



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**“Caracterización de coples de acero y cabezas de latón
forjados para tanques estacionarios.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Ingeniero Mecánico

PRESENTA:

José Castañeda Torres

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Daniel Aldama Ávalos



Nezahualcóyotl, Estado de México. 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mis padres por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

A Lizeth, mi esposa, por motivarme siempre a seguir adelante.

A mis profesores por brindarme sus conocimientos y amistad incondicional.

A mi amigo Rogelio por formar parte de este proyecto y por su sincera amistad.

Agradecimientos

Al Dr. Jacinto Cortés Pérez por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación.

Al Dr. Daniel Aldama Ávalos por reavivar mi pasión por la ingeniería, aumentar mis ganas de seguir aprendiendo y por su apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

Agradecimiento especial

Al proyecto de COMECYT con número de convenio **40346-58-8-I-15**,
*“Desarrollo e implementación de un proceso para la evaluación de la eficiencia
mecánica de piezas forjadas de latón y acero al carbón”* y a la empresa
Medidores Internacionales Rochester S.A. de C.V. por permitirme ser
partícipe del proyecto.

Contenido

Introducción	i
I. Antecedentes	1
I.1 - Manejo de gas L.P. a domicilio	1
I.1.1 - Normas para manejo de gas a domicilio	1
I.1.1.1 - La planta de distribución NOM-001-SESH-2014	2
I.1.1.2 - Transporte del gas L.P. NOM-007-SESH-2010	2
I.1.1.3 - Tanques estacionarios NOM-009-SESH-2011	3
I.1.1.4 - Tanques transportables (cilindros) NOM-008-SESH/SCFI-2010	3
I.1.1.5 - Pruebas para tanques para gas L.P. según las normas oficiales mexicanas	4
I.2 - Importancia de los accesorios en los tanques para gas	7
II. Marco Teórico	11
II.1 - La forja.....	11
II.1.1 - Colada continua	15
II.1.2 – Prensas para forja.....	17
II.1.3 - Defectos en piezas forjadas	22
II.2 - Diagramas binarios.....	24
II.2.1 - Fases.....	25
II.2.2 - Forjabilidad.....	28
II.3 - Diseño de recipientes a presión con orientación a tanques estacionarios.....	30
II.3.1 - Dispositivos de medición y control. (Protocolos de uso, seguridad y prueba)	34
III. Método Experimental	38
III.1 - Vinculación Centro Tecnológico - MIRSA	38
III.2 - Metodología usada	38
III.2.1 - Análisis de fallas	38
III.3 - Estudio para encontrar los reactivos para micro y macroataque	39
III.4 - Estudio para encontrar pruebas optimas de dureza.....	40
III.5 - Etapas.....	40
III.5.1 - Preparación de probetas para Macroataque y Microataque	40
III.5.2 - Preparación de probetas para análisis químico	44
III.5.3 - Preparación de probetas para prueba de dureza	45
III.6 - Macroataque. Norma ASTM E 340-00	46
III.6.1 - Macroataque a piezas de acero: Opción 1.....	47
III.6.2 - Macroataque a piezas de acero: Opción 2.....	48
III.6.3 - Macroataque a piezas de latón: Opción 1	49
III.6.4 - Macroataque a piezas de latón: Opción 2	51

III.6.5 - Macroataque a piezas de latón: Opción 3	52
III.6.6 - Macroataque a piezas de latón: Opción 4	53
III.7 - Microataque. Norma ASTM E 407-99	55
III.7.1 - Microataque a piezas de acero; Opción 1	55
III.7.2 - Microataque a piezas de acero; Opción 2	56
III.7.3 - Microataque a piezas de latón	57
III.8 - Análisis químico.....	58
III.9 - Prueba de dureza	59
IV. Resultados y Discusión.....	63
IV.1 - Macroataque a piezas de acero.....	63
IV.2 - Macroataque a piezas de latón.....	64
IV.3 - Microataque a piezas de acero DW con opción 1	71
IV.4 - Microataque a piezas de acero DW con opción 2	72
IV.5 - Microataque a piezas de acero PTT con opción 1	72
IV.6 - Microataque a piezas de acero PTT con opción 2	73
IV.7 - Microataque a piezas de acero SSE con opción 1.....	75
IV.8 - Microataque a piezas de acero SSE con opción 2.....	76
IV.9 - Microataque a piezas de latón.....	77
IV.9.1 - Microataque a piezas de latón (sobre atacadas)	78
IV.10 - Análisis químico de piezas de acero	79
IV.11 - Análisis químico a piezas de latón.	80
IV.12 - Pruebas de dureza a piezas de acero DW.....	89
IV.13 - Pruebas de dureza a piezas de acero PTT.....	90
IV.14 - Pruebas de dureza a piezas de acero SSE	91
IV.15 - Pruebas de dureza a piezas de latón	92
Conclusiones	93
Bibliografía	97

Introducción

Este trabajo constituye un reporte de la vinculación que se dio a mediados de 2017, entre la UNAM, en su Centro Tecnológico Aragón (CTA), con la compañía Medidores Internacionales Rochester S. A. de C. V. (MIRSA).

