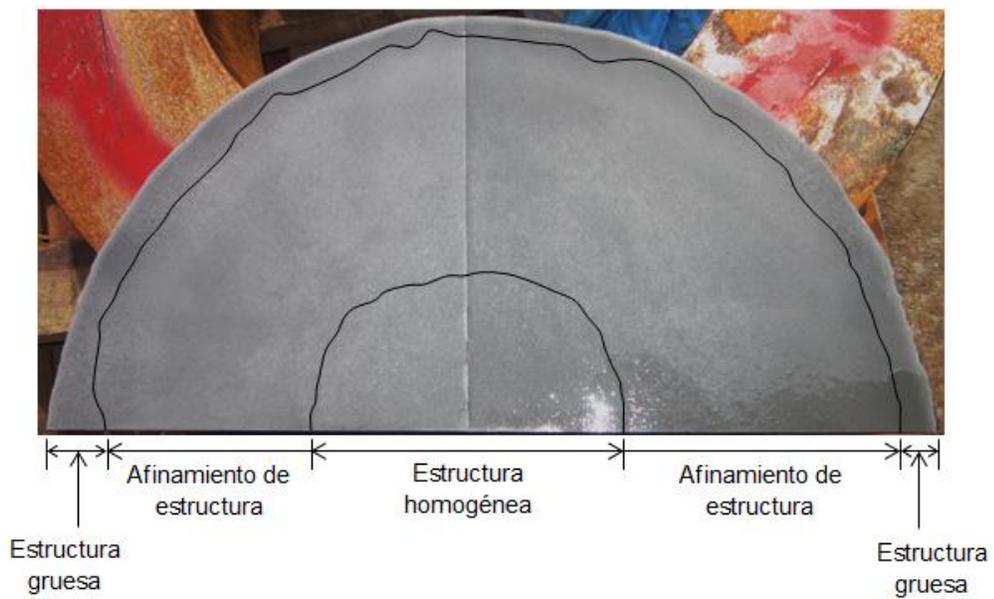
Forja III

Figura 6.21 Ensayo de macroataque en laja de Forja III.

6.6 Ensayo de Durezas

Los valores de durezas (Pin Brinell y Brinell) obtenidos de las lajas correspondientes a cada uno de los tres Ensayos de Forja se muestran a continuación:

Laja I (Ensayo Forja I)

Dureza Pin Brinell: Las indentaciones se realizaron a 5.80mm (2in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 283-312 HB (29.5-33HRC).

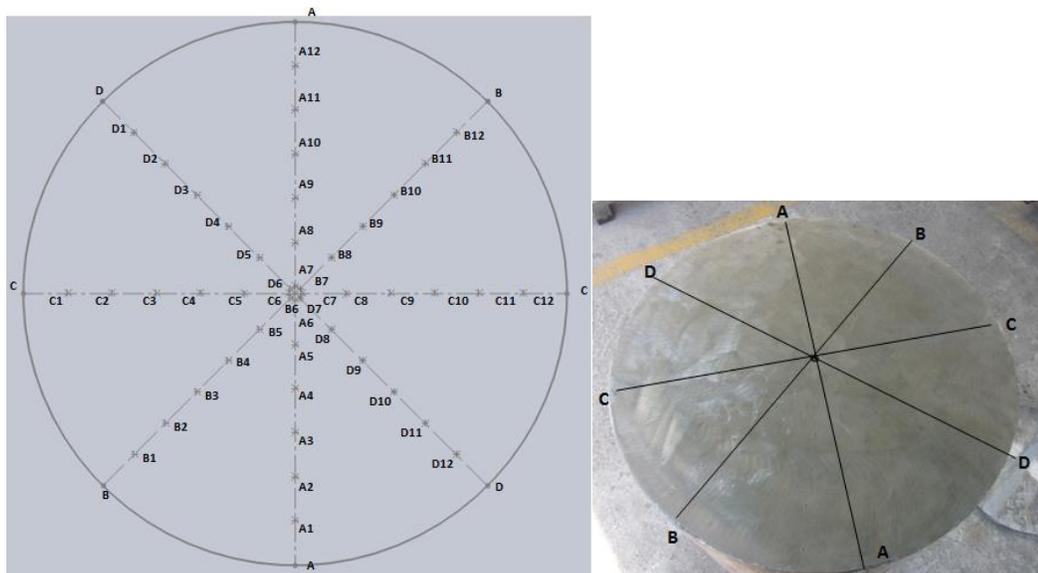


Figura 6.22 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja I.

Tabla 6.9 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja I).

IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL	IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL
A1	312	C1	312
A2	329	C2	312
A3	312	C3	312
A4	312	C4	283
A5	297	C5	297
A6	329	C6	312
A7	312	C7	312
A8	312	C8	297
A9	312	C9	297
A10	312	C10	297
A11	312	C11	297
A12	312	C12	312
B1	312	D1	312
B2	297	D2	312
B3	312	D3	297
B4	283	D4	329
B5	297	D5	312
B6	297	D6	312
B7	312	D7	312
B8	329	D8	297
B9	312	D9	312
B10	297	D10	312
B11	297	D11	312
B12	329	D12	312

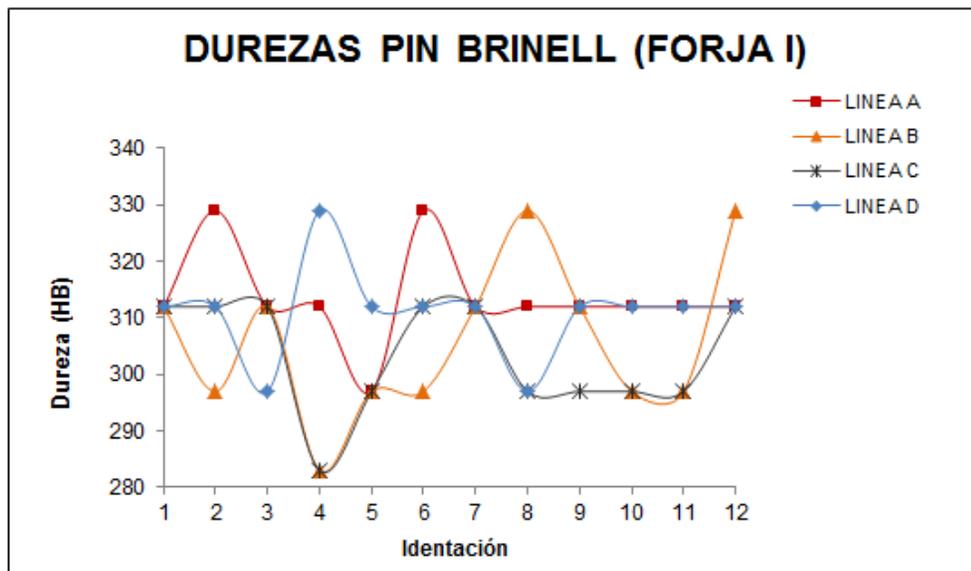


Figura 6.23 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja I).

Dureza Brinell: Las indentaciones se realizaron a 38.10mm (1.5in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 280-307 HB (29.2-32.5HRC).

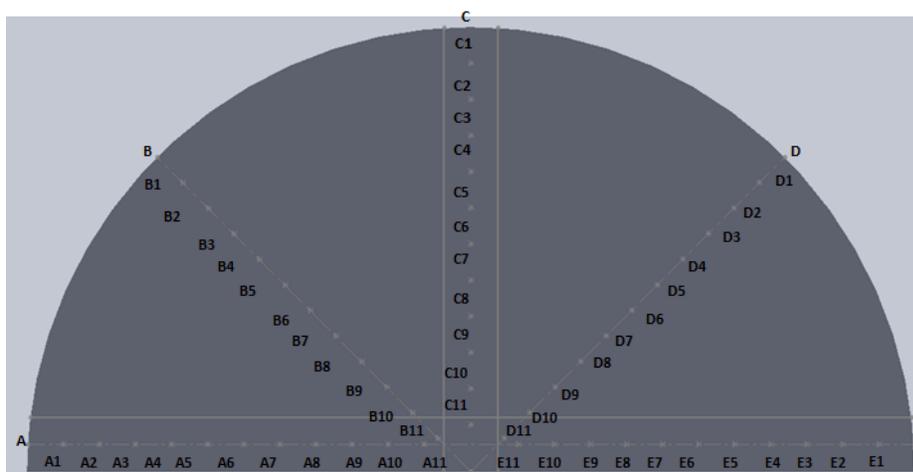


Figura 6.24 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja I.

Tabla 6.10 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja I).

IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL
A1	297	C1	291	E1	280
A2	295	C2	286	E2	283
A3	292	C3	290	E3	287
A4	287	C4	285	E4	285
A5	295	C5	291	E5	296
A6	289	C6	284	E6	280
A7	290	C7	292	E7	282
A8	287	C8	295	E8	287
A9	288	C9	284	E9	291
A10	287	C10	305	E10	295
A11	285	C11	290	E11	282
B1	303	D1	307		
B2	300	D2	306		
B3	299	D3	304		
B4	303	D4	305		
B5	302	D5	300		
B6	297	D6	302		
B7	307	D7	298		
B8	302	D8	292		
B9	295	D9	294		
B10	297	D10	297		
B11	284	D11	281		

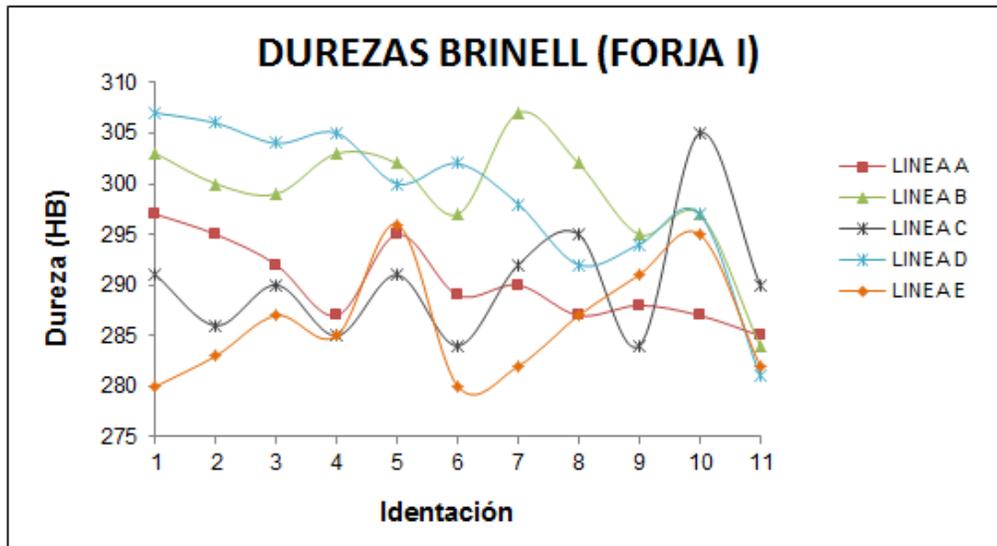


Figura 6.25 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja I).

Laja II (Ensayo Forja II)

Dureza Pin Brinell: Al igual que el ensayo de forja I, las indentaciones se realizaron a 5.80mm (2in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 283-312 HB (29.5-33HRC).

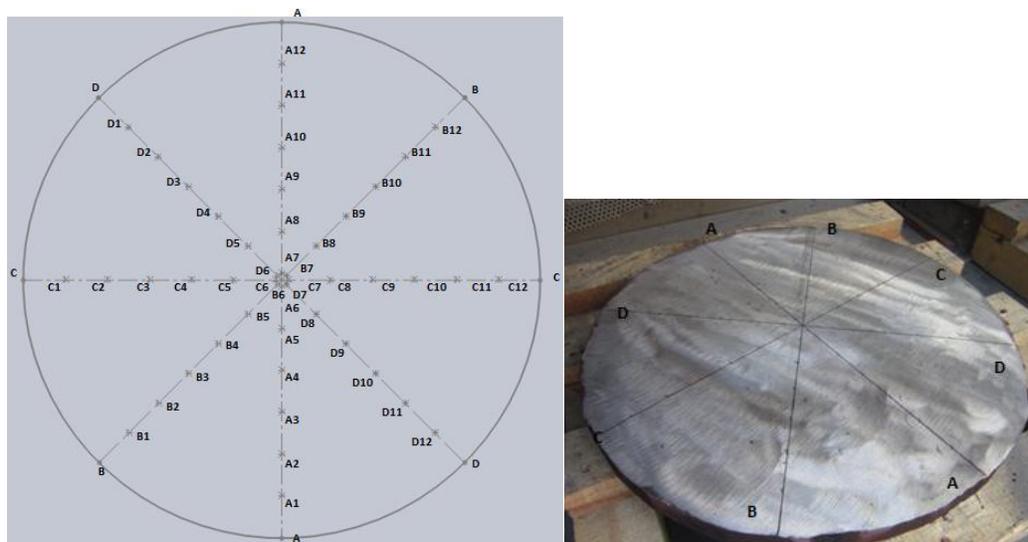


Figura 6.26 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja II.

Tabla 6.11 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja II).

IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL	IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL
A1	262	C1	262
A2	272	C2	272
A3	272	C3	283
A4	262	C4	283
A5	272	C5	272
A6	272	C6	283
A7	262	C7	272
A8	272	C8	282
A9	272	C9	272
A10	262	C10	272
A11	272	C11	262
A12	283	C12	283
B1	272	D1	262
B2	272	D2	272
B3	283	D3	283
B4	272	D4	283
B5	272	D5	272
B6	282	D6	272
B7	262	D7	272
B8	262	D8	283
B9	272	D9	283
B10	262	D10	283
B11	272	D11	272
B12	262	D12	272

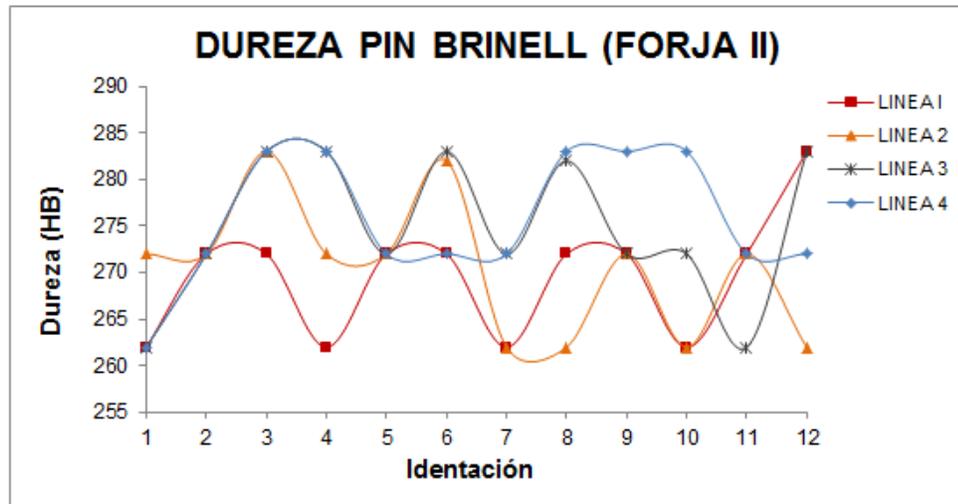


Figura 6.27 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja II).

Dureza Brinell: Las indentaciones se realizaron a 38.10mm (1.5in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 294-312 HB (30.8-33HRC).

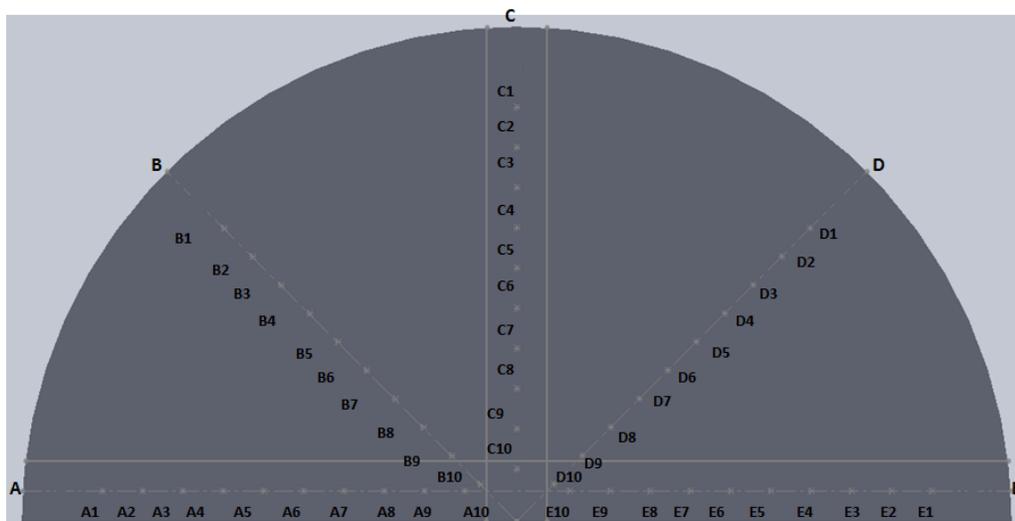


Figura 6.28 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja II.

Tabla 6.12 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja II).

IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL
A1	311	C1	309	E1	305
A2	310	C2	310	E2	311
A3	302	C3	308	E3	309
A4	302	C4	307	E4	304
A5	300	C5	302	E5	302
A6	310	C6	303	E6	309
A7	309	C7	304	E7	305
A8	300	C8	294	E8	305
A9	302	C9	305	E9	302
A10	297	C10	306	E10	308
B1	312	D1	307		
B2	306	D2	308		
B3	307	D3	305		
B4	303	D4	312		
B5	307	D5	311		
B6	309	D6	307		
B7	300	D7	303		
B8	303	D8	304		
B9	306	D9	308		
B10	302	D10	298		

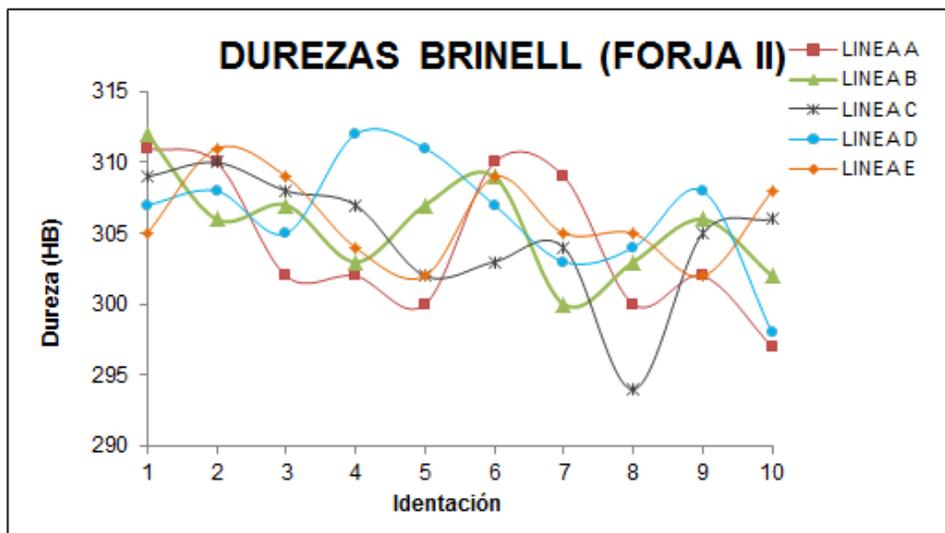


Figura 6.29 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja II).

Laja III (Ensayo Forja III)

Dureza Pin Brinell: Para este ensayo, las indentaciones se realizaron a 5.80mm (2in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 242-283 HB (23.1-29.5HRC).