La relación inició cuando, por iniciativa del Dr. Jacinto Corté Pérez entonces Secretario Académico del Programa de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Aragón invitó a varias empresas a una serie de pláticas en las cuales se les ilustraba sobre las bondades de iniciar trabajos de vinculación y algunos otros beneficios como los apoyos que otorga el COMECYT y otros organismos. Un alto funcionario, entre otros, manifestó su interés de manera tal que nace un convenio entre MIRSA y el CTA, después de una visita que realizó el Dr. Jacinto Cortés Pérez, a la planta de la empresa Medidores Internacionales Rochester S.A. de C.V. ubicada en Tlalnepantla, Estado de México. Durante su visita, el Dr. Jacinto y el Ing. Nicolás Alfaro Escamilla, director de la planta, platicaron sobre los procesos de control de calidad de los productos que la empresa produce. Lo anterior desembocó en un proyecto de vinculación referido. El proyecto contempló el desarrollo de un manual de control de calidad que permitiera verificar la eficiencia de las piezas que le eran surtidas a la empresa.

Planteamiento del problema

En la planta se llevan a cabo pruebas hidrostáticas a coples de acero y cabezas de latón que son instalados en tanques estacionarios para gas L.P. Estas pruebas muestran cuando las piezas tienen grietas o poros que provocan la fuga del material que deben contener. Estas pruebas sólo muestran si las piezas analizadas presentan fugas, sin embargo, la prueba hidrostática no revela la causa de la falla. Era necesario pues, trabajar en un proceso que ayudara a revelar la causa del problema.

Los proveedores de las piezas, en donde se montan los medidores, aseguran que las piezas que proveen son forjadas y cumplen con las normas requeridas para las piezas de latón y de acero. Sin embargo, algunas de las piezas de latón han mostrado problemas de manera recurrente. En la empresa se trabajan los coples de acero que van unidos con soldadura a los tanques de gas estacionario, en estos coples se enroscan las válvulas y las cabezas de latón donde se instala el medidor.

Algunas piezas de latón presentaban problemas al momento de ser maquinadas, ya que, se fracturaban sin explicación aparente. El control de calidad de la empresa no era basto para identificar las piezas con este defecto antes de comenzar a trabajar con ellas.

Los coples de acero y las cabezas de latón usadas en tanques de gas estacionario se deben encontrar bajo las normas ASTM A105-05 para los coples de acero, y ASTM B 124/B 124M y B 249/B 249M para las piezas de latón. En ambos casos la norma indica que las piezas deben ser forjadas y cumplir con el porcentaje de aleación indicado.

Los ingenieros de la empresa comenzaron a dudar que las piezas hubiesen sido forjadas o que no cumplían con los porcentajes establecidos para la aleación. Sin un control de calidad previo al maquinado, la empresa no tenía armas para exigir a sus proveedores una mejora en la calidad de las piezas que le eran provistas.

Los coples de acero tienen una forma toroide inmersa en una forma cuadrada con una ceja, la cual permite ubicar la pieza en el tanque para posteriormente ser unido al mismo por soldadura.

Las piezas que la empresa usa para hacer los coples de acero y las cabezas de latón son piezas que aún requieren maquinado antes de su instalación final. En seguida se muestra un ejemplo de un cople sin maquinado y uno ya maquinado, así mismo se muestra una cabeza de latón sin maquinar y una cabeza de latón ya maquinada.

Propuesta de solución

El Dr. Jacinto explicó al Ing. Nicolás Alfaro un método que podría revelar la causa de falla de las piezas forjadas. Dicho método puede mostrar la forma en la que el material fluyó cuando fue forjado. Esto permite analizar la estructura del material y observar las posibles causas de falla. El método implica el sacrificio de algunos especímenes, los cuales deben ser cortados y preparados para ser atacados con algunos ácidos; es decir se propuso una secuencia de análisis metalográfico, análisis de macro ataque, análisis químico. Pruebas de dureza y algunas propuestas más sobre la plasticidad y el trabajo teórico de la forja del latón en caliente.

Historiales

MIRSA es una subsidiaria de Rochester Gauges Inc. Esta planta fue fundada durante los años sesenta. Inicialmente fabricaba solamente indicadores de nivel para la industria del gas licuado de petróleo (L.P.), ahora adicionalmente, elabora termómetros bimetálicos, dispositivos de prevención de sobrellenado, e indicadores de nivel para tanques industriales o autotanques.

Estos indicadores de nivel están conformados básicamente por; una carátula que se encuentra montada en una cabeza de latón, un soporte, un sistema de engranaje y un flotador. Este conjunto de piezas es montado en un cople de acero previamente soldado al tanque. Cada pieza pasa por un estricto control de calidad, sin embargo, con las cabezas de latón se tiene un problema singular, y es que al momento de ser maquinadas, algunas piezas se fracturaron

El trabajo que se desarrolla con esta tesis, consiste en encontrar un método viable para analizar las cabezas de latón y encontrar el porqué de las fallas. Esto fue una solicitud que hizo MIRSA al Centro de Investigación Multidisciplinaria Aragón (CIMA) de la UNAM, por medio de un proyecto de vinculación Empresa – UNAM. Aunado a esta petición, se solicitó también analizar los coples de acero, que si bien, no presentan el mismo problema, forman parte importante del acoplamiento en el tanque.

Salvedades

Las limitaciones que se tuvieron al momento de llevar a cabo dicho proyecto fue que todos los preparativos y pruebas fueron realizados en el tiempo libre con el que contábamos mi compañero Rogelio Sánchez Pérez y el que escribe. Otra de las limitaciones que tuvimos fue que no teníamos información certera sobre cómo realizar las pruebas que más tarde llevaríamos a cabo, pero gracias a la orientación de algunos profesores comenzamos con la búsqueda de la información necesaria. Una limitante más fue, que no contamos con las piezas suficientes para realizar la cantidad de pruebas que nos permitieran llevar un control estadístico con los datos obtenidos.

Algunas de las restricciones que tuvimos fue que todas las pruebas debían estar basadas en normas, esto en algún momento fue un problema, ya que, a pesar de que nos apegábamos a las indicaciones de las normas, los resultados obtenidos no eran los esperados.

El motivo para analizar mecánica y térmicamente la constitución de piezas fabricadas, fue con la intención de prevenir, y hasta cierto punto predecir la zona en la que podría ser delicado el manejo del gas L.P.

En este trabajo, se supone que los cálculos que nos arrojan la resistencia de las piezas esbozadas anteriormente, ya fueron hechos por la casa matriz (Rochester Gauges Inc.). La participación de nuestra actividad consistió principalmente en un análisis metalográfico (Microataque y macroataque), además de algunas otras pruebas destructivas como la de dureza y comportamiento elastoplástico, además del análisis químico.

Objetivo general

Encontrar la explicación a la falla por desprendimiento de las piezas de latón y sugerir posibles soluciones. Generar por lo menos un procedimiento que ayude a la empresa MIRSA a mejorar en el proceso de control de calidad que implementa actualmente.

Objetivos particulares

Ganar el interés de los futuros investigadores para que con sus conocimientos y los resultados obtenidos en este trabajo, continuar con la presente investigación y así lograr desembocar en la mejora en los procesos de diseño y manufactura metalúrgica en la industria mexicana.

Descripción del capitulado

En el capítulo primero ubicamos al lector en el contexto industrial y normativo en el que se da la vinculación. Lo anterior tiene como propósito concientizar al lector sobre la importancia del diseño de los recipientes que contendrán gas L.P. así como algunas de sus partes, principalmente coples y cabezas de latón.

En el segundo capítulo se aborda el proceso de forja y las fallas posibles. Lo anterior es con el fin de mostrar algunos puntos de vista sobre las causas por las que se generan las fallas. En este apartado se tiene citada la bibliografía encontrada, pero sobre todo, la visita que los doctores Daniel Aldama y José Guadalupe Hernández hicieron a la empresa que fabrica las partes de latón.

En el tercer capítulo, se describen las acciones emprendidas para llevar a cabo la vinculación. Aquí se describen los pasos emprendidos para dar respuesta a las incógnitas a resolver, se hace primero referencia a la metalografía, macro ataque, micro ataque, análisis químico y pruebas de dureza.

I. Antecedentes

El trabajo que se desarrolla con esta tesis, consiste en encontrar un método viable para analizar las cabezas de latón y encontrar el porqué de las fallas. Aunado a esta petición, fue solicitado analizar también los coples de acero, que si bien, no presentan el mismo problema, sí forman parte importante del acoplamiento en el tanque.

En este trabajo fue también, conveniente, reflexionar sobre el manejo del gas y las posibles fugas por falla en las piezas referidas. Por ello, en este capítulo, se hace una compilación de un conjunto de normas que tienen como función extremar los cuidados sobre el “líquido-gas” inflamable.

En este primer apartado se muestran puntos importantes mencionados en las normas mexicanas relacionadas con el diseño de los tanques y sus componentes, y se muestra también, información básica sobre algunas pruebas de calidad para los recipientes en cuestión.

I.1 - Manejo de gas L.P. a domicilio

El uso del gas L.P. es muy común en hogares y comercios, y cada vez es más común su uso en automóviles en México, pero pocas veces nos detenemos a pensar en todo lo que debe suceder para que este combustible llegue a su destino.

El gas L.P. es un combustible que se extrae de las profundidades de la tierra. Es un producto de la refinación del petróleo crudo y gas natural también proveniente de los yacimientos petrolíferos. Es un hidrocarburo de composición compleja, pero está constituido principalmente por gas propano y butano.

En condiciones ambientales normales, se mantiene en estado gaseoso, sin embargo, para poder almacenarlo y transportarlo, es conveniente licuarlo, ya que en estado líquido es más fácil y segura su manipulación.

El producto llega a las distribuidoras por medio de ductos y/o pipas, en donde es almacenado en tanques estacionarios de gran capacidad. Posteriormente es repartido a las casas y comercios nuevamente en pipas o en cilindros. Las pipas llegan a los hogares y/o comercios directamente a llenar el tanque estacionario por medio de mangueras y válvulas que controlan la cantidad de combustible que será despachado.

Los tanques estacionarios más comunes pueden contener desde 120 litros hasta 300 litros para hogares y comercios pequeños, y desde 500 litros hasta 5000 litros para las industrias.

Por otra parte, los cilindros son previamente llenados en la distribuidora y llevados hasta los hogares, en los cuales se intercambia el cilindro vacío por el que ha sido llenado previamente en la distribuidora. Los cilindros más comerciales en México son los de 20 y 30 kilogramos, y en algunos casos de hasta 45 kilogramos.

Tanto el transporte cómo almacenamiento del gas L.P. debe cumplir con normas y protocolos de seguridad.

I.1.1 - Normas para manejo de gas a domicilio

En este apartado, nos referiremos a la normalización sobre el manejo de gas L.P. en México. Desde luego, en este punto sólo hablaremos de la generalidad, la cual para ampliar la información, es recomendable consultar las Normas Oficiales Mexicanas que a la fecha de entrega de este trabajo, se encuentran disponibles en el portal de Diario Oficial de la Federación.

Se hace mención de algunos aspectos generales descritos en las normas para el almacenamiento en la planta distribuidora, el transporte del gas y los tanques estacionarios para gas L.P.

En este trabajo se omite la descripción del proceso de extracción ya que se enfoca principalmente en algunas piezas de los tanques estacionarios para gas L.P. y no en el gas mismo.