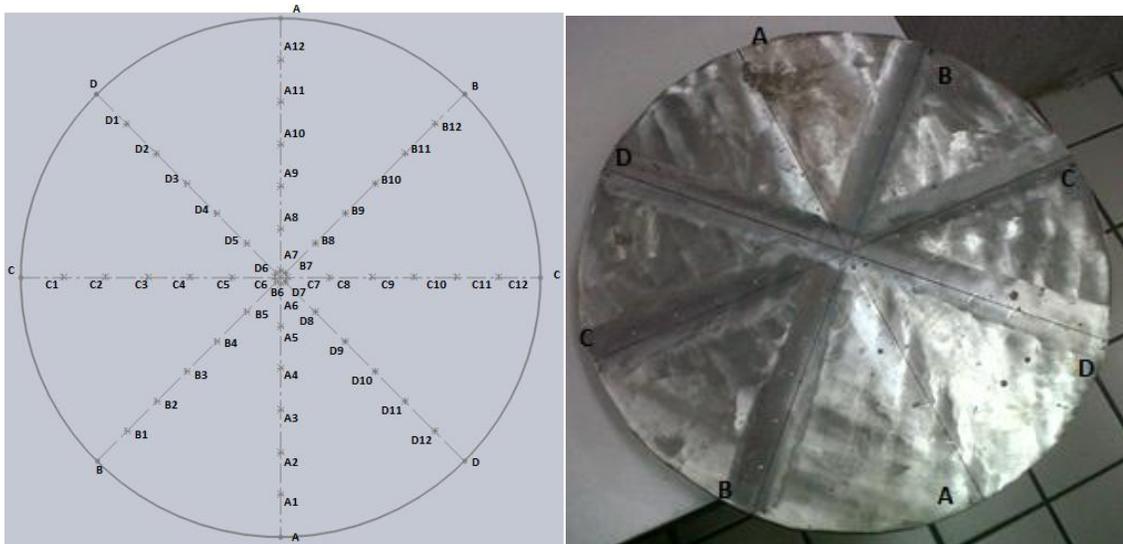


Figura 6.30 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja III.

Tabla 6.13 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja III).

IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL	IDENTACION	DUREZA PIN BRINELL
A1	262	C1	242
A2	272	C2	262
A3	262	C3	262
A4	272	C4	252
A5	262	C5	252
A6	262	C6	262
A7	262	C7	272
A8	262	C8	262
A9	262	C9	262
A10	283	C10	262
A11	272	C11	272
A12	262	C12	262
B1	262	D1	262
B2	283	D2	262
B3	272	D3	252
B4	262	D4	252
B5	262	D5	262
B6	262	D6	242
B7	272	D7	262
B8	262	D8	262
B9	262	D9	262
B10	262	D10	272
B11	262	D11	262
B12	283	D12	272

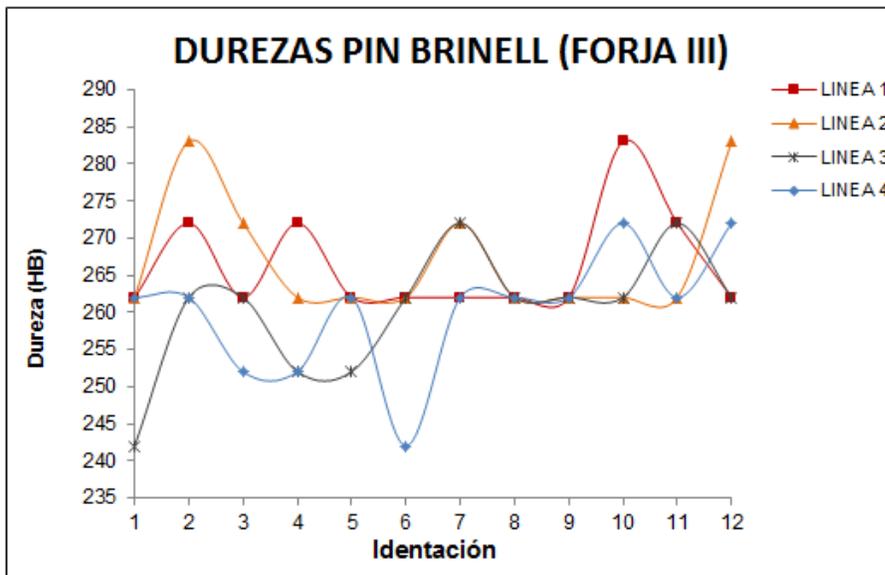


Figura 6.31 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja III).

Dureza Brinell: Las indentaciones se realizaron a 38.10mm (1.5in) de distancia entre cada una de ellas.

Rango de dureza: 268-303 HB (27.3-32HRC).

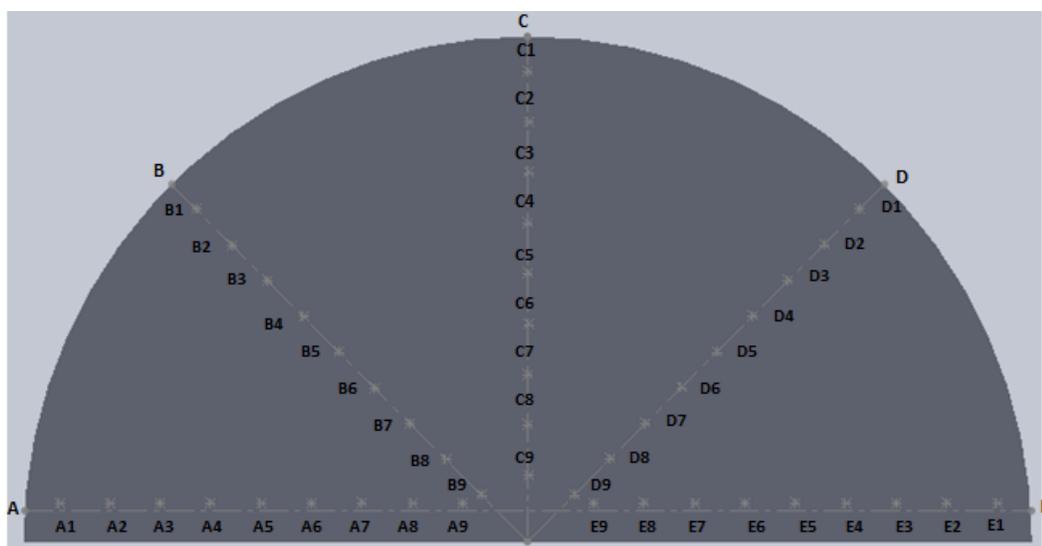


Figura 6.32 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja III.

Tabla 6.14 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja III).

IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL	IDENTACION	DUREZA BRINELL
A1	303	C1	289	E1	281
A2	296	C2	296	E2	290
A3	297	C3	281	E3	311
A4	295	C4	287	E4	293
A5	295	C5	281	E5	280
A6	297	C6	277	E6	298
A7	291	C7	276	E7	280
A8	280	C8	293	E8	276
A9	271	C9	284	E9	293
B1	303	D1	292		
B2	301	D2	288		
B3	298	D3	292		
B4	294	D4	289		
B5	293	D5	290		
B6	289	D6	287		
B7	285	D7	280		
B8	284	D8	281		
B9	268	D9	284		

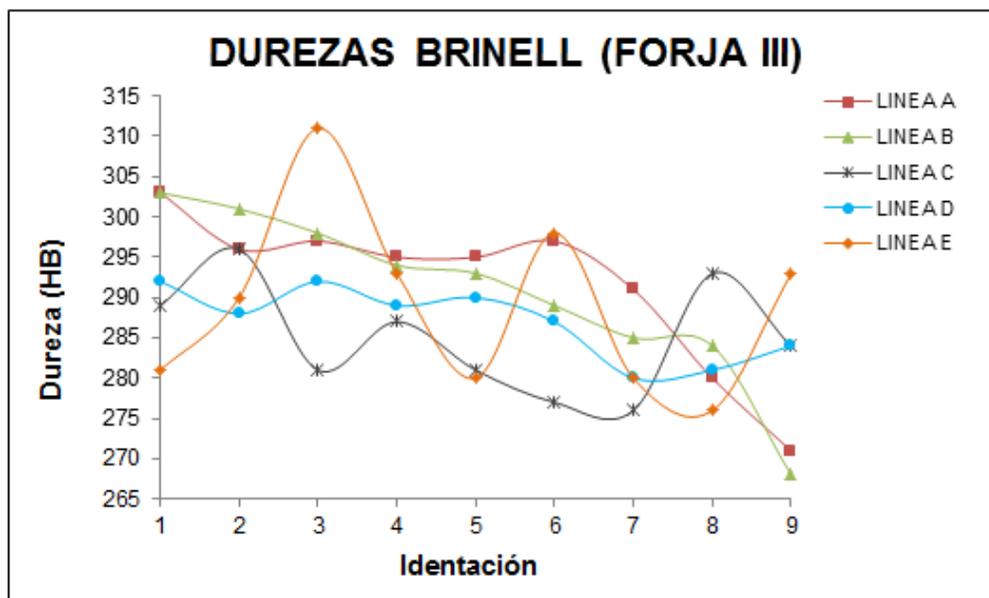


Figura 6.33 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja III).

6.7 Simulación

Para la realización de la simulación se contó con la colaboración del departamento de Simulación del área de Metalurgia, el cual utilizó el paquete comercial FORGE; las geometrías de la pieza de trabajo, herramientas, así como las condiciones del proceso se desglosan a continuación.

Para la elaboración de los herramientas y la pieza de trabajo se utilizó el paquete comercial SolidWorks Premium 2010. (Figura 6.34).

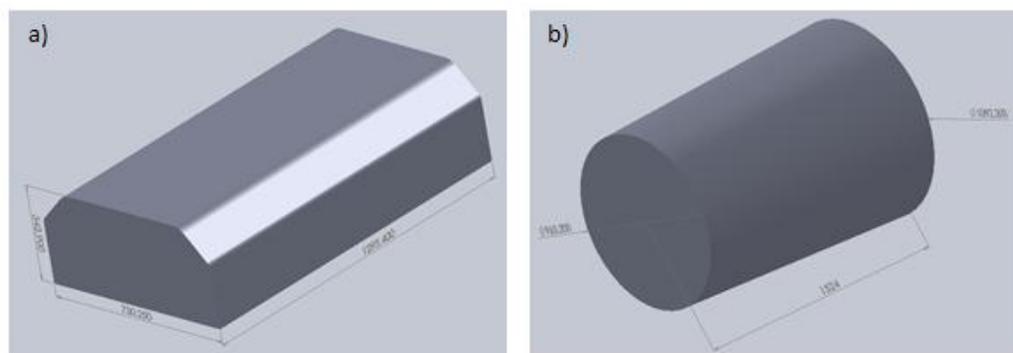


Figura 6.34 a) Geometría de herramientas y b) pieza de trabajo.

La secuencia del proceso de forja (diseño de pasos), ciertas variables del proceso (temperatura de inicio, velocidad del cabezal, entre otras) y las geometrías de los herramientas y la pieza de trabajo fueron facilitadas al departamento de Simulación. Todas las demás variables, así como las condiciones de frontera y todo lo que conlleva a la realización del modelo de simulación del proceso de forja abierta fueron proporcionados y llevados a cabo por el departamento, así como las corridas de los mismos.

Se realizaron dos modelos de simulación, en el que a uno de los modelos se le añadió una posible geometría que representará los defectos internos en la pieza.

Primer modelo: En este modelo no se agregó defecto alguno a la geometría de la pieza de trabajo, Figura 6.35, por lo que se procedió a correr directamente la

simulación. En la Figura 6.36, se muestra el ploteo de deformación local efectiva al término del proceso de forja. (En el Anexo IV, se muestra a detalle la deformación local efectiva durante la secuencia de pasos en el proceso).

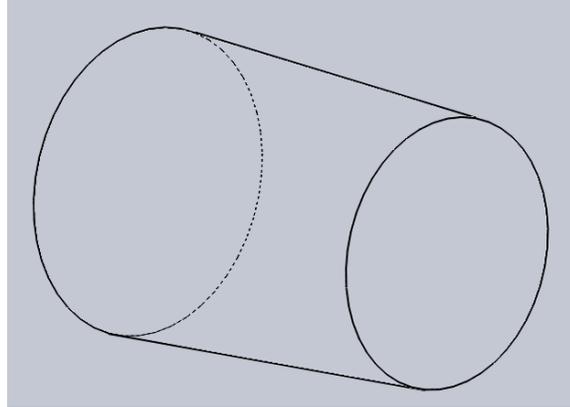


Figura 6.35 Geometría de la pieza de trabajo sin defecto.

La Tabla 6.14 muestra los resultados obtenidos en esta simulación:

Tabla 6.15 Resultados del primer modelo de simulación.

PASO	REDUCCION		DEFORMACION EFECTIVA MINIMA	DEFORMACION EFECTIVA MAXIMA
	mm	In	ϵ_{min}	ϵ_{max}
1	1066-889	42-35	0.047	1.567
2	889-685.8	38-27	0.254	3.900
3	685.8-624.8	27-24.6	0.501	4.166
4	624.8-470	24-18.5	1.460	5.646

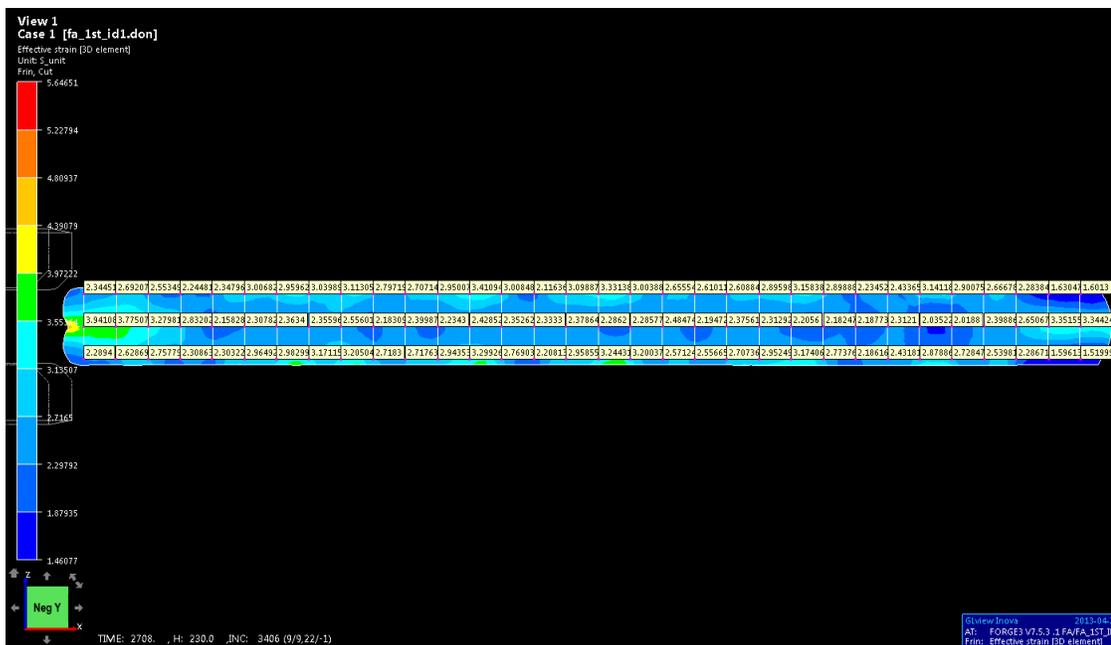


Figura 6.36 Ploteo de deformación local efectiva en la pieza de trabajo sin defecto, al término del proceso de forja.

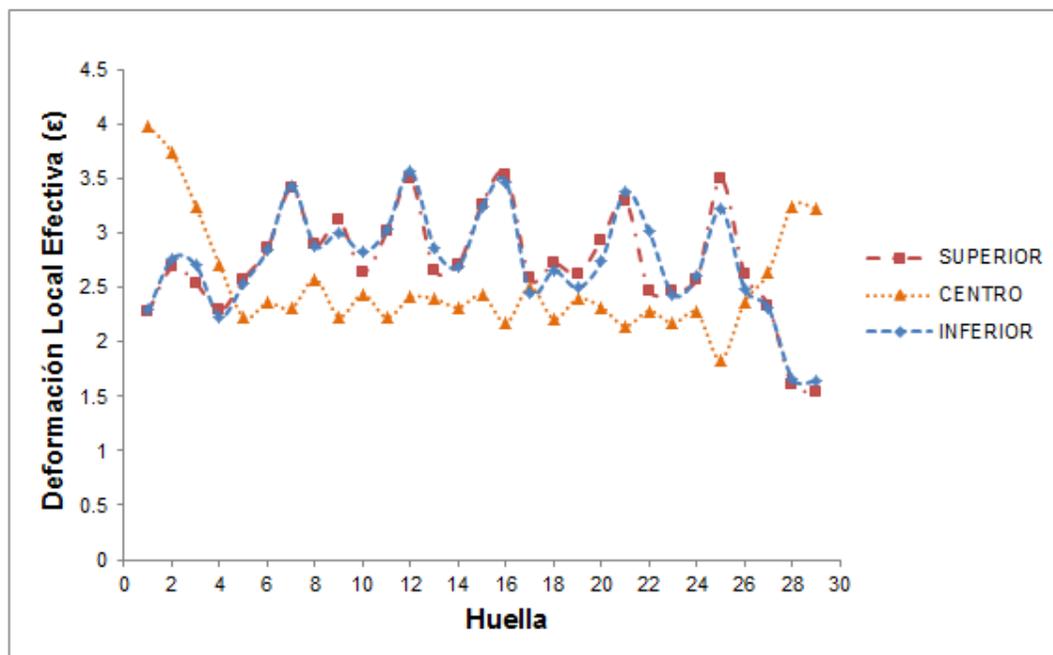


Figura 6.37 Comportamiento de la deformación local efectiva a lo largo de la pieza de trabajo sin defecto. (Valores finales).

Segundo modelo: Se agregó a la geometría de la pieza de trabajo una esfera con un radio de 63.5mm (2.5in), este valor se obtuvo como dato de la prueba de Ultrasonido que se le hizo al material en la selección y preparación del mismo, (Figura 6.38). La esfera se colocó al centro de la pieza y se procedió a correr la simulación. Al igual que en el primer modelo de simulación, en la Figura 6.39, se presenta el ploteo de deformación local efectiva al término del proceso de forja. (Ver Anexo IV).

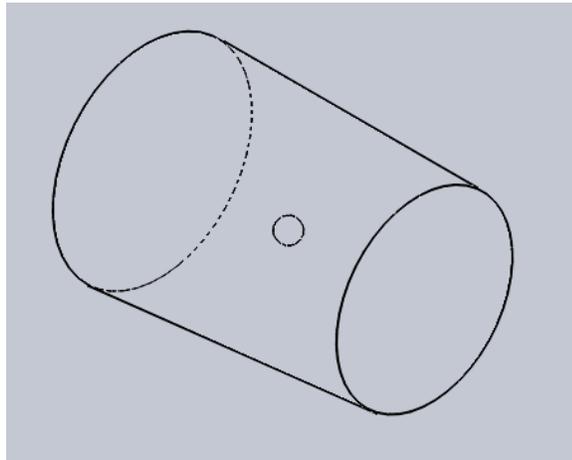


Figura 6.38 Geometría de la pieza de trabajo con una esfera inducida al centro.

Los resultados obtenidos en este modelo de simulación fueron los siguientes, (Tabla 6.16):

Tabla 6.16 Resultados del segundo modelo de simulación.

PASO	REDUCCION		DEFORMACION EFECTIVA MINIMA	DEFORMACION EFECTIVA MAXIMA
	mm	In	ϵ_{min}	ϵ_{max}
1	1066-889	42-35	0.006	0.940
2	889-685.8	35-27	0.111	2.114
3	685.8-624.8	27-24.6	0.273	3.802
4	624.8-470	24-18.5	1.137	4.064

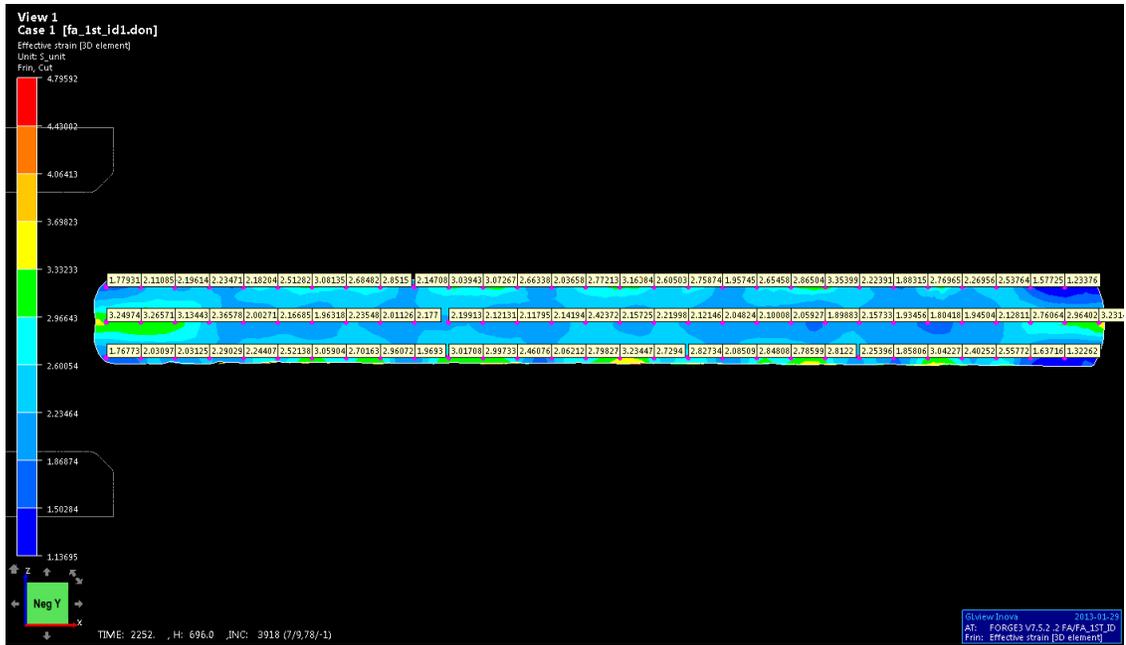


Figura 6.39 Ploteo de deformación local efectiva en la pieza de trabajo con defecto.