Existen muchas normas que rigen el uso, almacenamiento y transporte de gas L.P. en todo el mundo, inclusive cada país o región puede contar con sus propias normas locales. Para el caso de las plantas de almacenamiento, y como esta es una investigación realizada en el Estado de México, se hace mención a la Norma Oficial Mexicana (NOM), así como para el transporte y los tanques estacionarios en general.

En el caso de las pruebas realizadas a las cabezas de latón y los coples de acero, se recurrió a normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) ya que son normas especializadas en pruebas para materiales.

1.1.1.1 - La planta de distribución NOM-001-SESH-2014

Es importante iniciar con los aspectos de seguridad que se deben manejar en las plantas de distribución, referente al diseño, construcción y condiciones de seguridad para operar estas instalaciones (NOM-001-SESH-2014).

Referente al diseño, la norma menciona que todas las plantas distribuidoras de gas L.P. deben contar con los planos y memorias técnico descriptivas de los proyectos: Civil, Mecánico, Eléctrico y Contra incendio.

Establece las especificaciones con las que debe contar la planta, desde la cimentación, ubicación geográfica, drenaje, inclusive considerar la dirección predominante de los vientos, la delimitación de las zonas abiertas al público y zonas de riesgo, así mismo establece las especificaciones que se deben indicar en los planos de cada uno de los elementos y accesorios con los que cuenta la planta, así como la ubicación de cada uno de ellos en la planta.

Esta norma también menciona las características eléctricas que debe tener la planta, como son; diagramas de la instalación eléctrica, cuadros de materiales y descripción de equipos, distribución de ductos y alimentadores, sistemas de tierras, entre otras.

De igual forma menciona los aspectos de seguridad con los que debe contar una planta distribuidora de gas L.P. Algunos aspectos considerados son los siguientes: Indicación de todos los componentes del sistema contra incendios, todas las plantas deben contar con un diagrama isométrico del sistema contra incendios y todos sus componentes, ubicar los radios de cobertura de hidrantes y localizar la alarma y los interruptores de activación.

1.1.1.2 - Transporte del gas L.P. NOM-007-SESH-2010

El transporte seguro del gas L.P. es tan importante como su almacenamiento en las plantas distribuidoras, ya que es una de las principal forma de hacer llegar dicho combustible a su destino. La norma NOM-007-SESH-2010 menciona las condiciones de seguridad, operación y mantenimiento de los vehículos que transportan gas L.P.

Cada vehículo debe contar con un programa de mantenimiento, dentro del cual se debe contemplar examinar lo siguiente: La superficie externa del tanque no debe contar con abolladuras críticas, protuberancias, incisiones o cavidades mayores al 40% del espesor de la lámina más delgada con la que está conformado el tanque, y no es tolerable ningún tipo de grieta en toda la superficie del tanque. La superficie interna del tanque no debe carecer de rompeolas, y éstas deben estar bien fijadas al tanque. Toda la tubería interna del tanque debe encontrarse en perfectas condiciones de uso.

Cuando algún recipiente no cumple con las condiciones antes mencionadas, debe ser reparado debidamente, y una vez reparado debe aprobar las siguientes pruebas indicadas por la norma: Prueba hidrostática, prueba ultrasónica, pruebas por medio de líquidos penetrantes o partículas magnéticas y pruebas radiográficas. En algunos casos, según sea necesario, se deben realizar también, pruebas de dureza y réplicas metalográficas. En caso de que el tanque no pase las pruebas antes mencionadas, deberá ser descartado para dicha tarea.

Todas las válvulas, tanto internas como externas, deben tener mantenimiento y/o ser reemplazadas cada cierto tiempo según las indicaciones de la norma.

Según la norma, todos los recipientes de este tipo deben contar con un indicador de nivel el cual debe encontrarse en buenas condiciones y no presentar fugas.

También menciona las características que deben tener el remolque, semirremolque o auto tanque que transportará el tanque.

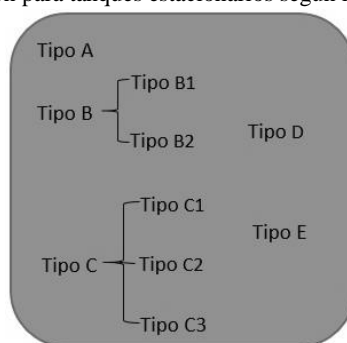
1.1.1.3 - Tanques estacionarios NOM-009-SESH-2011

Es de suma importancia el diseño de un tanque estacionario que contendrá gas L.P., ya que esto va directamente ligado a la seguridad que ofrece.

A continuación se hace mención de la norma NOM-009-SESH-2011 la cual aborda las especificaciones técnicas mínimas con las que debe contar un tanque de gas de tipo estacionario, y métodos de prueba que se aplican a este tipo de recipientes.

La norma clasifica a los tanques estacionarios en 5 principales grupos, la clasificación depende del diseño, capacidad, la ubicación de sus válvulas, entre otras.

Figura 1.1 - Clasificación para tanques estacionarios según la NOM-009-SESH-2011.



Un tanque estacionario puede estar a la intemperie, en una planta de distribución, puede alimentar motores de combustión interna, e inclusive estar montados en autotanques, remolques o semi-remolques. La clasificación dependerá de esto.

La norma indica los detalles sobre la forma del tanque y los espesores mínimos con los que debe contar cada tipo de tanque, así como los materiales que se usarán en cada caso.

Esta norma menciona las pruebas a las que serán sometidos los tanques según su clasificación. Muestra También algunos cálculos para el diseño de los tanques. Menciona, además, restricciones que se deben considerar al diseñar las boquillas.