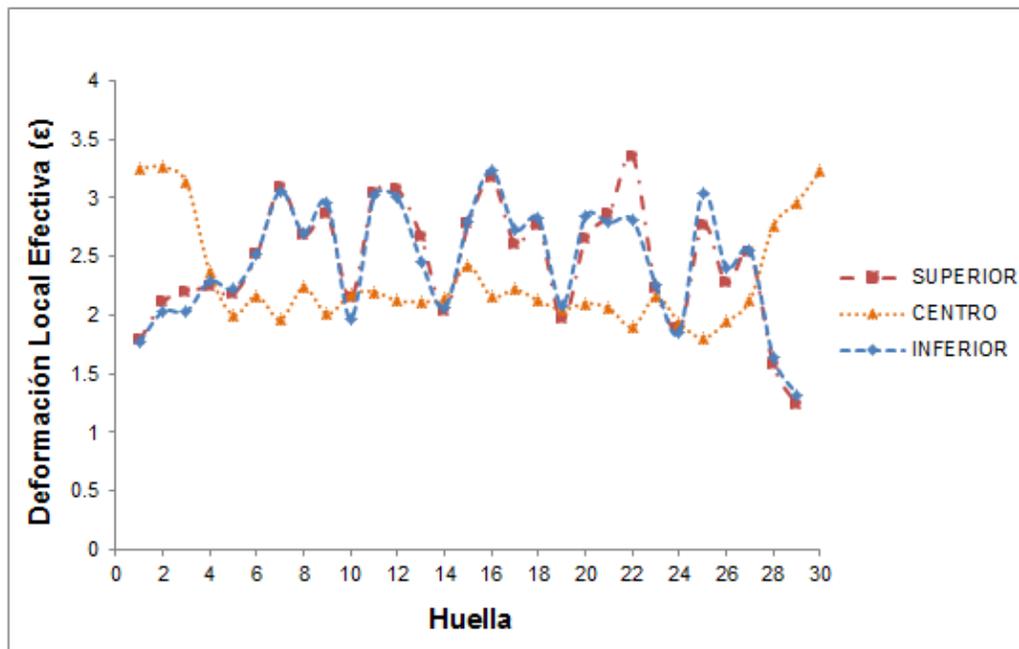


Figura 6.40 Comportamiento de la deformación local efectiva a lo largo de la pieza de trabajo con defecto. (Valores finales).

CAPÍTULO 7

DISCUSIONES

7.1 Evolución de la porosidad en los procesos de forjado

Con ayuda de las Pruebas de Ultrasonido (Sección 6.4, Anexo II) se realizó la comparativa y el análisis del comportamiento de los defectos internos (porosidad) en la pieza de trabajo durante la deformación de cada uno de los procesos de forjado, partiendo de su condición inicial hasta su condición final (después de cada ensayo de forja), además de llevar a cabo la inspección visual de los defectos con las pruebas de líquidos penetrantes (Sección 6.3).

Para poder llevar a cabo una comparativa a detalle de la evolución de la porosidad, la pieza de trabajo se dividió en sesenta secciones (con una longitud de 25.4mm por sección), analizando cada una de ellas al término de cada ensayo de forja. (Figura 7.1)

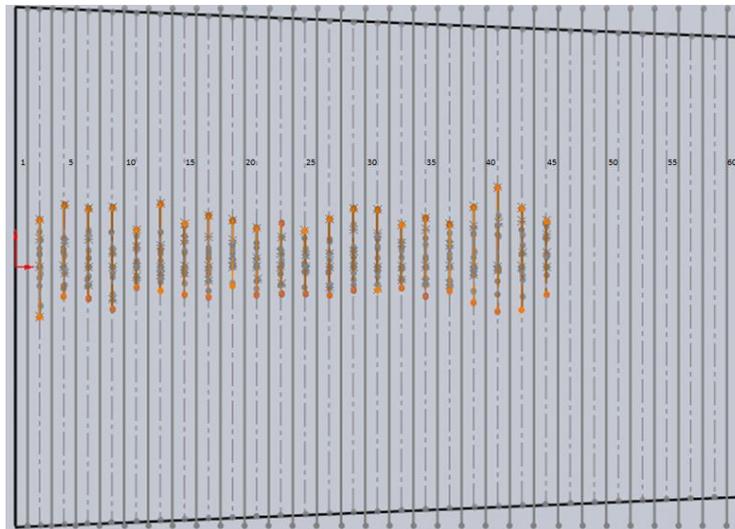


Figura 7.1 Condición inicial de porosidad de la pieza de trabajo dividida en sesenta secciones.

Las formulas (3, 4) y los procedimientos empleados para los cálculos de alargamiento de las secciones en cada uno de los procesos de forja, se realizaron de la misma manera que los efectuados en la Sección 6.2, y Anexo I. Estos valores de alargamiento, así como las dimensiones de la porosidad y los valores de deformación obtenidos en los diferentes ensayos de forja, se muestran a detalle en el Anexo V.

7.1.1 Variabilidad de la porosidad

La Figura 7.2, nos muestra la variación en el tamaño de la porosidad en cada una de las secciones, desde la condición inicial del material, pasando por cada uno de los diferentes procesos de forja durante toda la experimentación. Como se ha mencionado con anterioridad, después del ensayo de forja I, el material se dividió en dos partes: pieza con acabado superficial maquinado (ensayo forja II) y la pieza con acabado superficial forja (ensayo forja III).

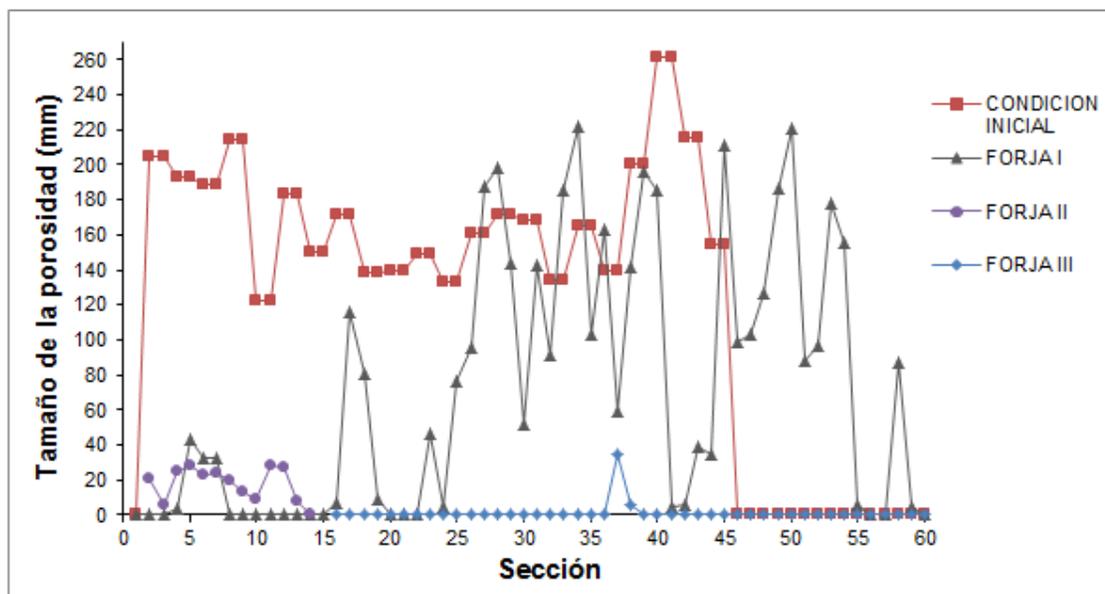


Figura 7.2 Variación en el tamaño de la porosidad durante los procesos de forja.

Se pudo comparar las dimensiones de la porosidad inicial con las obtenidas después del ensayo de forja I, observando que el tamaño en la porosidad disminuyó en las secciones: 4-7, 16-19, 23-26, 29-32, 35, 37-40; mientras que en las secciones 27, 28, 33, 34, 36, 45, 46-55 y 58 se incrementó; además, teniendo un cierre de la porosidad en las secciones 1-3, 8-15, 20-22, 56, 57 y 60.

En el ensayo de forja II, se notó nuevamente una disminución en el tamaño de la porosidad en las secciones 5-7, sin embargo, se presentó un fenómeno relacionado con la deformación, el cual incrementó la porosidad en la pieza de trabajo (secciones 1-3, 8-13).

Al término del ensayo de forja III, el cierre de la porosidad fue casi total (secciones 16-36, 39-60), teniendo una pequeña indicación de porosidad en las secciones 37 y 38, esto a consecuencia de una “zona muerta” en la pieza de trabajo. (Esta zona se explicará a detalle en la sección 7.1.2.2).

7.1.2 Comportamiento de la porosidad durante la deformación en forja

La deformación durante los ensayos fue de vital importancia, debido a que de ella dependió el incremento, la reducción y la consolidación total en la porosidad. Por esta razón, se estimó la deformación real en el material durante los procesos de forja. En la Figura 7.3 se muestra el comportamiento que tuvo la porosidad, en base a la deformación presente en la pieza de trabajo.

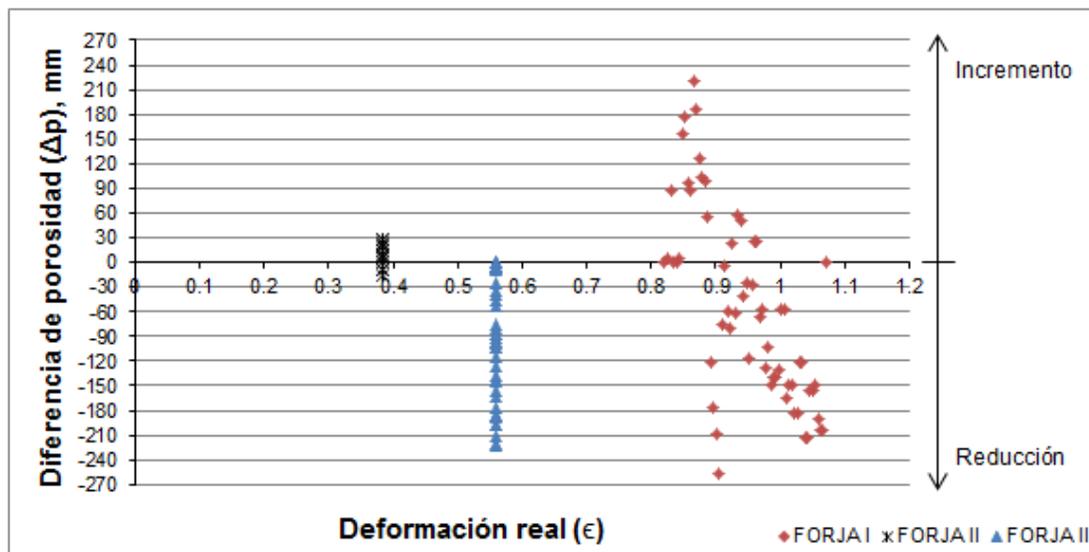


Figura 7.3 Diferencia de la porosidad conforme a la deformación real en el material durante los ensayos de forja.

La gráfica muestra que los valores positivos presentan un incremento en la porosidad, mientras que los valores negativos una reducción. En el primer ensayo de forja se puede apreciar una dispersión de valores de deformación (rango de 0.83-1.07), debido a la geometría cónica de la pieza de trabajo, además de tener los valores más altos de deformación, comparado con los otros dos ensayos.

Para el ensayo de forja II, la deformación real en el material fue de 0.38, la cual se consideró insuficiente para cerrar la porosidad presente como se puede ver en la Figura 7.3. Este valor de deformación fue para toda la pieza de trabajo, ya que para su cálculo se tomaron solo dos diámetros (diámetro para $A_0=600\text{mm}$, $A_f=495\text{mm}$), por lo que la deformación es constante en toda la sección.

Además, se pudo calcular la deformación total en el material (desde la condición inicial hasta su última condición), estimada en un rango de 1.40-1.45.

De acuerdo a la formula (2), se obtiene lo siguiente:

$$\epsilon_T = \epsilon_{FI} + \epsilon_{FII} \quad (5)$$

$$\epsilon_T = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \ln\left(\frac{A_3}{A_4}\right) \quad (6)$$

En el ensayo de forja III, la deformación real en la pieza de trabajo fue de 0.55, este valor de deformación se consideró suficiente para consolidar la porosidad en el material. Al igual que el ensayo anterior, en este proceso de forja el valor de deformación real fue constante en toda la pieza.

La deformación total para este ensayo se estimó en el rango de 1.37-1.56.

Utilizando la formula (5);

$$\epsilon_T = \epsilon_{FI} + \epsilon_{FIII} \quad (7)$$

$$\epsilon_T = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \ln\left(\frac{A_2}{A_3}\right) \quad (8)$$

La Figura 7.4 nos muestra la variación en el tamaño de la porosidad con respecto a la deformación total en los diferentes ensayos de forja, realizando una comparativa desde la condición inicial del material. Se puede observar que el tamaño en la porosidad disminuye en los ensayos de forja I y III; aunque, al término del ensayo de forja I, una parte del material presentó la aparición de porosidad, misma que se ve reflejada en la gráfica con los valores más altos de tamaño en la porosidad para este ensayo.

Para el ensayo de forja II se aprecia una disminución en el tamaño de la porosidad comparado con la condición inicial, sin embargo, realizando la comparativa con el tamaño de la porosidad presente en el proceso anterior (forja I), se aprecia un aumento y el surgimiento de porosidad en el material.

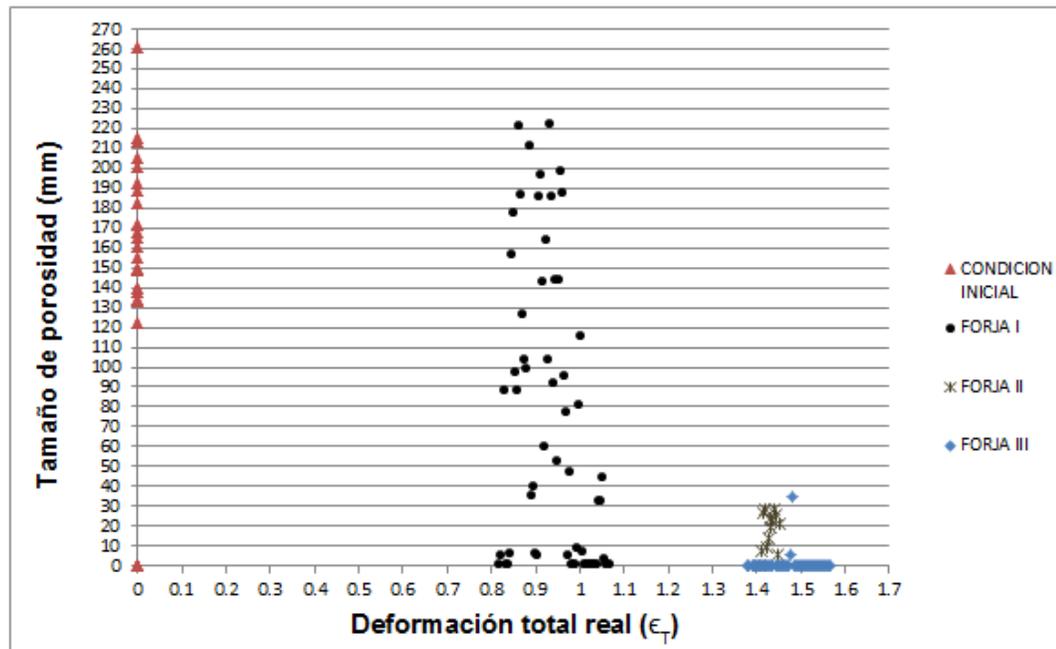


Figura 7.4 Variación en el tamaño de la porosidad con respecto a la deformación total en el material durante los ensayos de forja.

En la Figura 7.5 se presenta la variación de la porosidad con respecto a la deformación total durante los dos ensayos de forja (II y III), desde la condición inicial de la pieza de trabajo hasta su estado final, para ambos casos. Se pudo apreciar que los valores de deformación total entre los dos procesos de forja se encuentran en un rango similar (1.37-1.56), sin embargo, la deformación real en cada uno de los ensayos fue diferente: teniendo un valor de 0.38 para el ensayo de forja II, y un valor de 0.55 para el ensayo de forja III; lo cual fue determinante para poder conseguir una consolidación total de la porosidad. En la gráfica se aprecia una zona donde la diferencia de porosidad durante el ensayo de forja III tiene un valor de cero, esta zona corresponde a las secciones 45-60; sin

embargo, es importante mencionar que en esta zona si hubo variación en la porosidad, la cual se presentó al termino del ensayo de forja I (Figura 7.2). Esta diferencia no es notoria en este gráfico, debido a que la porosidad solo se está comparando entre la condición inicial y la final (forja III), sin tomar en cuenta la condición de forja I.

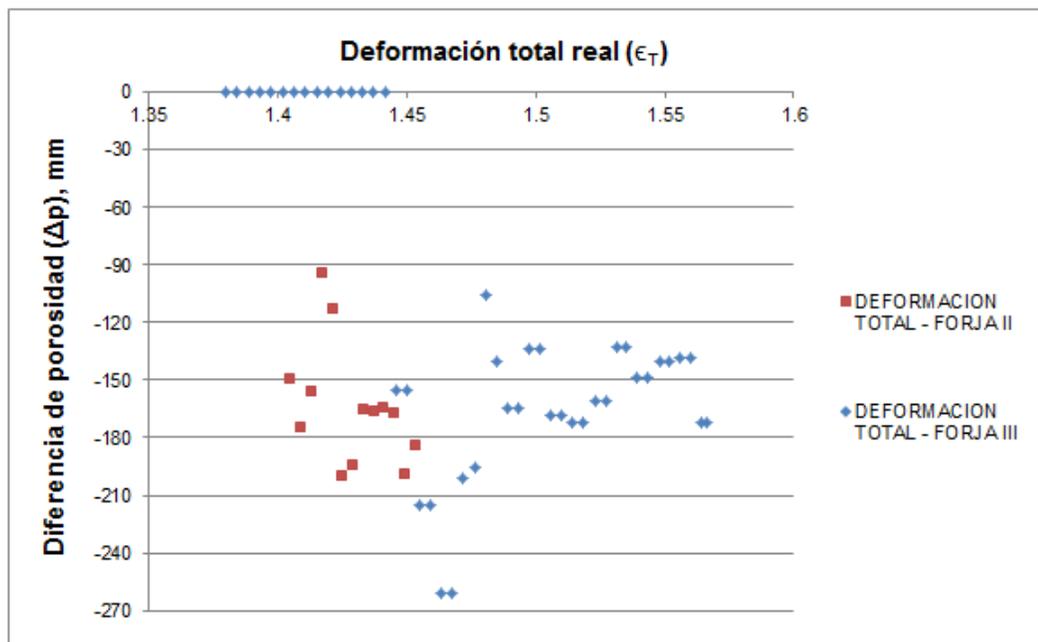
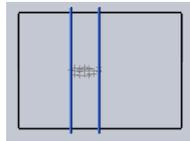


Figura 7.5 Diferencia de la porosidad con respecto a la deformación total en el material durante los ensayos de forja II y III.

Como se mencionó en la sección 7.1.1, durante los ensayos de forja II y III se presentaron dos fenómenos relacionados con la deformación en el material, los cuales fueron fundamentales para el incremento y el cierre de la porosidad durante los procesos de forja.