De igual manera, muestra la composición química y algunas propiedades mecánicas con las que deben cumplir los aceros que conformarán tanto el tanque como las boquillas.

Según la norma, los tanques de tipo A, B, C y D pueden tener cualquiera de las siguientes formas:

- Cuerpo cilíndrico con cabezas semielipsoidales
- Cuerpo cilíndrico con cabezas toriesféricas
- Cuerpo cilíndrico con cabezas semiesféricas
- Forma esférica

Para los tanques de tipo E, la forma debe ser esférica y con capacidad mínima de 378000 litros de agua a temperatura ambiente.

1.1.1.4 - Tanques transportables (cilindros) NOM-008-SESH/SCFI-2010

Como ya se ha mencionado al principio de este apartado, en México es muy popular el uso de cilindros para el transporte y almacenamiento de gas L.P. Por ello es que las autoridades mexicanas

han creado una norma que regula la fabricación de este tipo de tanques, que, aunque su capacidad es menor a la de un tanque estacionario, la fabricación defectuosa de alguno de sus componentes puede llegar a representar un riesgo para la población.

La norma NOM-008-SESH/SCFI-2010 muestra las especificaciones de fabricación, los materiales y los métodos de prueba por los que debe pasar cada cilindro hecho en México antes de ser lanzado al mercado.

Especifica algunos detalles para la construcción de dichos tanques, como son: la forma, el tipo de materiales y la soldadura que será usada para su fabricación. De igual manera muestra los métodos de prueba por los que deben pasar los tanques antes de ser puesto al servicio del público.

Menciona que las personas encargadas de realizar las soldaduras en los tanques, deben estar calificados para realizar dicha tarea. Por ejemplo, cada vez que el soldador haya dejado de realizar dicha tarea por tres meses o más, deberá ser evaluado nuevamente antes de permitirle continuar con dicha labor, esto con el fin de revalidar sus habilidades y asegurar que la soldadura cumplirá con las especificaciones marcadas por la ley.

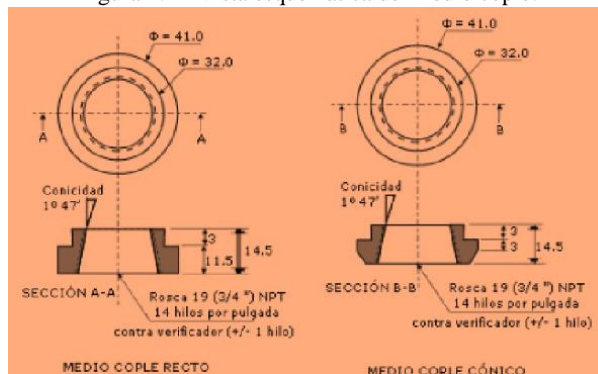
De igual manera, hace una clasificación de los tipos de tanques transportables según la tecnología de construcción y tipos de materiales.

Especifica las capacidades volumétricas de cada tanque según su capacidad nominal, que debe ser alrededor del 42%. Es decir, que la capacidad volumétrica de un tanque con una capacidad nominal de 45 kg, debe ser de alrededor de los 105 litros.

A efecto de que un recipiente transportable sea considerado como recipiente portátil, debe ser diseñado para tener un peso bruto igual o menor a 25 kg.

Muestra también algunos detalles que debe tener el cople (medio cople) en donde va instalada la válvula de servicio.

Figura 1.2 - Vista esquemática del medio cople.



Tomado de NOM-008-SESH/SCFI-2010.

1.1.1.5 - Pruebas para tanques para gas L.P. según las normas oficiales mexicanas

Se ha hecho mención de algunas de las diferentes pruebas que deben ser realizadas a cada tanque según sus características y usos, así como las pruebas que se deben realizar cuando algún recipiente es sometido a reparación. A continuación se hace mención de algunas pruebas indicadas en las normas ya mencionadas.

Prueba hidrostática: Esta prueba consiste en llenar a presión el tanque con agua o un fluido no corrosivo. Para el caso de los tanques no transportables, según la norma NOM-009-SESH-2010, después de haber llenado el tanque con agua, se procede a conectar los accesorios para purgar o eliminar el aire dentro del tanque. Así mismo, se instala un manómetro en el tanque o en la línea de prueba para medir la presión a la que será sometido. Posteriormente se eleva la presión hasta llegar a una presión de por lo menos 1.3 veces la presión de diseño y se mantiene la presión el tiempo necesario para inspeccionar el tanque en busca de fugas en el material base y/o la soldadura. Esta prueba debe realizarse al 100% de los tanques que serán usados para contener gas L.P.

Prueba neumática: Para esta prueba se debe extraer toda el agua y los materiales extraños que haya dentro del tanque, se colocan todas las válvulas de servicio y seguridad y se somete a una presión neumática mínima de 0.686 MPa y se coloca jabonadura en todas las conexiones y accesorios en busca de fugas. Esta prueba también se puede realizar sumergiendo el tanque en agua. Esta prueba se debe realizar al 100% de los recipientes de tipo B, C y D no transportables.

Prueba ultrasónica: Según la NOM-013-SEDG-2002, a los recipientes que hayan sido reparados por abolladuras, protuberancias, incisiones, cavidades, grietas o por exceso de corrosión, deben ser sometidos a una prueba ultrasónica, con el fin de medir sus espesores. La prueba debe ser llevada a cabo con un equipo ultrasónico medidor de espesores con representación de lectura digital, o con pantalla de barrido tipo A, o equipo detector de fallas. El equipo debe ser de tipo pulso-eco para usar transductores que oscilan con frecuencias de 2.25 a 5 Mhz. El transductor debe ser de haz recto con uno o dos cristales. Y el rango de calibración será de dos veces el espesor nominal de la pieza a inspeccionar.

Figura 1.3 - Medición de espesor con ultrasonido.



<http://bminspecciones.com/wp-content/uploads/2015/06/BM-ensayos-no-destructivos-medicion-espesores-ultrasonido-1024x461.jpg>

Cuando los espesores encontrados sean igual o mayores al espesor límite calculado, el recipiente se considera ultrasónicamente apto para continuar operando.

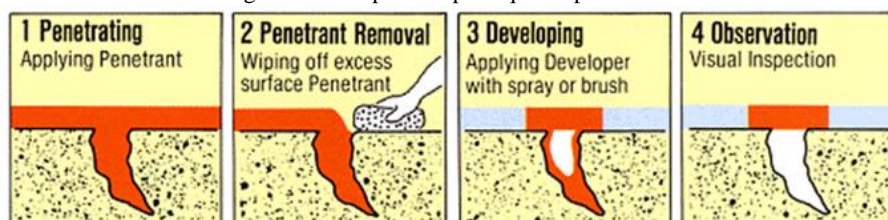
Cuando los espesores encontrados sean menores al espesor mínimo calculado, el recipiente se considera ultrasónicamente no apto para continuar operando.

Según la NOM-013-SEDG-2002, los recipientes de las plantas de almacenamiento, los autotanques y semirremolques, el espesor límite no podrá ser menor a 5.1 mm en cualquiera de sus casquetes.

Prueba por medio de líquidos penetrantes: Los recipientes que hayan sido reparados debido a una incisión, cavidad, grieta o por corrosión severa, deberán ser sometidos a una prueba de líquidos penetrantes o partículas magnéticas. Dicha prueba se debe realizar en el exterior del tanque, como mínimo en cinco cruces de soldadura de cada uno de los casquetes y la sección cilíndrica, así como en las zonas adyacentes a la zona de reparación.

Para llevar a cabo esta prueba se debe limpiar muy bien la superficie a inspeccionar, posteriormente se rocía con un líquido el cual debe tener la capacidad de penetrar en los poros y en las grietas que pueda tener la superficie, se procede a limpiar el exceso del penetrante y por último se rocía la superficie con un líquido revelador, el cual, al contrastar con el líquido penetrante, permite observar las grietas que pudiera tener el material.

Figura 1.4 - Inspección por líquidos penetrantes.



<https://grupotpq.weebly.com/liquidos-penetrantes.html>

Prueba por medio de partículas magnéticas: Esta prueba permite detectar grietas superficiales o internas en materiales ferromagnéticos y en soldaduras, con la limitante de que las grietas internas no se encuentren a una profundidad mayor a 1/4". Esta prueba se lleva a cabo con un yugo que genera un campo magnético en la pieza que se analiza, mientras el campo magnético está activo, se rocía partículas magnéticas, las cuales tomarán la forma del campo magnético mostrando abultamientos en las zonas con grietas. Esta prueba sólo puede detectar grietas que se encuentren perpendiculares al campo magnético. Se pueden usar partículas fluorescentes que combinadas con luz negra ayudan a tener un mejor contraste.

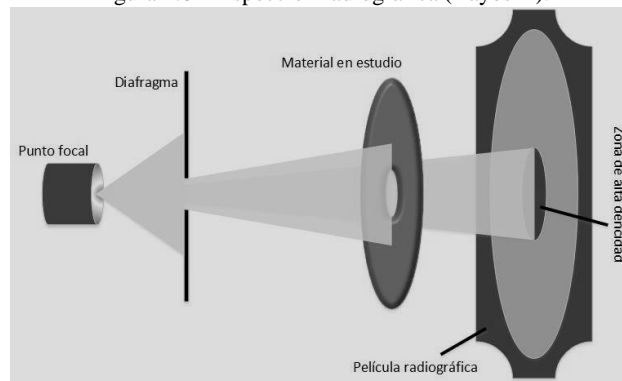
Figura 1.5 - Inspección por partículas magnéticas.



<http://www.galgacontrol.com/images/ca8.jpg?crc=501439395>

Prueba radiográfica: A los recipientes que por reparación se haya aplicado soldadura, deberán ser sometidos a una prueba radiográfica, dicha prueba se debe realizar en las áreas de reparación por incisión o grieta, así como al 100% de la soldadura que haya sido aplicada durante la reparación, según corresponda.

Figura 1.6 - Inspección radiográfica (Rayos X).



Todos los recipientes que hayan sido expuestos al fuego por incendio, deben someterse a las siguientes pruebas:

- Prueba hidrostática
- Prueba ultrasónica
- Prueba radiográfica
- Prueba de dureza de materiales (mínimo en 6 puntos del área afectada)
- Réplicas metalográficas (mínimo en 4 puntos del área afectada)

Todos los recipientes que en cuya reparación se haya aplicado soldadura, deben ser sometidos a un tratamiento térmico de conformidad con las especificaciones que establezca la normatividad aplicable.

Según la NOM-008-SESH/SCFI-2010, para los tanques transportables (cilindros) se puede optar por realizar la prueba hidrostática o la prueba neumática, siempre que se respeten las siguientes indicaciones:

Si se realiza prueba hidrostática, se debe llenar el tanque con agua y proceder a elevar la presión hasta alcanzar los 3.33 MPa y mantener ésta presión durante un lapso de 30 segundos como mínimo. La prueba se debe realizar al 100% de los recipientes.