Antes de someter la pieza de trabajo al ensayo de forja II, el material presentaba solo una zona con concentración de defectos (Figura 7.6 a), posterior al ensayo de forja, los defectos se propagaron a lo largo de la pieza de trabajo, produciendo un agrietamiento central, además de tener un aumento de tamaño en las indicaciones de defectos. (Figura 7.6 b).



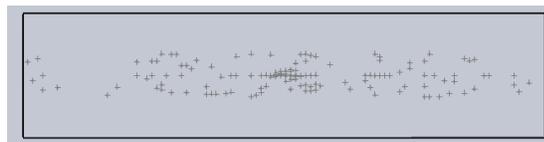
a)



b)

Figura 7.6 a) Concentración de defectos, antes del proceso de forja. b) Indicaciones encontradas en la prueba de ultrasonido al término del ensayo de forja II.

Para el ensayo de forja III, la pieza de trabajo presentaba una gran cantidad de defectos internos (porosidad), Figura 7.7 a). Al término del proceso de forja, apoyados con la prueba de ultrasonido se detectó una pequeña zona (171mm de longitud) con una concentración de mínimas indicaciones de defectos, Figura 7.7 b). En la Figura 7.8 se identifica la zona con indicaciones en el material después del proceso de forja.



a)



b)

Figura 7.7 a) Concentración de defectos, antes del proceso de forja. b) Indicaciones encontradas en la prueba de ultrasonido al término del ensayo de forja III.



Figura 7.8 Inspección e identificación de la zona con defectos, longitud aproximada de 170mm (6.6in)

Dichos defectos se atribuyeron a la presencia de una “zona muerta” durante el proceso de forjado.

Para estos dos casos de estudio, estos fenómenos pudieron ser ocasionados por dos factores: 1) temperatura heterogénea en el material y 2) deformación insuficiente (generación de esfuerzos a tensión).

7.1.2.1 Temperatura

La temperatura en el proceso de forja juega un papel muy importante; si la temperatura dentro de la pieza de trabajo no es homogénea, habrá una variación en la resistencia del material, esto ocasionará una diferencia en la distribución de la deformación, dando origen a esfuerzos a tensión en la parte central de la pieza, pudiendo ocasionar así defectos internos en el material.

Es por esto, que durante el proceso de calentamiento se debe asegurar una “temperatura de empape”, la cual nos permitirá tener una temperatura homogénea en toda la pieza.

Debido al tiempo requerido para forjar estas piezas de gran tamaño, es importante mantener una temperatura adecuada durante el proceso, por lo que en muchas ocasiones es necesario el recalentamiento del material, con el fin de homogenizar nuevamente la temperatura en la pieza de trabajo. [3, 16]

Para el ensayo de forja I, el factor de temperatura se pudo descartar, llevando a cabo la simulación de calentamiento de la pieza de trabajo (Figura 7.9), de acuerdo a la rampa de calentamiento establecida, (Figura 5.10). Al final del proceso de calentamiento, la temperatura en la superficie de la pieza fue de 1277 °C, mientras que el centro de la misma alcanzo una temperatura de 1250 °C, teniendo un gradiente de temperatura de 30 °C aproximadamente.

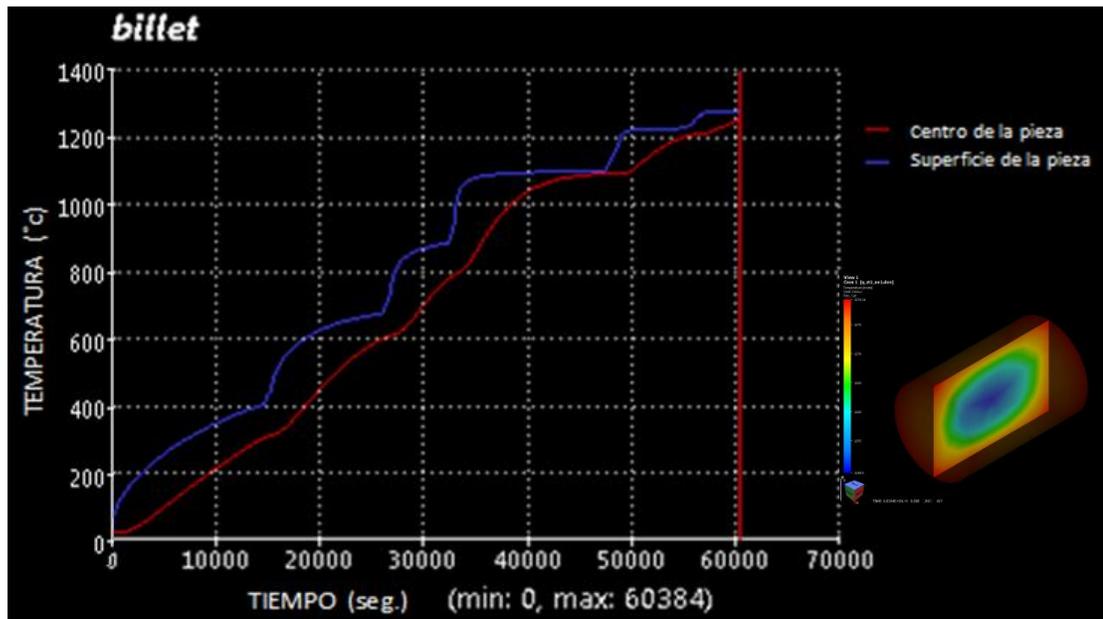


Figura 7.9 Comportamiento de la temperatura durante el calentamiento de la pieza de trabajo. Ensayo de forja II.

La pieza de trabajo se pudo forjar en una sola operación, por lo que no amerito el recalentamiento de la misma.

Como ya se citó con anterioridad, para el Ensayo de Forja III se introdujo una pieza adicional al horno, colocando un termopar al centro de la misma,

monitoreando la temperatura en la parte central, esto con el fin de asegurar que la rampa de calentamiento garantizara una temperatura de “empape”. Además de esto se pudo analizar la diferencia de temperatura entre el centro de la pieza y la temperatura del horno, esta última asemejándola con la de la superficie del material. (Figura 6.6).

La temperatura se empezó a estabilizar al llegar el horno a los 1288 °C (39675 seg.), a partir de este punto, se tuvo un lapso de 1625 segundos con una diferencia de temperatura de 100 a 70 °C entre el centro de la pieza y el horno, para posteriormente proceder a forjar el material.

7.1.2.2 Deformación (generación de esfuerzos a tensión)

Los defectos internos se pueden desarrollar como resultado de los esfuerzos a tensión a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo durante el estiramiento del material en el proceso de forja. Si la deformación durante la compresión del material no es homogénea, esta generará diferentes estados de esfuerzos a tensión en la pieza, lo cual, podría provocar un agrietamiento central en el material. [16]

En el ensayo de forja III, el material sufrió una reducción de 102mm (4in), teniendo una deformación real de 0.38 en el material, por lo que este valor de deformación no fue suficiente para cerrar los defectos internos (porosidad).

Debido a la poca reducción que se le dio al material, la deformación presentó un comportamiento heterogéneo: mayor deformación en la superficie y menor deformación al centro de la pieza. Durante el estiramiento de la pieza de trabajo se produjeron diferentes esfuerzos a tensión, los defectos presentes actuaron como generadores de esfuerzos, propagando así el agrietamiento en la parte central. (Figura 7.10).

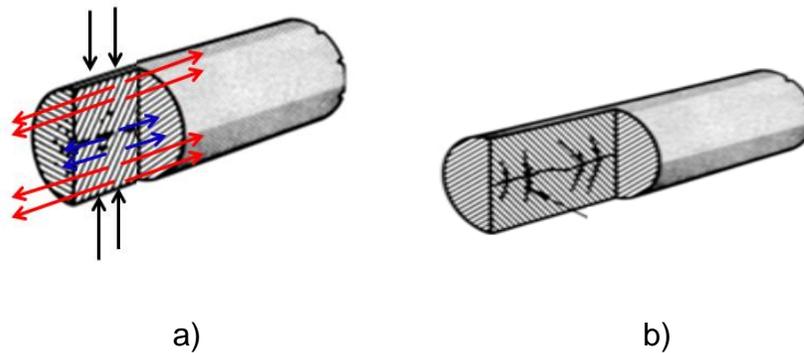
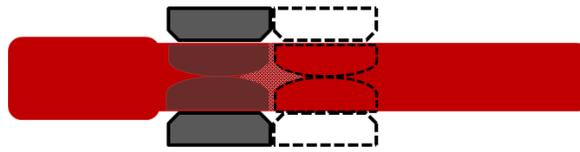


Figura 7.10 a) Esfuerzos generados (tensión y compresión) durante el proceso de forjado. b) Propagación de defectos y agrietamiento central debido a esfuerzos a tensión.

En el ensayo de forja III, la pieza de trabajo se forjó en dos secciones, partiendo muy cerca del centro de la misma hacia uno de los extremos y posteriormente colocando la pieza donde se inició la forja de la primera sección hacia el otro extremo, por lo tanto los herramientas (dados) no cubren el traslape de inicio realizado en la primera sección forjada (relación de avance), generando así una zona con poca deformación (“zona muerta”) en la parte central del material, por lo que dichos defectos no alcanzaron su total consolidación. (Figura 7.11)



a)



b)

Figura 7.11 a) Generación de una zona (“zona muerta”) con poca deformación durante el proceso de forja. b) Zona donde los herramentales no cubren el traslape de inicio dejado en el proceso de forjado de la primera sección.

En este ensayo, la pieza de trabajo sufrió una reducción de 152mm (6in), teniendo una deformación real de 0.55, por lo que podemos considerar que la deformación generada en el material fue suficiente para cerrar por completo los defectos internos (porosidad), tomando en cuenta el diseño de pasos empleado en el proceso de forja.

Durante la revisión del estado del arte, no fue posible encontrar estudios referentes al fenómeno ocurrido en el ensayo de forja II (exclusivo al proceso de forja abierta), por lo que se decidió llevar a cabo una búsqueda de literatura en base al proceso de extrusión, el cual es similar al estudiado en este trabajo de investigación.

Saanouni [40], realiza un estudio en el cual la predicción de los defectos centrales en el proceso de extrusión de una barra de acero comercial se analiza numéricamente mediante el uso de análisis de elementos finitos (FEA), representando el efecto de daño dúctil. Las ecuaciones constitutivas termoplásticas, se formulan en el marco de la termodinámica de los procesos irreversibles junto con la teoría mecánica de daño continuo.

Por lo que propone un criterio de daño dúctil basado en la combinación de la deformación y los esfuerzos a tensión, con el fin de predecir la concurrencia de iniciación de micro-grietas, las cuales producen un desgarramiento en el eje central del material.

Moritoki [41], analiza el agrietamiento central producido durante el proceso de extrusión; utilizando el criterio basado en la inestabilidad plástica para predecir este fenómeno, dicho criterio proporciona el límite de deformación bajo la condición de esfuerzos en un plano. Los valores de deformación y de esfuerzos fueron obtenidos por el método de elementos finitos (FEM).

El autor plantea una medida Y_m , que representa la probabilidad de riesgo de agrietamiento, la cual se calcula utilizando la deformación y los esfuerzos presentes en el eje central de la muestras, por lo tanto, el valor de Y_m se muestra en la variedad de combinaciones del ángulo medio del dado y el área de reducción. Concluyendo que un valor en $Y_m \leq 0$, es suficiente para que ocurra el agrietamiento central.

En este trabajo de investigación, no se pudieron comparar los resultados de estos autores, debido a que no se llevaron a cabo las pruebas y los cálculos correspondientes para poder realizar dicha comparativa.

Respecto al ensayo de forja III, se encontró en la literatura un rango de relación de avance (R_{av}) de 0.50-0.75, este término se refiere al avance con respecto al ancho del dado (herramental) durante el proceso de forja, Figura. 7.12. Este

rango proporciona una adecuada compresión, obteniendo así, una favorable deformación en el material, con el fin de evitar zonas con escasa deformación (“zona muerta”). [42, 43, 44]

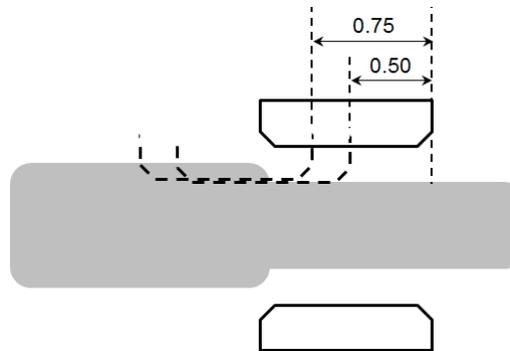


Figura 7.12 Relación de avance con respecto al ancho del dado.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

8.1 Conclusiones

- Se pudo determinar que una deformación real de 1.37, es suficiente para la consolidación de defectos internos (starcrack) en un lingote cónico.
- De lo anterior, se puede considerar que la deformación real mínima con un valor de 0.55, es capaz de cerrar los defectos internos presentes en el material durante la última secuencia de pasos en el proceso de forja, asegurando así una pieza sólida al término del proceso.
- Se pudo justificar que el fenómeno de agrietamiento central, el aumento de tamaño y la generación de defectos internos durante el ensayo de forja II, fue a consecuencia de una deformación heterogénea en el material, la cual derivó diferentes estados de esfuerzos a tensión, provocando así, el fenómeno antes mencionado.
- Se demostró que el remanente de defectos internos al término del ensayo de forja III (“zona muerta”), no alcanzaron su total consolidación debido a una deformación insuficiente en el material; durante el proceso de forja el herramental no cubre el traslape de inicio de la primera operación, generando así una zona con poca deformación.

8.2 Recomendaciones

8.2.1 Recomendaciones a la Industria

- Se determinó que la relación de reducción de área mínima para la consolidación de defectos internos (starcrack) es un lingote cónico es de 4:1.
- Se recomienda una relación de reducción de área mínima de 1.8:1 en la última secuencia de pasos durante la operación de forja, con el fin de asegurar una pieza libre de defectos.
- Una relación de avance con respecto al ancho del dado de 0.50-0.75, proporciona una adecuada compresión, obteniendo así, una óptima deformación en el material, con el fin de evitar zonas con escasa deformación. (“zona muerta”).
- Es recomendable cumplir con el tiempo de permanencia de la pieza de trabajo en el horno, durante el proceso de calentamiento, con el fin de garantizar una temperatura homogénea en todo el material.

8.2.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se recomienda lo siguiente:

- Por medio de métodos de elementos finitos (FEM) realizar pruebas y modelos del proceso de forja abierta, variando los porcentajes de reducción en el proceso, con el fin de evaluar las deformaciones locales en el material. Los resultados arrojados en la simulación serán validados con pruebas de forjabilidad.

- Realizar pruebas para determinar los valores locales de deformación en piezas por técnicas analíticas. Plasmando una cuadrícula en un plano meridiano de la pieza y posteriormente deformando en caliente el material, los valores locales de deformación, pueden calcularse en la cuadrícula distorsionada.
- Llevar a cabo pruebas de deformación en caliente para la medición y análisis del comportamiento de la porosidad en el material, la medición se podrá realizar por el Método de Variación de Densidad.
- Examinar y evaluar mediante estudios numéricos y experimentales, los efectos de la geometría y el ancho del dado, así como los estados de esfuerzos en el material, durante el proceso de forja abierta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] William F. Smith, Fundamentos De la Ciencia e Ingeniería De Materiales, 3era Edición, McGraw-Hill, 1998, ISBN: 0-07-059241-1, 84-481-1429-9.
- [2] Askeland R. Donald, Ciencia e Ingeniería De Los Materiales, 3era Edición, International Thomson Editores, 1998, ISBN: 968-7529-36-9.
- [3] Groover P. Mikell, Fundamentos De Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas, 1era Edición, Prentice Hall, 1997, ISBN: 968-880-846-6.
- [4] Fernández Alanís Josefina del Carmen, Ciencia de los Materiales, Manual de Clase, 1era Edición, Departamento de Tecnología de los Materiales, 1997.
- [5] ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM International, Handbook Committee, 1990.
- [6] Kalpakjian Serope, Schmid Steven R., Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4ta Edición, Pearson Education, ISBN: 970-260-137-1, 2002.
- [7] Choi, S.K., Chun, M.S., Van Tyne, C.J., Moon, Y.H. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis. J. Mater. Process Technol. 172, 88–95, 2006.
- [8] ASM Handbook, Volume 14, Forming and Forging, ASM International, Handbook Committee, 1993.

- [9] Rajput R. K., A Textbook of Manufacturing Technology: Manufacturing Processes, Laxmi Publications, Firewall Media, 2007, ISBN: 813-180-244-2.
- [10] Davey K., Ward M.J., The Practicalities of Ring Rolling Simulation for Profiled Rings, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 125-126, Pages 619-625, 2002.
- [11] Song J., Dowson A., Jacobs M., Brooks J., Beden I., Coupled Thermo-mechanical Finite-Element Modelling of Hot Ring Rolling Process, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 121, Pages 332-340, 2002.
- [12] Wang M., Yang H., Sun Z., Guo L., Ou X., Dynamic Explicit FE Modelling of Hot Ring Rolling Process, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 16, No 6, Pages 1274-1280, 2006.
- [13] Schrader F. George, Elshennawy K. Ahmad, Manufacturing Processes and Materials, 4ta Edition, Prentice Hall, ISBN: 087-263-517-1, 2000.
- [14] He L. Michael, Metallographic Interpretation of Steel Forging Defects, Microscopy Society of America, Scot Forge Company, Spring Grove, Illinois, 2007.
- [15] Altan Taylan, Ngaile Gracious, Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications, ASM International, ISBN: 161-503-094-8, 2005.
- [16] Dieter E. George, Kuhn A. Howard, Semiatin Lee S., Dieter Ellwood George, Handbook of Workability and Process Design, ASM International, ISBN: 161-503-228-2, 2003.
- [17] Dieter Ellwood George, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, higher Education, ISBN: 007-100-406-8, 1988.

- [18] Kaneno Y., Tacasugi T., Effects of Stacking Fault Energy and Ordering Energy on Grain Boundary Character Distribution of recrystallized L12-type Ordered Alloys, *Materials Science and Technology*, Vol. A393, No. 1-2, Pages 71-79, 2005.
- [19] Ahlblom B., Sandstrom R., Hot Workability of Stainless Steels: Influence of Deformation Parameters, Microstructural Components, and Restoration Processes”, *International Metals Reviews*, No. 1, pp. 3-27, 1982
- [20] Callister W., *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Reverte S.A., 2007.
- [21] McQueen H., Dynamic Recovery and Recrystallization, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Vol. 3, Pages 2375-2381, 2003.
- [22] Humphreys F., Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Pergamon Press Oxford, Edition 2, 2004.
- [23] Núñez Carlos, Roca Antoni, Jorba Jordi, *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen 1: Conceptos Fundamentales*, 2da Edición, Edicions Universitat Barcelona, ISBN: 844-753-626-2, 2012.
- [24] Contieri R.J., Zanotello M., Caram R., Recrystallization and Grain Growth in Highly Cold Worked CP-Titanium, *Materials Science and Engineering A* 527 Pages 3994–4000, 2010.
- [25] Ebrahimi R. G., Dynamic Recrystallization Behavior of 13% Cr Martensitic Stainless Steel Under Hot Working Condition, *Journal of Materials Science and Technology*, Volume 28, Pages 467-473, 2012.
- [26] Prasad Y. V. R. K., Ravichandran N., Effect of Stacking Fault Energy On The Dynamic Recrystallization During Hot Working of FCC Metals: a study using processing maps” *Bull. Mater. Sci.*, Vol.14, No. 5, pp. 1241-1248, 1991.

- [27] Gottstein G., Physical Foundations of Materials Science, Springer, 2005.
- [28] Borovikov, A.S., Introduction to Capillary Testing Theory, Borovikov, A.S. (Ed.), Minsk, Nauka i Tekhnika Publishing, 1988.
- [29] Tracy Noel (Tech. Ed.), Moore Patrick (Ed.), Liquid Penetrant Testing, Nondestructive Testing Handbook, Volume 2, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, ISBN 1-57117-028-6, 1999.
- [30] ASTM E1220 – 10, Standard Practice for Visible Penetrant Testing Using Solvent-Removable Process, Vol. 03.03, 2010.
- [31] Cartz Louis, Nondestructive Testing: Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current, ASM Intl; ISBN: 087-170-517-6.
- [32] Krautkramer Josef, Krautkramer Herbert, Ultrasonic Testing of Materials, 4th/revised edition, Springer Verlag, ISBN: 038-751-231-4, 1990.
- [33] Diederichs Rolf, Ginzler Ed., Nondestructive Testing Encyclopedia, UT Formulae, NDT net.
- [34] ASTM A388 / A388M –11, Standard Practice for Ultrasonic Examination of Steel Forgings, 2011.
- [35] Vandervoort George F., Metallography: Principles and Practices, ASM International, ISBN: 161-503-236-3, 1984.
- [36] ASTM E381-01, Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings, 2001.
- [37] Chandler Harry, Hardness Testing, Edition 2, ASM International, ISBN: 161-503-221-5, 1999.
- [38] Nayar Alok, Testing Of Metals, Tata McGraw-Hill Education, ISBN: 007-058-164-9, 2005.