Para la prueba neumática en cilindros, se debe colocar el recipiente en una cámara de prueba blindada, posteriormente se eleva la presión interna del recipientes hasta alcanzar los 3.33 MPa, y se mantiene la presión por un lapso mínimo de 10 segundos. Finalmente se reduce la presión hasta los 1.66 MPa, se saca el recipiente de la cámara de prueba y se sumerge en agua en busca de posibles fugas. La prueba se debe realizar al 100% de los recipientes.

Para ambas pruebas el recipiente no deberá presentar fugas o deformaciones permanentemente visibles.

Prueba de hermeticidad: Esta prueba se realiza a cilindros con la válvula de servicio ya instalada. Se procede a conectar el cilindro con el aparato para prueba neumática con una conexión flexible. Se sumerge el tanque en agua y se procede a elevar la presión dentro de él. La presión mínima debe ser de 0.69 MPa y se cierra la válvula a modo de mantener la presión por un lapso mínimo de 10 segundos. Finalmente se prosigue a inspeccionar la superficie del recipiente. La prueba debe ser realizada al 100% de los recipientes.

I.2 - Importancia de los accesorios en los tanques para gas

Todos los tanques, ya sean transportables o estacionarios, cuentan con accesorios. Algunos, como en el caso de los cilindros, cuentan únicamente con una válvula de servicio colocada en la parte superior del cilindro, enroscada en un cople de acero (medio cople) con cuerda cónica NPT 3/4". (Ver figura 1.2).

Figura 1.7 Esquema de ensamble de medio cople.



Tomado y editado de NOM-008-SESH/SCFI-2010.

En el caso de los tanques estacionarios, la cantidad de accesorios dependerá del tipo y uso que tenga. Por ejemplo; un tanque estacionario con capacidad de 120 litros, normalmente cuenta con una válvula de llenado, una válvula de seguridad por sobre llenado, una válvula de servicio, y un indicador de nivel. En la figura se muestra, de izquierda a derecha, la válvula de servicio a la cual se encuentra conectado un regulador de presión, en seguida un indicador de nivel, una válvula de seguridad y la válvula de llenado. Todos los aditamentos y accesorios del tanque están instalados por medio de coples que pueden ser de roscado cónico o roscado recto.

Figura 1.8 - Válvulas e indicador instalados en tanque estacionario.



En algunas ocasiones el medidor es instalado con 4 tornillos por medio de una brida.

Figura 1.9 - Indicador de nivel instalado en tanque estacionario con brida.



La cantidad de válvulas y accesorios que necesita un tanque estacionario dependerá de los usos y requerimientos que éste tenga. No debe confundirse los accesorios del tanque estacionario, con los accesorios que se instalan en las líneas de llenado o en las líneas de servicio.

En cualquiera de los casos, los coples en donde se instalan los indicadores y los indicadores mismos, deben soportar cada una de las pruebas a las que son sometidos los tanques, es por ello que, en su diseño y fabricación es de gran importancia cuidar algunos detalles como la composición química, y las temperaturas de trabajo en caso de ser forjado.

La composición química y las propiedades mecánicas de los metales están estrechamente relacionados. En la tabla 1 se indican algunas propiedades mecánicas y las composiciones químicas de los aceros usados para la fabricación de tanques estacionarios de tipo A, B, C y D. Es decir que éstos tanques pueden ser fabricados con cualquiera de los materiales indicados en la tabla 1. La composición química del cople debe ser compatible con la del tanque y la soldadura que unirá a ambos.

Tabla 1.1 - Especificaciones de aceros para recipientes de tipo A, B, C, y D.

		Tipo 1 (SA-285-C)	Tipo 2 (SA-516-70)		Tipo 3 (SA-455) *			Tipo 4 (SA-512)		Tipo 5 (SA-414G)
			ESPESOR Hasta 12.5 mm	ESPESOR >12.5 a 50 mm	ESPESOR Hasta 9.5 mm	ESPESOR >9.5 a 15 mm	ESPESOR >15 a 20 mm	ESPESOR Hasta 12.5 mm	ESPESOR > 12.5 a 25 mm	ESPESOR Hasta 12.5 mm
Tensión (MPa)		380 - 515	485 - 620	485 - 620	515 - 655	505 - 640	485 - 620	570 - 725	560 - 695	515 - 655
Cedencia mín. (MPa)		205	260	260	260	255	240	345	345	310
Elong. mín. en 200 mm (%)		23	17	17	10	10	10	16	16	10
Elong. mín. en 50 mm (%)		27	21	21	14	14	14	22	22	14
Carbono (% máx.)	Col.	0.28	0.27	0.28	0.33	0.33	0.33	0.25	0.25	0.31
	Prod.	0.28	0.27	0.28	0.33	0.33	0.33	0.29	0.29	0.31
Manganeso (%)	Col.	0.90 máx	0.85 - 1.20	0.85 - 1.20	0.85 - 1.35	0.85 - 1.35	0.85 - 1.35	1.00 - 1.50	1.00 - 1.50	1.35 máx
	Prod.	0.98 máx	0.79 - 1.30	0.79 - 1.30	0.79 - 1.35	0.79 - 1.35	0.79 - 1.35	0.92 - 1.62	0.92 - 1.62	1.35 máx
Fósforo (% máx.)	Col.	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Prod.	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Azufre (% máx.)	Col.	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Prod.	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Silicio (%)	Col.		0.15 - 0.40	0.15 - 0.40	0.40 máx	0.40 máx	0.40 máx	0.15 - 0.50	0.15 - 0.50	0.30
	Prod.		0.13 - 0.45	0.13 - 0.45	0.45 máx	0.45 máx	0.45 máx	0.13 - 0.55	0.13 - 0.55	0.30
Cobre (% máx.)	Col.							0.035	0.035	
	Prod.							0.038	0.038	
Níquel (% máx.)	Col.							0.25	0.25	
	Prod.							0.28	0.28	
Cromo (% máx.)	Col.							0.25	0.25	
	Prod.							0.29	0.29	
Molibdeno (% máx.)	Col.							0.08	0.08	
	Prod.							0.09	0.09	
Vanadio (% máx.)	Col.							0.08	0.08	
	Prod.							0.09	0.09	

* Cuando el silicio es mayor que 0.10% en colada, el contenido máximo de carbono debe ser de 0.28%.