- [39] ASTM E10-07, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, 2007.
- [40] Saanouni K., Numerical Prediction of Discontinuous Central Bursting in Axisymmetric Forward Extrusion by Continuum Damage Mechanics, Computers and Structures, Vol. 82, Pages 2309–2332, 2004.
- [41] Moritoki Hitoshi, Prediction of Central Bursting in Extrusion, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80–81, Pages 579–584, 1998.
- [42] Tkocz M, Kusiak J., Grosman F., Recommendations For Selection of Parameters of Cogging in V-dies, Acta Metallurgica Slovaca, Pages 221-228, 2007.
- [43] Pahnke J. Hans, Fundamentals of Programmed Forging, Committee of the German Iron and Steel Institute, 1982.
- [44] Chun M.S., Van Tyne C.J., Moon Y.H., FEM Analysis of Void Closure Behavior During Open Die Forging of Rectangular Billets, Steel Res. Int. 77, 116–121, 2006.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos básicos del elemento metálico Hierro. [1]	5
Tabla 2.2 Asignación de aceros aleados SEA-AISI [4]	12
Tabla 2.3 Sistema de numeración para identificación de aceros inoxidable. [4]	13
Tabla 2.4 Método de clasificación de aceros de herramienta según AISI. [4]	17
Tabla 2.5 Principales tipos de hierros fundidos y su composición química [4]	20
Tabla 2.6 Propiedades mecánicas, físicas, térmicas del acero 4340. [5]	21
Tabla 2.7 Composición química del acero 4340. [5]	21
Tabla 5.1 Composición química del acero 4340.	63
Tabla 6.1 Comparativa de cálculo de alargamiento en los Ensayos de Forja.	88
Tabla 6.2 Valores de temperatura. Horno vs centro de la pieza.	93
Tabla 6.3 Resultados de Ultrasonido, medición de starcrack.	100
Tabla 6.4 Resultado de cálculos de áreas aproximadas con concentración de defectos.	101
Tabla 6.5 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja I. (Corte acabado superficial maquinado).	102
Tabla 6.6 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja I. (Corte acabado superficial forja).	103
Tabla 6.7 Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja II.	104
Tabla 6.8. Resumen de indicaciones de defectos. Ensayo Forja III.	105

	150
Tabla 6.9 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja I).	110
Tabla 6.10 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja I).	112
Tabla 6.11 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja II).	114
Tabla 6.12 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja II).	116
Tabla 6.13 Resultados de dureza Pin Brinell (Ensayo Forja III).	118
Tabla 6.14 Resultados de dureza Brinell (Ensayo Forja III).	120
Tabla 6.15 Resultados del primer modelo de simulación.	122
Tabla 6.16 Resultados del segundo modelo de simulación.	124

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Diagrama de flujo que muestra las etapas de los procesos principales que tienen lugar en la conversión de las materias primas en las formas de los productos principales de acero, sin incluir productos recubiertos. [2] 7
- Figura 2.2 Resistencia a la tensión y dureza como una función del contenido de carbono en los aceros al carbono (laminados en caliente) [3] 9
- Figura 3.1 Diferentes operaciones de forjado en dado abierto: a) con dados planos, operación por secciones y b) operación con dados con forma (cóncavos). [3] 25
- Figura 3.2 Deformación homogénea de una pieza cilíndrica entre dos dados planos: a) inicio del proceso con la pieza de trabajo a su altura (h_0) y diámetro (D_0) originales, b) deformación uniforme del material sin fricción, c) deformación con fricción, obsérvese el abarrilamiento de la pieza causado por las fuerzas de fricción en las interfaces entre la pieza de trabajo y la matriz. [3]. 26
- Figura 3.3 Secuencia de pasos de forja de una barra cuadrada a una barra cilíndrica. [7] 27
- Figura 3.4 Secuencia en el forjado con dado impresor: 1) Posición inicial antes del contacto con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial, 3) cierre final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre los dados. [3] 29

- Figura 3.5 Secciones transversales de a) forjado convencional y b) forjado de precisión. Las líneas punteadas en a) indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos hay excedente de rebaba. [3] 31
- Figura 3.6 Forjado sin rebaba: 1) Posición inicial antes del contacto con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial, 3) final de la carrera del punzón y cierre del dado. [3] 32
- Figura 3.7 Operación de acuñado: 1) Inicio del ciclo, 2) tiempo de compresión y 3) remoción de la parte terminada [3] 32
- Figura 3.8 Operación de recalado para formar la cabeza de un perno u otro artículo similar. El ciclo consiste en: 1) El alambre se alimenta hasta el tope, 2) los dados mordaza se cierran apretando el material y el tope se retira, 3) el punzón avanza y 4) toca fondo para formar la cabeza. [3] 33
- Figura 3.9 Forjado con rodillos. [3] 34
- Figura 3.10 En el forjado orbital, el dado superior (inclinado con respecto al dado inferior), gira alrededor de la pieza de trabajo. El ángulo de inclinación y la forma del dado superior dan como resultado una pequeña área de contacto (huella) entre la pieza y el dado superior momento. Debido a que la huella es aproximadamente un quinto de la superficie de la pieza, el proceso de forjado orbital requiere una fuerza considerablemente menor que la forja convencional. [8] 35
- Figura 3.11 Proceso de estampado para reducir material en barra sólida; los dados giran alrededor de la pieza de trabajo. [3] 36

Figura 3.12 En el forjado radial la pieza de trabajo gira mientras los dados permanecen en posición fija. [8]	37
Figura 3.13 Ilustración esquemática del proceso de rolado de anillos. [10]	38
Figura 3.14 Componentes de un martinete de caída libre. [13]	40
Figura 3.15 Componentes de un martinete accionado por energía. [13]	41
Figura 3.16 Componentes principales de un martinete de contragolpe vertical con un sistema de accionamiento hidráulico de vapor.	42
Figura 3.17 Componentes básicos de un martinete de gran potencia [8]	42
Figura 3.18 Prensa mecánica excéntrica [13]	44
Figura 3.19 Prensa hidráulica típica de cuatro columnas. [13]	45
Figura 3.20 Tipos comunes de prensas de tornillo. a) Unidad con fricción y b) Unidad de accionamiento eléctrico directo. [8]	46
Figura 3.21 Fabricación de diferentes tipos de dados para operaciones específicas. a) Dados para estampado, producción de barras redondas y hexagonales. b) Dados para producción de piezas con formas complejas. [8]	47
Figura 3.22 Defectos típicos posteriores al proceso de forja. [16]	51
Figura 4.1 Durante el trabajo en caliente, los granos alargados anisotrópicos se recristalizan de inmediato. Si la temperatura de trabajo en caliente se controla adecuadamente, el tamaño final de grano puede resultar muy fino. [2]	54
Figura 4.2 Diferentes etapas de la recuperación dinámica para un material deformado. A) generación de dislocaciones. B) formación de celdas, c) aniquilación de dislocaciones dentro de las celdas, d) formación de subgranos, e) crecimiento [22]	57

Figura 5.1 Pasos a seguir durante la experimentación	62
Figura 5.2 Corte de acero 4340	62
Figura 5.3 Aplicación de soldadura en la cara de la pieza.	63
Figura 5.4 Prensa hidráulica “4B”.	64
Figura 5.5 Rampa de calentamiento para el Ensayo de Forja I.	65
Figura 5.6 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja I.	66
Figura 5.7 Pieza de trabajo forjada, 3,746mm (147.5in) de longitud.	67
Figura 5.8 a) Corte de 1,072mm de longitud, con marca para despunte, acabado superficial forja. b) Mismo corte con acabado superficial maquinado.	67
Figura 5.9 Corte con acabado superficial-forja, 2,672mm de longitud.	68
Figura 5.10 Rampa de calentamiento programada en horno 23 para el corte maquinado.	68
Figura 5.11 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja II.	69
Figura 5.12 Curva de calentamiento programada en el horno 22, para el corte con acabado superficial forja.	70
Figura 5.13 Diseño de pasos empleado en el Ensayo de Forja III.	71
Figura 5.14 Procedimiento para realizar la prueba de líquidos penetrantes. [29]	73
Figura 5.15 Aplicación típica del método de Ultrasonido.	75
Figura 5.16 Transductor utilizado en la inspección de ultrasonido, tipo normal.	78
Figura 5.17 Bloques de referencia básicos ASME. [33]	80
Figura 5.18 Equipo portátil utilizado para la inspección de ultrasonido.	81
Figura 5.19 a) Laja para prueba de dureza Brinell, y b) Laja para prueba Pin Brinell, obtenidas al término del ensayo de forja III.	84

Figura 5.20 a) Durómetro de base, y b) Escáner óptico para medición de indentaciones.	85
Figura 5.21 a) Probador de dureza Pin Brinell, y b) Lente ocular para medición de indentaciones.	86
Figura 6.1 Volumen de un cono truncado.	88
Figura 6.2 Volumen de un cilindro.	89
Figura 6.3 a) Deformación del material durante el Ensayo de Forja I, b) Material forjado, dimensiones finales: 3,746mm de longitud y 624mm de diámetro.	90
Figura 6.4 a) Inicio del Ensayo de Forja II, b) Dimensiones finales del material forjado: 1,219mm de longitud y 495mm de diámetro.	91
Figura 6.5 a) Ensayo de Forja III, b) Dimensiones finales de la pieza: 4,3118mm de longitud, 472mm de diámetro.	92
Figura 6.6 Comportamiento de la temperatura (centro de la pieza vs horno) durante el proceso de calentamiento.	92
Figura 6.7 Resumen de Ensayos de Forja.	94
Figura 6.8 Prueba de líquidos penetrantes en la selección y preparación del material, se puede observar y dimensionar defectos internos (starcrack) en una de las caras del lingote.	95
Figura 6.9 a), b) y c) Zona con defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes.	96
Figura 6.10 a), b) y c) Zona con defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes en la laja con espesor de 38mm (1.5in).	97
Figura 6.11 a) y b) Área con concentración de defectos detectados por la prueba de líquidos penetrantes en la laja con espesor de 114mm (4.5in).	97

Figura 6.12 Prueba de líquidos penetrantes en la laja (38mm de espesor) obtenida después del ensayo de Forja III, no se observó ninguna discontinuidad en la superficie de la laja.	98
Figura 6.13 En las imágenes a) y b) se muestra el inicio, centro y final de los defectos internos (starcrack) presentes en la pieza.	99
Figura 6.14 a) Vista isométrica y b) Vista frontal, Áreas aproximadas con concentración de defectos.	101
Figura 6.15 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja. I	103
Figura 6.16 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja II.	104
Figura 6.17 Dibujo tridimensional de las indicaciones de defectos encontrados en el Ensayo Forja III.	105
Figura 6.18 Resumen de pruebas de Ultrasonido.	106
Figura 6.19 Ensayo de macroataque en laja de Forja I.	107
Figura 6.20 Ensayo de macroataque en laja de Forja II.	108
Figura 6.21 Ensayo de macroataque en laja de Forja III.	108
Figura 6.22 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja I.	109
Figura 6.23 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja I).	111
Figura 6.24 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja I.	111
Figura 6.25 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja I).	113
Figura 6.26 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja II.	113
Figura 6.27 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja II).	115

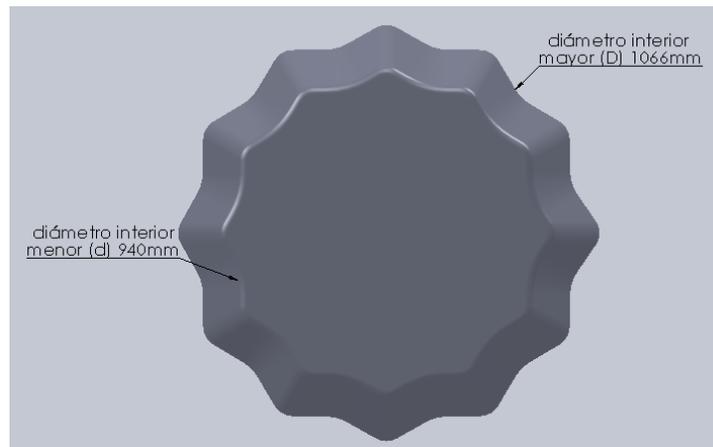
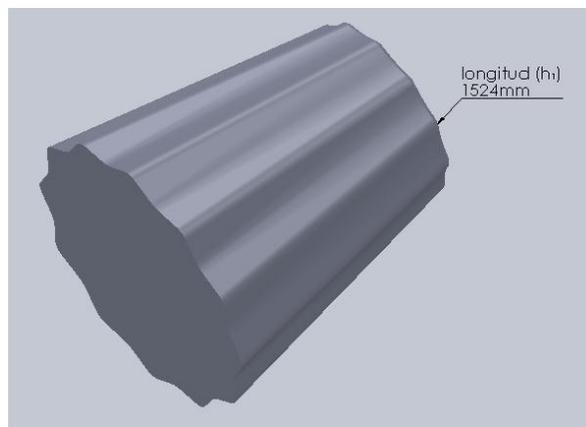
Figura 6.28 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja II.	115
Figura 6.29 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja II).	116
Figura 6.30 Identificación para indentaciones Pin Brinell. Laja de Ensayo Forja III	117
Figura 6.31 Valores de durezas Pin Brinell (Ensayo Forja III).	119
Figura 6.32 Identificación para indentaciones Brinell. Laja de Ensayo Forja III.	119
Figura 6.33 Valores de durezas Brinell (Ensayo Forja III).	120
Figura 6.34 a) Geometría de herramientas y b) pieza de trabajo.	121
Figura 6.35 Geometría de la pieza de trabajo sin defecto.	122
Figura 6.36 Ploteo de deformación local efectiva en la pieza de trabajo sin defecto, al término del proceso de forja.	123
Figura 6.37 Comportamiento de la deformación local efectiva a lo largo de la pieza de trabajo sin defecto. (Valores finales).	123
Figura 6.38 Geometría de la pieza de trabajo con una esfera inducida al centro.	124
Figura 6.39 Ploteo de deformación local efectiva en la pieza de trabajo con defecto.	125
Figura 6.40 Comportamiento de la deformación local efectiva a lo largo de la pieza de trabajo con defecto. (Valores finales).	125
Figura 7.1 Condición inicial de porosidad de la pieza de trabajo dividida en sesenta secciones.	126
Figura 7.2 Variación en el tamaño de la porosidad durante los procesos de forja.	127
Figura 7.3 Diferencia de la porosidad conforme a la deformación real en el material durante los ensayos de forja.	129

Figura 7.4 Variación en el tamaño de la porosidad con respecto a la deformación total en el material durante los ensayos de forja.	131
Figura 7.5 Diferencia de la porosidad con respecto a la deformación total en el material durante los ensayos de forja II y III.	132
Figura 7.6 a) Concentración de defectos, antes del proceso de forja. b) Indicaciones encontradas en la prueba de ultrasonido al término del ensayo de forja II.	133
Figura 7.7 a) Concentración de defectos, antes del proceso de forja. b) Indicaciones encontradas en la prueba de ultrasonido al término del ensayo de forja III.	133
Figura 7.8 Inspección e identificación de la zona con defectos, longitud aproximada de 170mm (6.6in)	134
Figura 7.9 Comportamiento de la temperatura durante el calentamiento de la pieza de trabajo. Ensayo de forja II.	135
Figura 7.10 a) Esfuerzos generados (tensión y compresión) durante el proceso de forjado. b) Propagación de defectos y agrietamiento central debido a esfuerzos a tensión.	137
Figura 7.11 a) Generación de una zona (“zona muerta”) con poca deformación durante el proceso de forja. b) Zona donde los herramientas no cubren el traslape de inicio dejado en el proceso de forjado de la primera sección.	138
Figura 7.12 Relación de avance con respecto al ancho del dado.	140

ANEXO I: ENSAYOS DE FORJA

ENSAYO FORJA I

Como se mencionó en el Capítulo 6, para el cálculo de alargamiento se trabajó con los diámetro internos, por lo que los datos que se utilizaron en el cálculo fue un diámetro mayor (D) de 1,066mm (42in) y un diámetro menor (d) de 940mm (37in), con una longitud (h_1) de 1,524mm (60in).

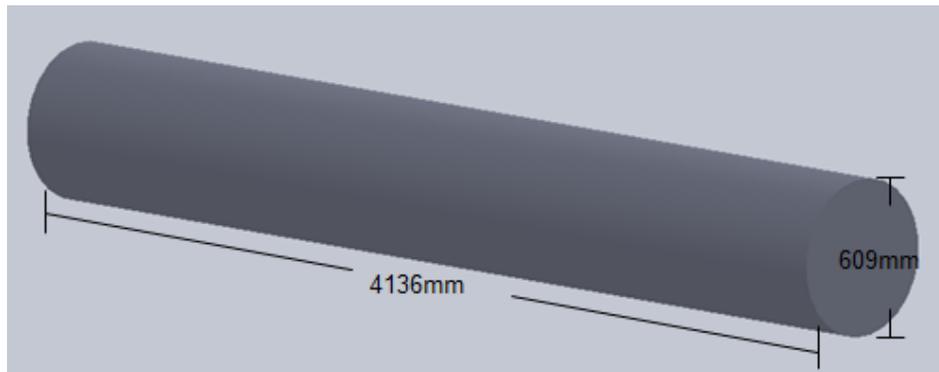


Geometría y dimensiones utilizadas para el cálculo de alargamiento en el Ensayo de Forja I.

$$V = \frac{\pi}{12} h_1 (D^2 + Dd + d^2) \quad V = \frac{\pi}{4} d_2^2 h_2$$

$$V = \frac{\pi}{12} (1524mm) [(1066mm)^2 + (1066mm)(940mm) + (940mm)^2] = 1.205 \times 10^9 mm^3$$

$$h_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2} = \frac{4(1.205 \times 10^9 mm^3)}{\pi (609mm)^2} = 4,136mm$$



Calculo teórico de las dimensiones adquiridas por la pieza después del Ensayo de Forja I.

ENSAYO FORJA II

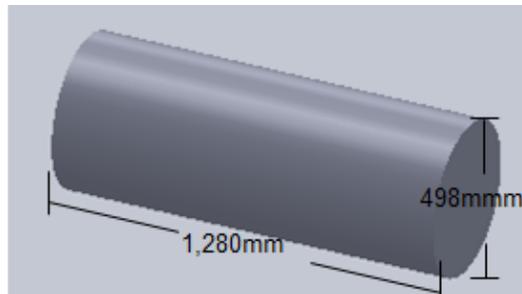
Para este ensayo de forja se utilizó el corte con acabado superficial-maquinado. Para el cálculo de alargamiento se usaron los siguientes datos: diámetro 1 (d_1) de 600mm (23.6in) y una longitud (h_1) de 882mm (34.7in), diámetro 2 (d_2) de 498mm (19.6in).

$$V = \frac{\pi}{4} d_1^2 h_1$$

$$V = \frac{\pi}{4} (600mm)^2(882mm) = 2.49 \times 10^8 mm^3$$

$$h_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2}$$

$$h_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2} = \frac{4(2.49 \times 10^8 mm^3)}{\pi(497.8mm)^2} = 1,280mm$$



Calculo teórico de las dimensiones adquiridas por la pieza después del Ensayo de Forja II.

ENSAYO FORJA III

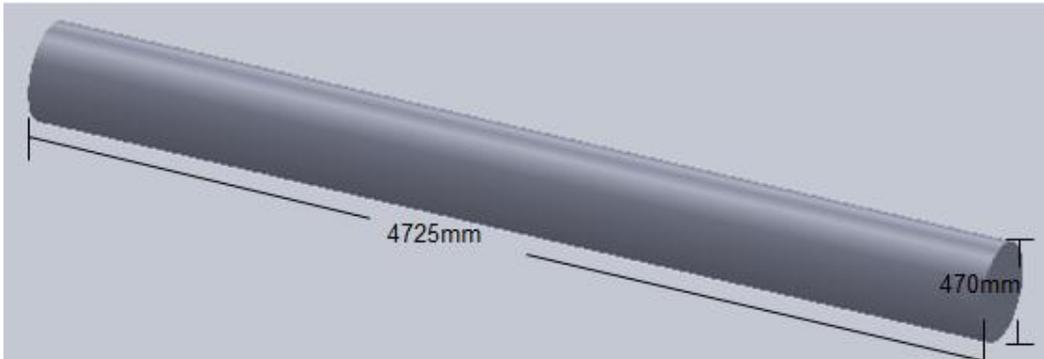
En este último ensayo se utilizó el corte con acabo superficial-forja. Se utilizaron los siguientes datos para el cálculo teórico de alargamiento del material: diámetro 1 (d_1) de 624mm (24.6in) y una longitud (h_1) de 2,672mm (105.2in), diámetro 2 (d_2) de 472mm (18.5in).

$$V = \frac{\pi}{4} d_1^2 h_1$$

$$V = \frac{\pi}{4} (624mm)^2(2672mm) = 8.19 \times 10^8 mm^3$$

$$h_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2}$$

$$h_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2} = \frac{4(8.19 \times 10^8 \text{ mm}^3)}{\pi(472 \text{ mm})^2} = \mathbf{4,725 \text{ mm}}$$



Calculo teórico de las dimensiones adquiridas por la pieza después del Ensayo de Forja III.

ANEXO II PRUEBAS DE ULTRASONIDO

Selección y Preparación del Material

Longitud del corte (mm)	Línea 1			Línea 2		
	Inicio (mm)	Centro (mm)	Final (mm)	Inicio (mm)	Centro (mm)	Final (mm)
50.8	463.042	504.19	576.326	444.5	485.394	649.478
101.6	456.438	488.188	605.536	411.48	491.998	554.99
152.4	440.944	512.826	596.392	417.068	482.346	578.104
203.2	481.076	518.922	617.728	412.496	508.508	607.06
254	442.976	483.362	578.612	456.946	494.284	556.768
304.8	485.14	514.096	578.104	400.812	487.934	550.926
355.6	456.438	488.188	552.704	439.928	475.488	544.322
406.4	480.822	486.156	543.56	420.878	466.344	558.292
457.2	459.74	487.426	583.438	429.006	470.662	519.684
508	466.852	518.16	607.314	442.976	507.238	550.926
558.8	391.922	516.636	575.564	459.994	494.03	559.054
609.6	465.328	488.95	534.416	444.246	495.554	526.796
660.4	442.214	497.332	569.976	417.322	500.634	561.848
711.2	456.692	503.174	569.976	393.7	438.15	483.87
762	431.292	451.866	521.208	393.954	443.738	561.848
812.8	452.628	463.296	551.942	423.164	462.28	539.242
863.6	424.18	479.298	543.814	407.162	431.292	543.814
914.4	431.8	447.802	572.77	418.084	462.28	544.576
965.2	404.368	477.52	515.874	379.73	419.354	523.494
1016	381	411.988	545.592	336.296	411.48	510.54
1066.8	390.398	435.864	539.496	377.698	405.384	472.694
1117.6	371.094	414.782	523.494	402.844	432.054	470.662
1168.4	0	0	0	0	0	0
1219.2	0	0	0	0	0	0
1270	0	0	0	0	0	0
1320.8	0	0	0	0	0	0
1371.6	0	0	0	0	0	0
1422.4	0	0	0	0	0	0
1473.2	0	0	0	0	0	0

Longitud del corte (mm)	Línea 3			Línea 4		
	Inicio (mm)	Centro (mm)	Final (mm)	Inicio (mm)	Centro (mm)	Final (mm)
50.8	438.404	507.238	563.118	440.182	485.648	586.232
101.6	456.946	507.238	597.408	434.594	526.288	588.518
152.4	430.276	513.08	574.294	439.928	770.89	624.078
203.2	433.324	498.094	567.69	425.958	492.506	607.822
254	469.392	516.128	580.136	422.148	493.776	601.472
304.8	428.752	494.284	604.012	459.74	502.412	565.404
355.6	409.194	483.616	579.374	417.576	518.922	567.182
406.4	472.186	503.936	599.948	415.29	481.584	570.992
457.2	462.788	501.396	598.17	463.804	494.284	570.23
508	408.432	498.348	567.182	456.692	492.252	602.234
558.8	468.122	502.412	543.814	425.45	461.01	572.77
609.6	433.832	509.27	600.456	436.372	493.014	563.118
660.4	437.134	476.25	535.432	424.434	476.758	589.026
711.2	388.874	487.172	553.72	411.48	466.09	561.086
762	423.926	458.978	543.306	388.112	454.914	565.912
812.8	435.102	483.87	547.624	411.48	450.85	527.812
863.6	443.23	486.664	512.318	399.796	465.074	523.24
914.4	406.146	469.392	507.746	408.94	439.674	538.226
965.2	387.35	408.432	525.78	381.508	430.784	550.418
1016	350.774	406.908	508.254	425.45	453.898	617.474
1066.8	405.892	462.28	526.796	364.744	429.006	570.23
1117.6	379.222	413.258	464.82	378.206	447.802	562.61
1168.4	0	0	0	0	0	0
1219.2	0	0	0	0	0	0
1270	0	0	0	0	0	0
1320.8	0	0	0	0	0	0
1371.6	0	0	0	0	0	0
1422.4	0	0	0	0	0	0
1473.2	0	0	0	0	0	0

Longitud del corte (mm)	Línea 5		
	Inicio (mm)	Centro (mm)	Final (mm)
50.8	428.498	488.442	599.186
101.6	453.644	487.934	509.016
152.4	445.77	512.572	588.772
203.2	412.242	520.192	580.136
254	474.726	503.174	547.37
304.8	496.316	525.526	583.946
355.6	449.072	516.89	625.094
406.4	439.674	506.476	560.832
457.2	479.298	528.32	579.12
508	459.994	532.638	596.9
558.8	442.976	504.698	563.88
609.6	459.994	501.904	562.102
660.4	434.086	514.35	601.726
711.2	447.294	498.348	569.214
762	463.296	500.38	541.528
812.8	449.326	505.714	569.722
863.6	423.164	456.438	537.972
914.4	436.88	468.376	534.67
965.2	399.796	433.832	551.434
1016	371.602	422.656	491.744
1066.8	373.634	414.02	491.236
1117.6	417.576	528.32	628.904
1168.4	0	0	0
1219.2	0	0	0
1270	0	0	0
1320.8	0	0	0
1371.6	0	0	0
1422.4	0	0	0
1473.2	0	0	0

Prueba de ultrasonido: Ensayo de Forja I

Línea 1 (Corte acabado superficial maquinado)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
228.6	+6	2.24234375	15.796296	287.02
254	+5	2.38125	17.813976	305.308
304.8	+5	2.38125	17.813976	291.846

Línea 2 (Corte acabado superficial maquinado)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
254	+11	1.68671875	8.9379153	300.482
279.4	+6	2.24234375	15.796296	299.466
304.8	+6	2.24234375	15.796296	298.958
355.6	+12	1.5875	7.9173229	289.814

Línea 3 (Corte acabado superficial maquinado)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
228.6	+6	2.24234375	15.7962962	310.134
254	+6	2.24234375	15.7962962	273.304
279.4	+6	2.24234375	15.7962962	275.082
304.8	+26	0.71238872	1.59435474	274.828
330.2	+6	2.24234375	15.7962962	285.242
355.6	+5	2.38125	17.8139765	302.26

Línea 4 (Corte acabado superficial maquinado)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
203.2	+12	1.5875	7.91732288	316.738
228.6	+12	1.5875	7.91732288	297.942
254	+12	1.5875	7.91732288	300.482
279.4	+12	1.5875	7.91732288	296.672
304.8	+6	2.24234375	15.7962962	300.99
355.6	+4	2.52015625	19.9528907	294.132

Línea 5 (Corte acabado superficial maquinado)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
228.6	+11	1.68671875	8.93791528	301.244
254	+6	2.24234375	15.7962962	273.05
279.4	+11	1.68671875	8.93791528	296.418
304.8	+6	2.24234375	15.7962962	281.432
330.2	+11	1.68671875	8.93791528	288.544
355.6	+11	1.68671875	8.93791528	289.56

Línea 1 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
431.8	+5	2.38125	17.81397647	211.9376
635	0	3.175	31.6692915	296.672
685.8	+3	2.67890625	22.54581397	248.9708
711.2	+6	2.24234375	15.79629622	203.5302
762	+4	2.52015625	19.95289073	226.06
838.2	+3	2.67890625	22.54581397	226.06
939.8	+6	2.24234375	15.79629622	217.8812
965.2	+6	2.24234375	15.79629622	217.8812
990.6	+6	2.24234375	15.79629622	217.8812
1016	0	3.175	31.6692915	320.548
1041.4	+6	2.24234375	15.79629622	221.9706
1066.8	+2	2.83765625	25.29708367	228.219
1168.4	+6	2.24234375	15.79629622	203.2
1193.8	+6	2.24234375	15.79629622	213.6648
1219.2	+4	2.52015625	19.95289073	223.9772
1244.6	+2	2.83765625	25.29708367	257.81
1270	0	3.175	31.6692915	304.8
1295.4	-3	3.7703125	44.65864934	315.722
1320.8	-5	4.22671875	56.12515961	322.072
1346.2	-4	3.98859375	49.97933773	283.972

Línea 1 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
1371.6	-10	5.65546875	100.481961	242.2652
1397	-6	4.4846875	63.18518487	293.878
1422.4	-3	3.7703125	44.65864934	259.588
1447.8	-3	3.7703125	44.65864934	232.918
1473.2	-1	3.35359375	35.33229041	234.823
1498.6	0	3.175	31.6692915	238.0996
1676.4	+6	2.24234375	15.79629622	243.2304
1803.4	+4	2.52015625	19.95289073	214.2744
1828.8	+3	2.67890625	22.54581397	235.966
1930.4	+6	2.24234375	15.79629622	229.3112
1955.8	+4	2.52015625	19.95289073	255.778
2057.4	+6	2.24234375	15.79629622	203.2
2082.8	+6	2.24234375	15.79629622	204.2922
2133.6	+6	2.24234375	15.79629622	203.3778
2159	-2	3.571875	40.08144705	285.496
2184.4	+2	2.83765625	25.29708367	219.7862
2209.8	+1	2.99640625	28.20669982	282.702
2260.6	+6	2.24234375	15.79629622	223.6978
2514.6	+4	2.52015625	19.95289073	263.144
2540	+6	2.24234375	15.79629622	229.743

Línea 2 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Distancia Diámetro interior Centro (mm)
101.6	+2	2.83765625	25.2970837	206.0194
177.8	+5	2.38125	17.8139765	226.0092
482.6	+4	2.52015625	19.9528907	229.2604
711.2	+5	2.38125	17.8139765	246.1768
939.8	+5	2.38125	17.8139765	231.2924
1219.2	+5	2.38125	17.8139765	220.4974
1295.4	-2	3.571875	40.0814471	332.486
1320.8	-5	4.22671875	56.1251596	323.85
1346.2	-2	3.571875	40.0814471	324.866
1371.6	-5	4.22671875	56.1251596	284.48
1397	-3	3.7703125	44.6586493	305.054
1422.4	-2	3.571875	40.0814471	306.832
1447.8	-2	3.571875	40.0814471	244.221
1473.2	-3	3.7703125	44.6586493	246.507
1498.6	+1	2.99640625	28.2066998	249.2756
1524	+3	2.67890625	22.545814	236.7534
1651	+2	2.83765625	25.2970837	262.382
1752.6	+2	2.83765625	25.2970837	272.542
1778	+4	2.52015625	19.9528907	225.5012
2057.4	+6	2.24234375	15.7962962	234.569
2311.4	+5	2.38125	17.8139765	215.265
2590.8	+4	2.52015625	19.9528907	259.08

Línea 3 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
101.6	+4	2.52015625	19.9528907	264.668
584.2	+6	2.24234375	15.7962962	257.048
660.4	+6	2.24234375	15.7962962	252.73
736.6	+4	2.52015625	19.9528907	235.3818
812.8	+3	2.67890625	22.545814	271.272
1066.8	+6	2.24234375	15.7962962	224.536
1092.2	+3	2.67890625	22.545814	244.2464
1219.2	+4	2.52015625	19.9528907	202.7682
1244.6	+2	2.83765625	25.2970837	281.94
1295.4	0	3.175	31.6692915	332.232
1320.8	-6	4.4846875	63.1851849	338.328
1346.2	-12	6.35	126.677166	320.294
1371.6	-12	6.35	126.677166	320.802
1397	-12	6.35	126.677166	319.532
1422.4	-3	3.7703125	44.6586493	253.2634
1447.8	+3	2.67890625	22.545814	255.016
1473.2	+2	2.83765625	25.2970837	259.588
1498.6	+3	2.67890625	22.545814	262.128
1752.6	-2	3.571875	40.0814471	273.05
1778	+2	2.83765625	25.2970837	278.638
1803.4	+4	2.52015625	19.9528907	252.1458
1828.8	+3	2.67890625	22.545814	229.3874
1854.2	+1	2.99640625	28.2066998	277.622
1879.6	+3	2.67890625	22.545814	271.272
2057.4	+6	2.24234375	15.7962962	228.6
2108.2	+4	2.52015625	19.9528907	247.2436
2209.8	+6	2.24234375	15.7962962	228.6
2362.2	+2	2.83765625	25.2970837	246.7102
2387.6	+6	2.24234375	15.7962962	229.108
2514.6	+4	2.52015625	19.9528907	254.762

Línea 4 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
584.2	+5	2.38125	17.8139765	213.5124
863.6	+1	2.99640625	28.2066998	266.446
1168.4	-2	3.571875	40.0814471	315.214
1270	0	3.175	31.6692915	314.706
1295.4	-6	4.4846875	63.1851849	320.04
1320.8	-7	4.7625	71.2559059	305.054
1346.2	-1	3.35359375	35.3322904	283.21
1371.6	+2	2.83765625	25.2970837	284.734
1397	0	3.175	31.6692915	281.94
1422.4	-1	3.35359375	35.3322904	311.15
1447.8	+3	2.67890625	22.545814	208.9912
1574.8	+4	2.52015625	19.9528907	233.9594
1930.4	+2	2.83765625	25.2970837	291.338
1981.2	+2	2.83765625	25.2970837	261.366

Línea 5 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
25.4	-1	3.35359375	35.33229041	243.5606
50.8	0	3.175	31.6692915	337.566
76.2	+6	2.24234375	15.79629622	227.5332
660.4	+7	2.12328125	14.16334837	240.9444
685.8	+7	2.12328125	14.16334837	240.9444
711.2	+7	2.12328125	14.16334837	240.9444
762	+6	2.24234375	15.79629622	204.724
787.4	+6	2.24234375	15.79629622	204.724
812.8	+7	2.12328125	14.16334837	262.636
838.2	+7	2.12328125	14.16334837	262.636
889	+5	2.38125	17.81397647	234.8992
965.2	+4	2.52015625	19.95289073	268.478
1092.2	+6	2.24234375	15.79629622	216.0778
1168.4	+6	2.24234375	15.79629622	203.2
1270	+5	2.38125	17.81397647	208.788

Línea 5 (Corte acabado superficial forja)				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm²)	Profundidad al centro (mm)
1320.8	+2	2.83765625	25.29708367	292.354
1346.2	-6	4.4846875	63.18518487	289.56
1371.6	-6	4.4846875	63.18518487	281.686
1397	-6	4.4846875	63.18518487	250.5456
1422.4	-3	3.7703125	44.65864934	206.3242
1447.8	-5	4.22671875	56.12515961	203.2
1473.2	-2	3.571875	40.08144705	211.5058
1498.6	-2	3.571875	40.08144705	216.0778
1803.4	+6	2.24234375	15.79629622	203.7334
1828.8	+6	2.24234375	15.79629622	218.5162
1981.2	+3	2.67890625	22.54581397	247.9294
2057.4	+5	2.38125	17.81397647	239.8522
2082.8	+4	2.52015625	19.95289073	204.0128
2260.6	+3	2.67890625	22.54581397	228.6
2286	+6	2.24234375	15.79629622	238.2774
2311.4	+6	2.24234375	15.79629622	231.4448

Prueba de ultrasonido: Ensayo de Forja II

Línea 1				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
50.8		0	0	0
101.6		0	0	0
152.4		0	0	0
203.2		0	0	0
254	-1	3.35359375	35.3322904	261.62
304.8	-2	3.571875	40.0814471	258.064
355.6	-10	5.65546875	100.481961	238.3028
406.4	-1	3.35359375	35.3322904	234.3404
457.2	-6	4.4846875	63.1851849	243.3828
508	+3	2.67890625	22.545814	234.3404
558.8	-4	3.98859375	49.9793377	234.4166
609.6	-5	4.22671875	56.1251596	249.5804
660.4	+3	2.67890625	22.545814	252.5268
711.2		0	0	0
762		0	0	0
812.8	0	3.175	31.6692915	241.935
863.6		0	0	0
914.4	+3	2.67890625	22.545814	240.1062
965.2	+4	2.52015625	19.9528907	223.7994
1016		0	0	0
1066.8		0	0	0
1117.6	+2	2.83765625	25.2970837	252.222
1168.4	+1	2.99640625	28.2066998	235.9406

Línea 2				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
50.8	+4	2.52015625	18.5639572	230.0732
101.6		0	0	0
152.4	+3	2.67890625	20.9763854	244.1956
203.2	+1	2.99640625	26.2432134	255.27
254	+2	2.83765625	23.5361375	241.5286
304.8	-1	3.35359375	32.8727871	239.014
355.6	-1	3.35359375	32.8727871	238.2266
406.4	-1	3.35359375	32.8727871	232.41
457.2	-1	3.35359375	32.8727871	233.426
508	0	3.175	29.4647719	239.141
558.8	-1	3.35359375	32.8727871	248.2088
609.6	0	3.175	29.4647719	246.634
660.4	+3	2.67890625	20.9763854	248.539
711.2	+1	2.99640625	26.2432134	248.7676
762	-1	3.35359375	32.8727871	247.2944
812.8	+1	2.99640625	26.2432134	252.095
863.6	-1	3.35359375	32.8727871	244.221
914.4	0	3.175	29.4647719	239.6744
965.2	+3	2.67890625	20.9763854	217.0684
1016	+2	2.83765625	23.5361375	237.109
1066.8	-1	3.35359375	32.8727871	235.8644
1117.6	0	3.175	29.4647719	243.2304
1168.4	0	3.175	29.4647719	247.396

Línea 3				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
50.8	-1	3.35359375	35.33229041	219.837
101.6		0	0	0
152.4	+6	2.24234375	15.79629622	244.2464
203.2	+1	2.99640625	28.20669982	263.144
254	+2	2.83765625	25.29708367	248.6152
304.8	+3	2.67890625	22.54581397	225.8568
355.6	-9	5.318125	88.85215596	234.7214
406.4	-9	5.318125	88.85215596	234.4928
457.2	-9	5.318125	88.85215596	234.7468
508	-2	3.571875	40.08144705	235.2294
558.8	0	3.175	31.6692915	252.222
609.6	+3	2.67890625	22.54581397	235.2294
660.4	+4	2.52015625	19.95289073	245.3894
711.2	+3	2.67890625	22.54581397	240.3856
762	+2	2.83765625	25.29708367	248.8438
812.8		0	0	0
863.6		0	0	0
914.4	+3	2.67890625	22.54581397	264.16
965.2		0	0	0
1016		0	0	0
1066.8	+7	2.12328125	14.16334837	236.982
1117.6	+1	2.99640625	28.20669982	259.08
1168.4	+4	2.52015625	19.95289073	222.25

Prueba de ultrasonido: Ensayo de Forja III

Línea 1				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
2108.2	+4	2.52015625	19.9528907	240.3094
2133.6	+9	1.895078125	11.2824944	240.7412

Línea 2				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Area (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
2108.2	+4	2.52015625	19.95289073	263.3
2133.6	+9	1.89507813	11.28249437	255.01

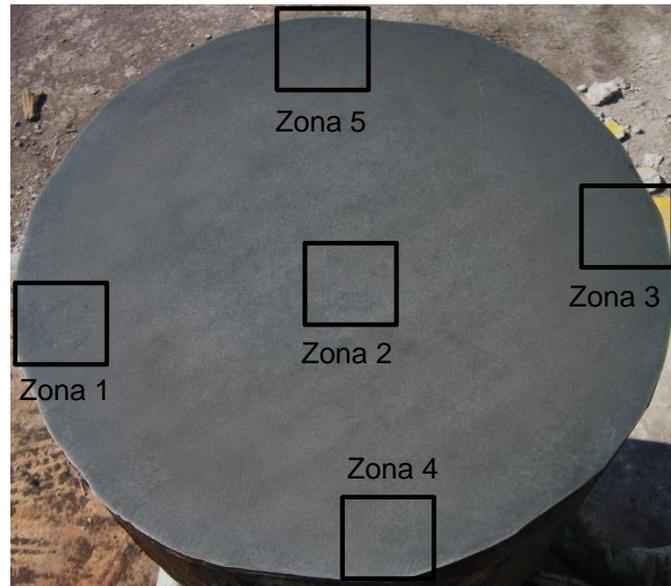
Línea 3				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
2133.6	+7	2.12328125	14.16334837	250.72

Línea 4				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
2133.6	+9	1.8950781	11.282494	255.01
2159	+3	2.6789063	22.545814	237.54

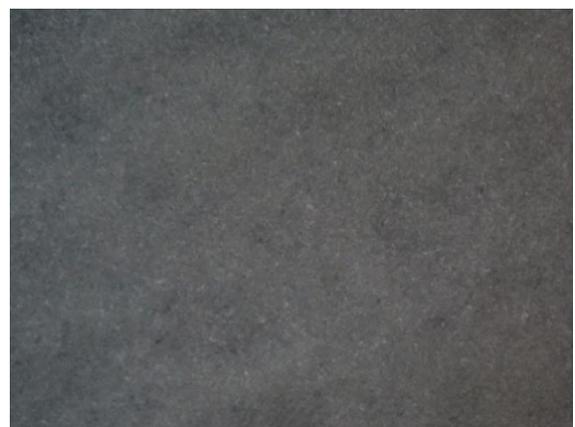
Línea 5				
Longitud del corte (mm)	Tamaño (dB)	Radio (mm)	Área (mm ²)	Profundidad al centro (mm)
2108.2	+10	1.7859375	10.02036	207.0608
2146.3	+8	2.00421875	12.61947	207.137
2273.3	+2	2.83765625	25.29708	271.78

ANEXO III: ENSAYOS DE MACROATAQUE

LAJA FORJA I



Zona 1



Zona 2



Zona 3

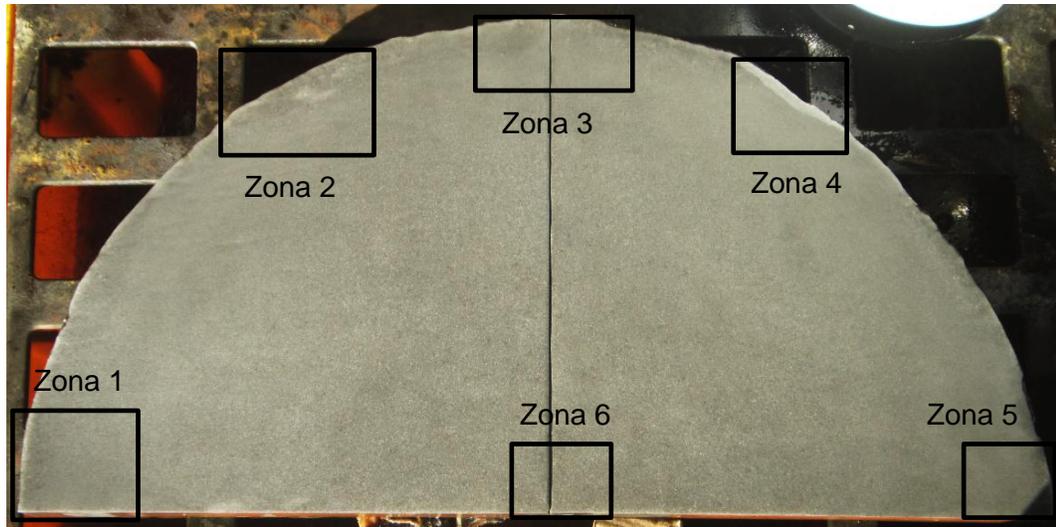


Zona 4



Zona 5

LAJA FORJA II

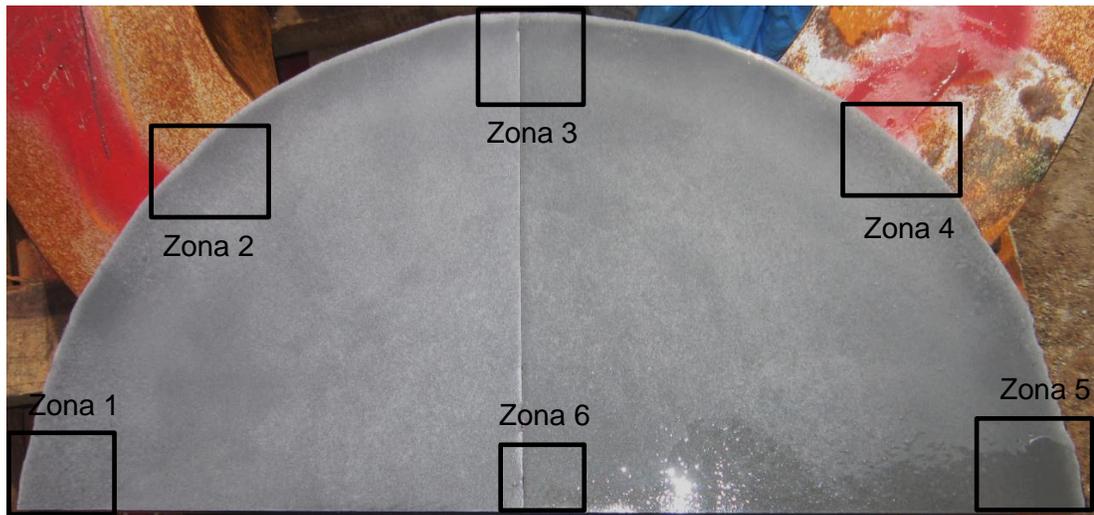


Zona 1



Zona 2

LAJA FORJA III



Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4



Zona 5

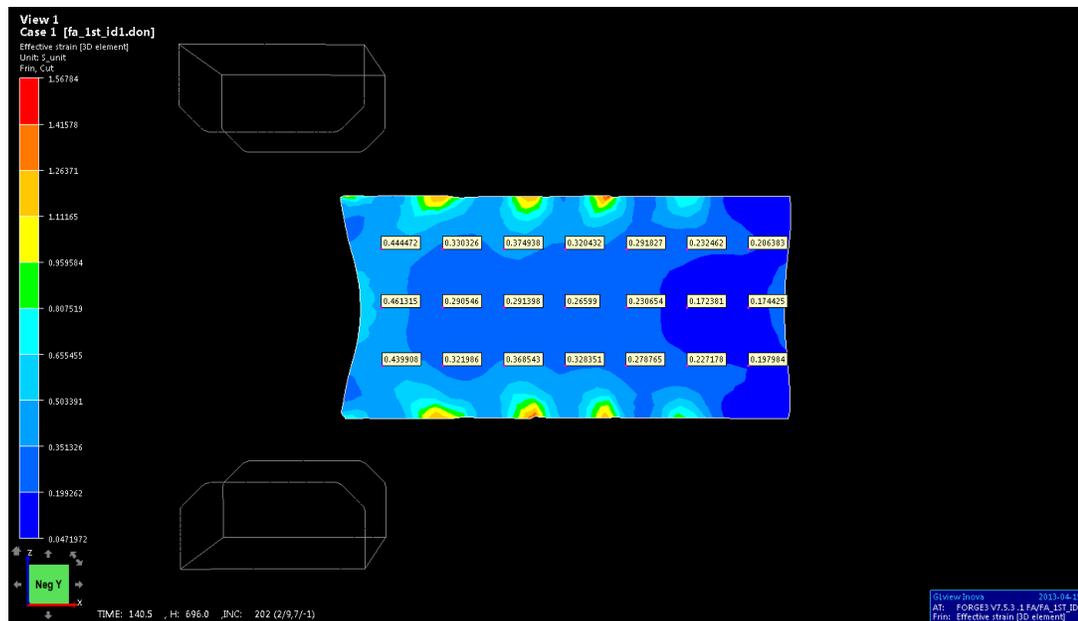


Zona 6

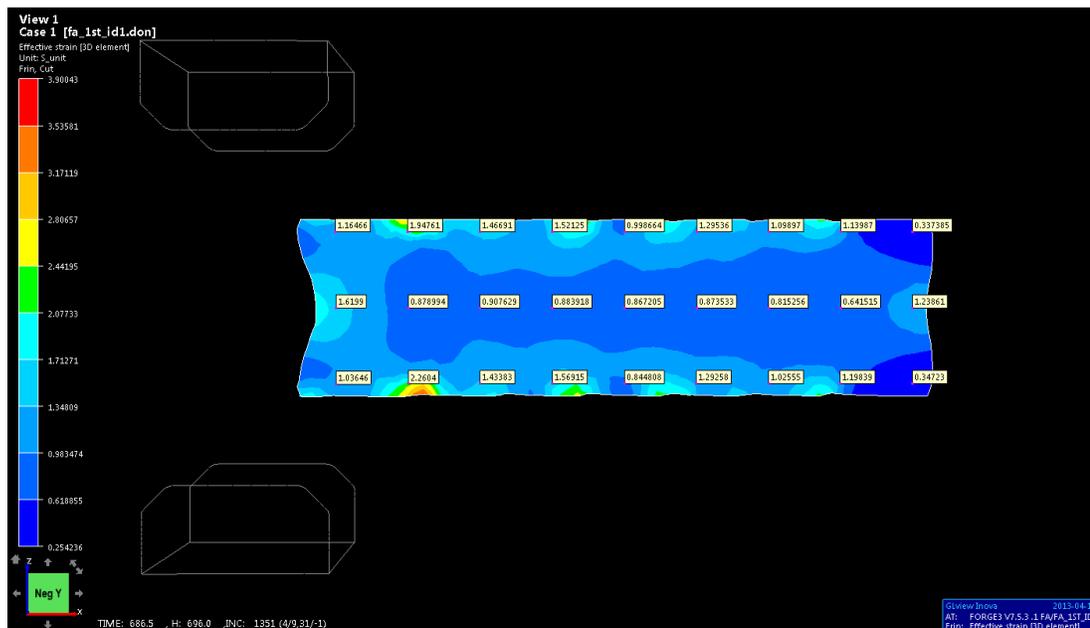
ANEXO IV: SIMULACION DEL PROCESO DE FORJA

PRIMER MODELO (SIN DEFECTO)

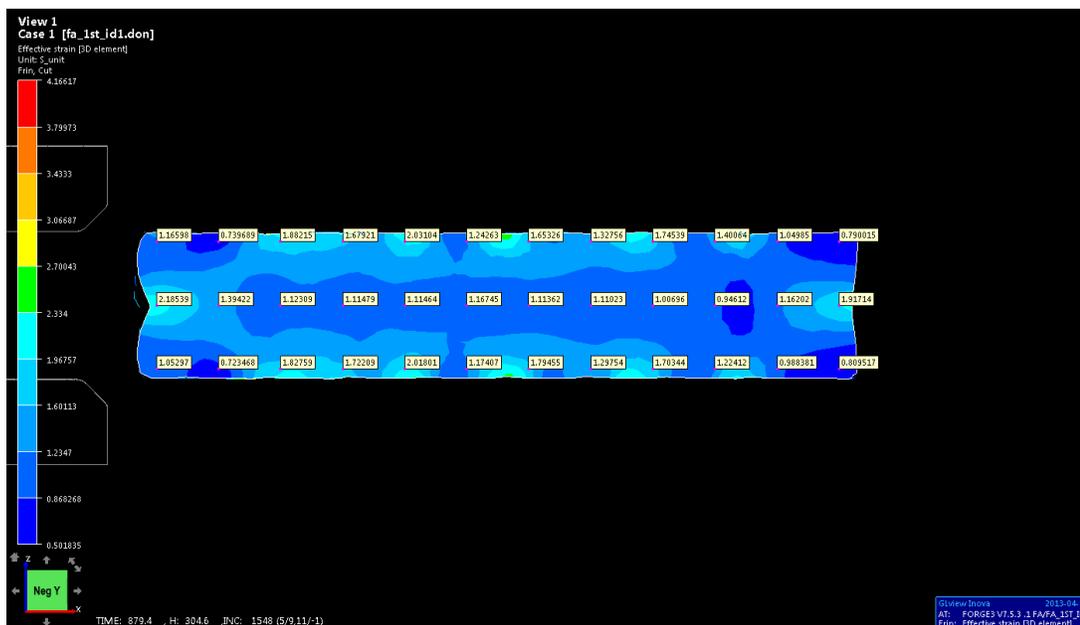
Reducción 1066-889mm (42-35in)



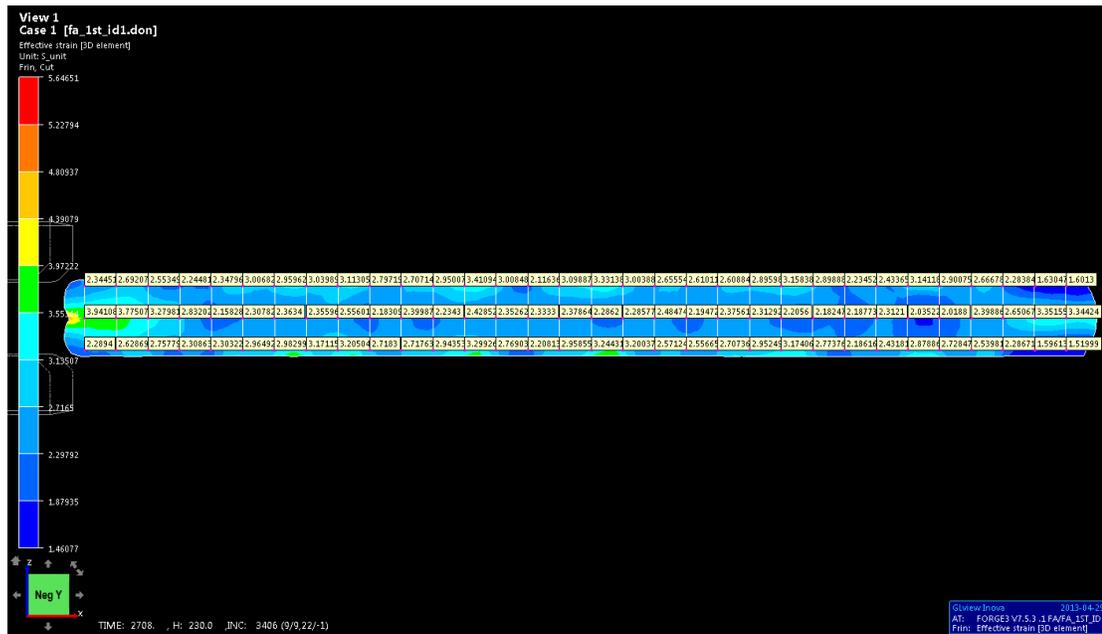
Reducción 889-685.8mm (35-27in)



Reducción 685.8-624.8mm (27-24.6in)

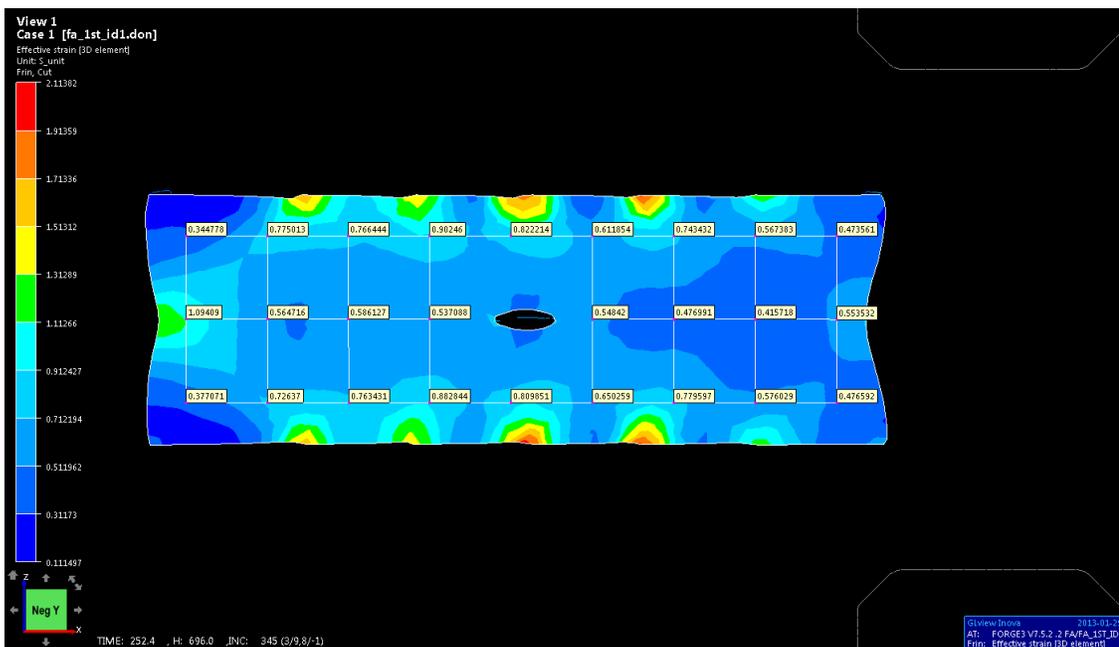


Reducción 624.8-470mm (24.6-18.5in)

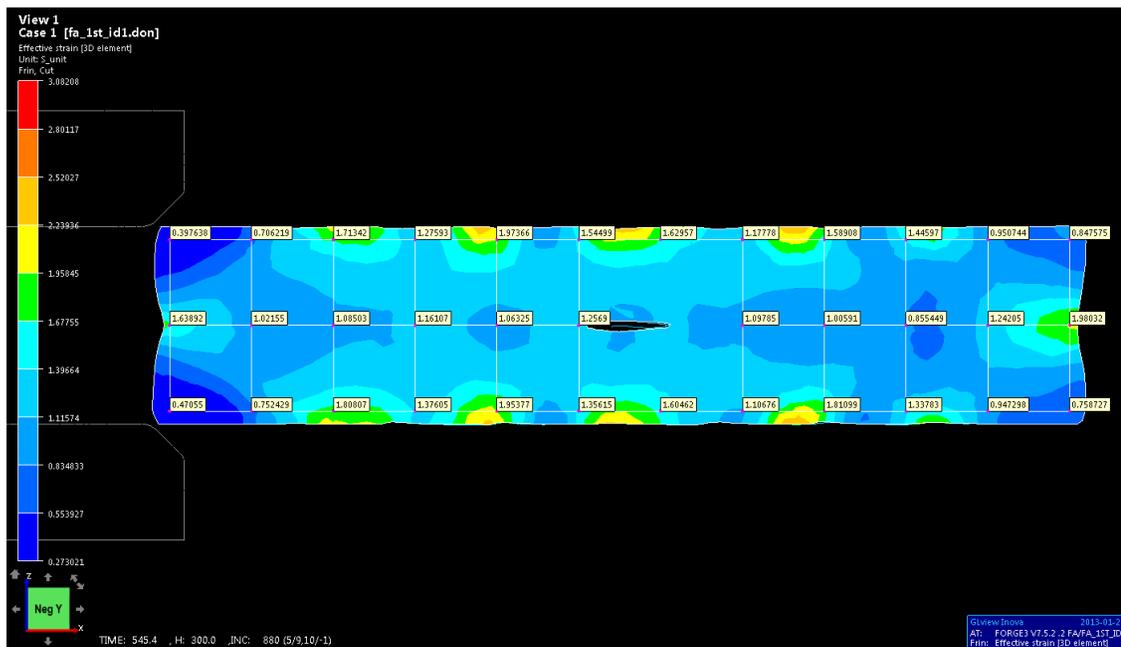


SEGUNDO MODELO (CON DEFECTO)

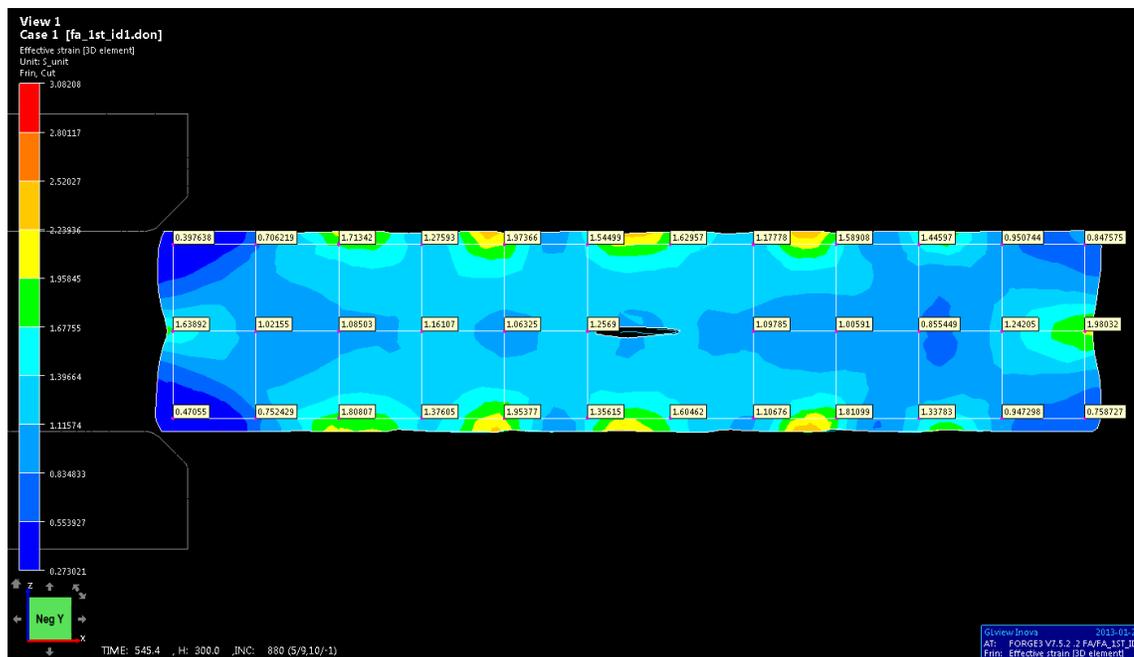
Reducción 1066-889mm (42-35in)



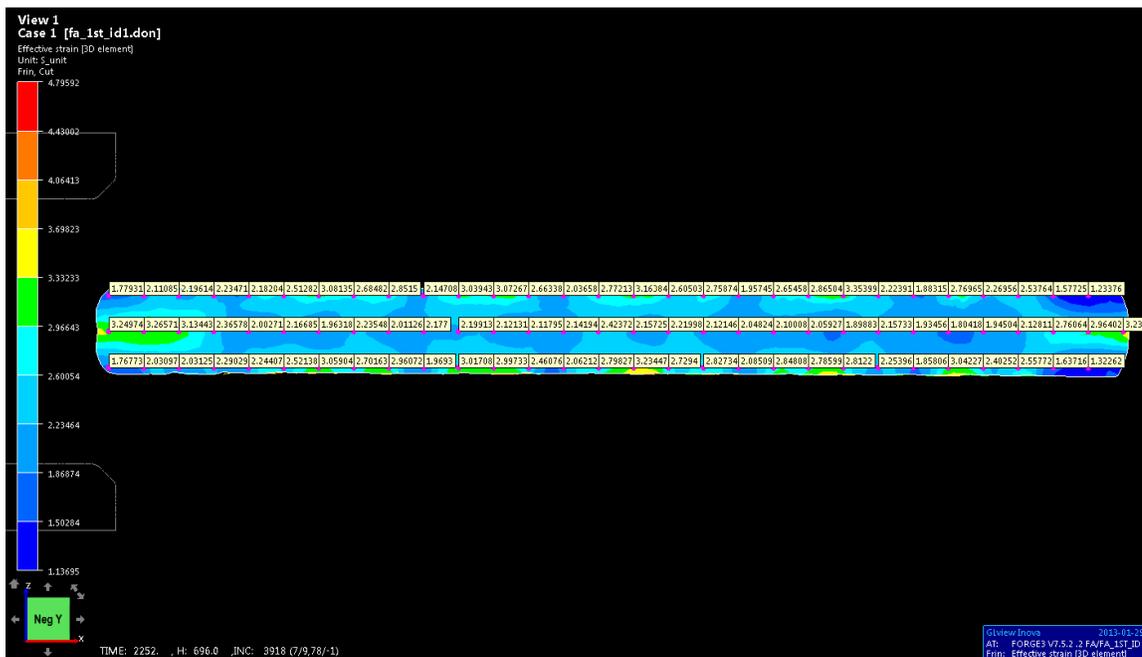
Reducción 889-685.8mm (35-27in)



Reducción 685.8-624.8mm (27-24.6in)



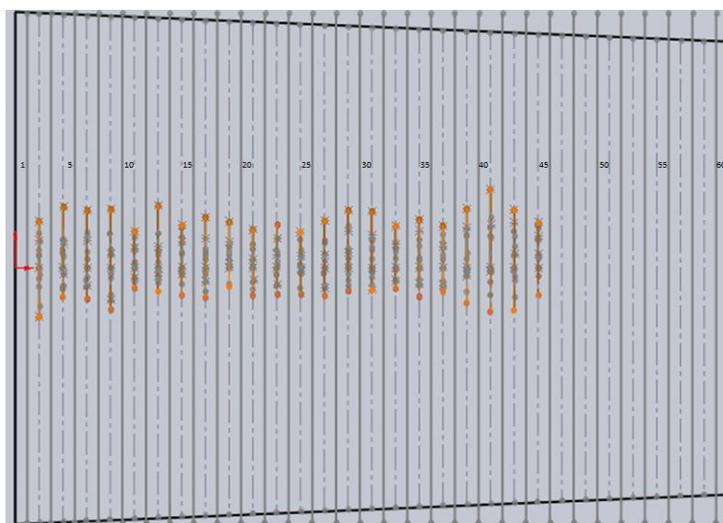
Reducción 624.8-470mm (24.6-18.5in)



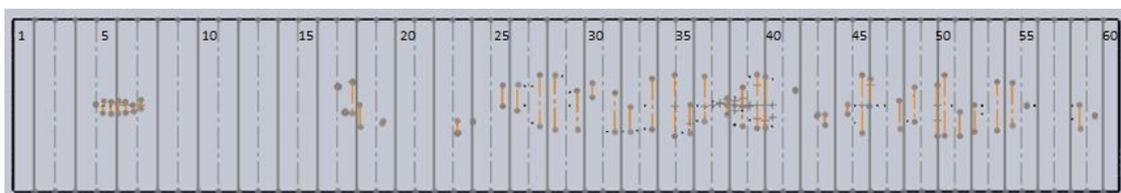
ANEXO V: ALARGAMIENTO, DIMENSION DE POROSIDAD Y VALORES DE DEFORMACION REAL DURANTE LOS ENSAYOS DE FORJA

ENSAYO FORJA I

Condición inicial



Forja I



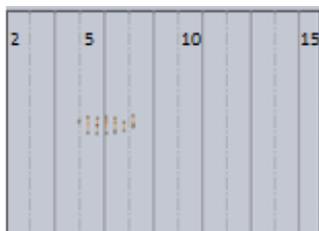
SECCION	(D), Diámetro mayor (mm)	(d), Diámetro menor (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Diámetro final (mm)	Longitud final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión starcrack (mm)	Dimensión Forja I (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
1	1066.8	1064.7	1065.75	25.4	624	74	70.73	0	0	1.070567375	0
2	1064.7	1062.6	1063.65	25.4	624	73.8	70.53	205	0	1.0666226	-205
3	1062.6	1060.5	1061.55	25.4	624	73.5	70.23	205	0	1.06267003	-205
4	1060.5	1058.3	1059.4	25.4	624	73.2	69.93	193	3.2	1.058615241	-189.8
5	1058.3	1056.2	1057.25	25.4	624	72.9	69.63	193	43.5	1.054552216	-149.5
6	1056.2	1054.1	1055.15	25.4	624	72.6	69.33	189	32.1	1.050575695	-156.9
7	1054.1	1052	1053.05	25.4	624	72.3	69.03	189	32.3	1.046591252	-156.7
8	1052	1049.9	1050.95	25.4	624	72	68.73	214	0	1.042598855	-214
9	1049.9	1047.8	1048.85	25.4	624	71.7	68.43	214	0	1.038598473	-214
10	1047.8	1045.6	1046.7	25.4	624	71.4	68.13	122	0	1.034494537	-122
11	1045.6	1043.5	1044.55	25.4	624	71.1	67.83	122	0	1.030382163	-122
12	1043.5	1041.4	1042.45	25.4	624	70.8	67.53	183	0	1.026357245	-183
13	1041.4	1039.3	1040.35	25.4	624	70.6	67.33	183	0	1.022324211	-183
14	1039.3	1037.2	1038.25	25.4	624	70.3	67.03	150	0	1.018283028	-150
15	1037.2	1035.1	1036.15	25.4	624	70	66.73	150	0	1.014233663	-150
16	1035.1	1032.9	1034	25.4	624	69.7	66.43	172	6.7	1.010079373	-165.3
17	1032.9	1030.8	1031.85	25.4	624	69.4	66.13	172	115.5	1.005916437	-56.5
18	1030.8	1028.7	1029.75	25.4	624	69.1	65.83	138	80.6	1.00184193	-57.4
19	1028.7	1026.6	1027.65	25.4	624	68.8	65.53	138	8.5	0.997759105	-129.5
20	1026.6	1024.5	1025.55	25.4	624	68.6	65.33	140	0	0.993667929	-140
21	1024.5	1022.4	1023.45	25.4	624	68.3	65.03	140	0	0.989568367	-140
22	1022.4	1020.2	1021.3	25.4	624	68	64.73	149	0	0.985362472	-149
23	1020.2	1018.1	1019.15	25.4	624	67.7	64.43	149	46.6	0.981147714	-102.4
24	1018.1	1016	1017.05	25.4	624	67.4	64.13	133	5	0.977022381	-128
25	1016	1013.9	1014.95	25.4	624	67.1	63.83	133	76.4	0.972888522	-56.6
26	1013.9	1011.8	1012.85	25.4	624	66.9	63.63	161	95.2	0.9687461	-65.8
27	1011.8	1009.7	1010.75	25.4	624	66.6	63.33	161	187.4	0.96459508	26.4

SECCION	(D), Diámetro mayor (mm)	(d), Diámetro menor (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Diámetro final (mm)	Longitud final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión starcrack (mm)	Dimensión Forja I (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
28	1009.7	1007.5	1008.6	25.4	624	66.3	63.03	172	198	0.960336283	26
29	1007.5	1005.4	1006.45	25.4	624	66	62.73	172	143.6	0.956068397	-28.4
30	1005.4	1003.3	1004.35	25.4	624	65.8	62.53	168	52.2	0.951890953	-115.8
31	1003.3	1001.2	1002.25	25.4	624	65.5	62.23	168	143.2	0.947704766	-24.8
32	1001.2	999.1	1000.15	25.4	624	65.2	61.93	134	91.8	0.943509799	-42.2
33	999.1	997	998.05	25.4	624	64.9	61.63	134	185.6	0.939306014	51.6
34	997	994.8	995.9	25.4	624	64.6	61.33	165	222	0.934992965	57
35	994.8	992.7	993.75	25.4	624	64.4	61.13	165	103.5	0.930670595	-61.5
36	992.7	990.6	991.65	25.4	624	64.1	60.83	140	163.5	0.926439708	23.5
37	990.6	988.5	989.55	25.4	624	63.8	60.53	140	59.8	0.922199852	-80.2
38	988.5	986.4	987.45	25.4	624	63.4	60.13	201	142.1	0.917950988	-58.9
39	986.4	984.3	985.35	25.4	624	63.3	60.03	201	196	0.913693079	-5
40	984.3	982.1	983.2	25.4	624	63	59.73	261	185	0.90932438	-76
41	982.1	980	981.05	25.4	624	62.7	59.43	261	5	0.904946117	-256
42	980	977.9	978.95	25.4	624	62.5	59.23	215	5.7	0.900660401	-209.3
43	977.9	975.8	976.85	25.4	624	62.2	58.93	215	39	0.896365481	-176
44	975.8	973.7	974.75	25.4	624	61.9	58.63	155	34.6	0.892061319	-120.4
45	973.7	971.6	972.65	25.4	624	61.7	58.43	155	211	0.887747874	56
46	971.6	969.4	970.5	25.4	624	61.4	58.13	0	98.8	0.883322068	98.8
47	969.4	967.3	968.35	25.4	624	61.1	57.83	0	103	0.878886448	103
48	967.3	965.2	966.25	25.4	624	60.9	57.63	0	126.3	0.874544463	126.3
49	965.2	963.1	964.15	25.4	624	60.6	57.33	0	186.4	0.870193032	186.4
50	963.1	961	962.05	25.4	624	60.3	57.03	0	221	0.865832112	221
51	961	958.9	959.95	25.4	624	60.1	56.83	0	88	0.861461663	88
52	958.9	956.7	957.8	25.4	624	59.8	56.53	0	97	0.856977239	97
53	956.7	954.6	955.65	25.4	624	59.5	56.23	0	177.5	0.852482738	177.5
54	954.6	952.5	953.55	25.4	624	59.3	56.03	0	156	0.848082987	156

SECCION	(D), Diámetro mayor (mm)	(d), Diámetro menor (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Diámetro final (mm)	Longitud final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión starcrack (mm)	Dimensión Forja l (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
55	952.5	950.4	951.45	25.4	624	59	55.73	0	5.7	0.843673537	5.7
56	950.4	948.3	949.35	25.4	624	58.7	55.43	0	0	0.839254343	0
57	948.3	946.2	947.25	25.4	624	58.5	55.23	0	0	0.834825363	0
58	946.2	944	945.1	25.4	624	58.2	54.93	0	87.4	0.830280747	87.4
59	944	941.9	942.95	25.4	624	58	54.73	0	5	0.825725781	5
60	941.9	939.8	940.85	25.4	624	57.7	54.43	0	0	0.821266707	0

ENSAYO FORJA II

Forja I



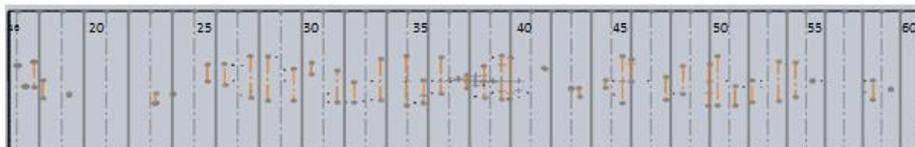
Forja II



SECCION	Diámetro Inicial (mm)	Longitud Inicial (mm)	Diámetro Final (mm)	Longitud Final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión de defectos Forja I (mm)	Dimensión de defectos Forja II (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
2	600	70.53	495	103.625344	96.3953444	0	21.2	0.384743785	21.2
3	600	70.23	495	103.184573	95.954573	0	5.8	0.384743785	5.8
4	600	69.93	495	102.743802	95.5138017	3.2	25.5	0.384743785	22.3
5	600	69.63	495	102.30303	95.0730303	43.5	28	0.384743785	-15.5
6	600	69.33	495	101.862259	94.632259	32.1	22.7	0.384743785	-9.4
7	600	69.03	495	101.421488	94.1914876	32.3	23.7	0.384743785	-8.6
8	600	68.73	495	100.980716	93.7507163	0	19.3	0.384743785	19.3
9	600	68.43	495	100.539945	93.3099449	0	13.7	0.384743785	13.7
10	600	68.13	495	100.099174	92.8691736	0	9.3	0.384743785	9.3
11	600	67.83	495	99.6584022	92.4284022	0	28	0.384743785	28
12	600	67.53	495	99.2176309	91.9876309	0	26.8	0.384743785	26.8
13	600	67.33	495	98.9237833	91.6937833	0	7.8	0.384743785	7.8
14	600	67.03	495	98.4830119	91.2530119	0	0	0.384743785	0

ENSAYO FORJA III

Forja I



Forja III



SECCION	Diámetro Inicial (mm)	Longitud Inicial (mm)	Diámetro Final (mm)	Longitud Final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión de defectos Forja I (mm)	Dimensión de defectos Forja III (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
16	624	23	472	40.198793	32.3987935	6.7	0	0.558342766	-6.7
17	624	66.13	472	115.527837	107.78027	115.5	0	0.558342766	-115.5
18	624	65.83	472	115.003505	107.255938	80.6	0	0.558342766	-80.6
19	624	65.53	472	114.531606	106.731606	8.5	0	0.558342766	-8.5
20	624	65.33	472	114.129618	106.382051	0	0	0.558342766	0
21	624	65.03	472	113.605286	105.857719	0	0	0.558342766	0
22	624	64.73	472	113.133387	105.333387	0	0	0.558342766	0
23	624	64.43	472	112.609055	104.809055	46.6	0	0.558342766	-46.6
24	624	64.13	472	112.084723	104.284723	5	0	0.558342766	-5
25	624	63.83	472	111.560391	103.760391	76.4	0	0.558342766	-76.4
26	624	63.63	472	111.210836	103.410836	95.2	0	0.558342766	-95.2
27	624	63.33	472	110.686504	102.886504	187.4	0	0.558342766	-187.4
28	624	63.03	472	110.162172	102.362172	198	0	0.558342766	-198

SECCION	Diámetro Inicial (mm)	Longitud Inicial (mm)	Diámetro Final (mm)	Longitud Final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión de defectos Forja I (mm)	Dimensión de defectos Forja III (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
29	624	62.73	472	109.63784	101.83784	143.6	0	0.558342766	-143.6
30	624	62.53	472	109.288285	101.488285	52.2	0	0.558342766	-52.2
31	624	62.23	472	108.763953	100.963953	143.2	0	0.558342766	-143.2
32	624	61.93	472	108.239621	100.439621	91.8	0	0.558342766	-91.8
33	624	61.63	472	107.715289	99.9152887	185.6	0	0.558342766	-185.6
34	624	61.33	472	107.190957	99.3909566	222	0	0.558342766	-222
35	624	61.13	472	106.841402	99.0414019	103.5	0	0.558342766	-103.5
36	624	60.83	472	106.31707	98.5170698	163.5	0	0.558342766	-163.5
37	624	60.53	472	105.792738	97.9927377	59.8	34.6	0.558342766	-25.2
38	624	60.13	472	105.093628	97.2936283	142.1	5.7	0.558342766	-136.4
39	624	60.03	472	104.918851	97.1188509	196	0	0.558342766	-196
40	624	59.73	472	104.394519	96.5945188	185	0	0.558342766	-185
41	624	59.43	472	103.870187	96.0701867	5	0	0.558342766	-5
42	624	59.23	472	103.520632	95.720632	5.7	0	0.558342766	-5.7
43	624	58.93	472	102.9963	95.1962999	39	0	0.558342766	-39
44	624	58.63	472	102.471968	94.6719678	34.6	0	0.558342766	-34.6
45	624	58.43	472	102.122413	94.3224131	211	0	0.558342766	-211
46	624	58.13	472	101.598081	93.798081	98.8	0	0.558342766	-98.8
47	624	57.83	472	101.073749	93.2737489	103	0	0.558342766	-103
48	624	57.63	472	100.724194	92.9241942	126.3	0	0.558342766	-126.3
49	624	57.33	472	100.199862	92.3998621	186.4	0	0.558342766	-186.4
50	624	57.03	472	99.67553	91.87553	221	0	0.558342766	-221
51	624	56.83	472	99.3259753	91.5259753	88	0	0.558342766	-88
52	624	56.53	472	98.8016432	91.0016432	97	0	0.558342766	-97
53	624	56.23	472	98.2773111	90.4773111	177.5	0	0.558342766	-177.5
54	624	56.03	472	97.9277564	90.1277564	156	0	0.558342766	-156
55	624	55.73	472	97.4034243	89.6034243	5.7	0	0.558342766	-5.7

SECCION	Diámetro Inicial (mm)	Longitud Inicial (mm)	Diámetro Final (mm)	Longitud Final (mm)	Long. final- %error (mm)	Dimensión de defectos Forja I (mm)	Dimensión de defectos Forja III (mm)	Deformación Ln(Ao / Af)	Diferencia de dimensión de defectos (Δp)
56	624	55.43	472	96.8790922	89.0790922	0	0	0.558342766	0
57	624	55.23	472	96.5295375	88.7295375	0	0	0.558342766	0
58	624	54.93	472	96.0052054	88.2052054	87.4	0	0.558342766	-87.4
59	624	54.73	472	95.6556507	87.8556507	5	0	0.558342766	-5
60	624	54.43	472	95.1313186	87.3313186	0	0	0.558342766	0