Tomado de la NOM-009-SESH-2011.

La NOM-009-SESH-2011 dice que a todos los tanques, una vez terminado el proceso de soldadura, deben pasar por un tratamiento térmico, el cual dependerá del de material que se haya usado para su fabricación (ver tabla 1.2).

Tabla 1.2 - Tratamiento térmico después de soldadura para aceros al carbón.

Materiales*	Temperatura mínima mantenida en K (°C)	Tiempo mínimo por cada 25.4 mm de espesor (horas)
Acero Tipo 1	866.15 (593)	1
Acero Tipo 2	866.15 (593)	1
Acero Tipo 3	866.15 (593)	1
Acero Tipo 4	811.15 (538)	1
Acero Tipo 5	866.15 (593)	1

Tomado de NOM-009-SESH-2011.

Para la fabricación de los tanques estacionarios de tipo E, la norma indica que la composición química y las propiedades mecánicas del material deben corresponder a la siguiente tabla.

Tabla 1.3 - Composición química de aceros para tanques tipo E.

		TEMPERATURA: 244.15 a 423.15 K (-29 a 150°C)		TEMPERATURA: 244.15 a 423.15 K (-29 a 150°C)		TEMPERATURA: 233.15 a 423.15 K (-40 a 150°C)	
		TIPO 1P		TIPO 2P		TIPO 3P	
		Hasta 12.5 mm	12.5 < t ≤ 50 mm	Hasta 65 mm	65 < t ≤ 100 mm	Hasta 35 mm	35 < t ≤ 50 mm
Tensión (MPa)		485 - 520	485 - 520	485 - 520	450 - 585	530 - 630	500 - 600
Cedencia mín. (MPa)		260	260	345	310	375	355
Elong. mín. en 200 mm (%)		17	17	N/A	N/A	17	17
Elong. mín. en 50 mm (%)		21	21	22	22	21	21
Impacto Trans a 233.15 K (-40°C) (J)		20	20	20	20	21	21
Carbono (% máx.)	Colada	0.27	0.28	0.24	0.24	0.20	0.20
	Producto	0.27	0.28	0.24	0.24	0.20	0.20
Manganeso (%)	Colada	0.85 - 1.20	0.85 - 1.20	0.70 - 1.35	1.00 - 1.60	1.0 - 1.60	1.0 - 1.60
	Producto	0.75 - 1.30	0.75 - 1.30	0.64 - 1.46	0.92 - 1.72	1.0 - 1.60	1.0 - 1.60
Fósforo (% máx.)	Colada	0.035	0.035	0.035	0.035	0.030	0.030
	Producto	0.035	0.035	0.035	0.035	0.030	0.030
Azufre (% máx.)	Colada	0.035	0.035	0.035	0.035	0.020	0.020
	Producto	0.035	0.035	0.035	0.035	0.020	0.020
Silicio (%)	Colada	0.15 - 0.40	0.15 - 0.40	0.15 - 0.50	0.15 - 0.50	0.50 (máx.)	0.50 (máx.)
	Producto	0.13 - 0.45	0.13 - 0.45	0.13 - 0.55	0.13 - 0.55	0.50 (máx.)	0.50 (máx.)
Niobio (%)	Colada	-	-	-	-	0.02 - 0.05	0.02 - 0.05
	Producto	-	-	-	-	0.02 - 0.05	0.02 - 0.05
Cobre (% máx.)	Colada	-	-	0.35	0.35	Nota 2	Nota 2
	Producto	-	-	0.38	0.38	-	-
Níquel (% máx.)	Colada	-	-	0.25	0.25	Nota 2	Nota 2
	Producto	-	-	0.28	0.28	-	-
Cromo (% máx.)	Colada	-	-	0.25	0.25	Nota 2	Nota 2
	Producto	-	-	0.29	0.29	-	-
Molibdeno (% máx.)	Colada	-	-	0.08	0.08	Nota 2	Nota 2
	Producto	-	-	0.09	0.09	-	-

Tomado de NOM-009-SESH-2011

Todos los tipos de materiales enunciados en esta tabla sin importar su espesor deberán tratarse térmicamente para lograr una estructura metalográfica de grano fino.

La composición química de las boquillas debe ser compatible con la composición del cuerpo del tanque y la soldadura. En la tabla 3 se muestra la composición química indicada para los aceros que deben usarse para la fabricación de las boquillas de los tanques tipo E.

Tabla 1.4 Propiedades mecánicas y composición química de aceros destinados a boquillas de tanques tipo E.

TEMPERATURA DE 233.15 a 423.15 K (- 40 a 150°C)		TEMPERATURA DE 244.15 a 423.15 K (- 29 a 150°C)
PROPIEDADES MECANICAS (MATL. TIPO 1T)		PROPIEDADES MECANICAS (MATL. TIPO 2T)
PUNTO DE CEDENCIA MINIMO 240 MPa		PUNTO DE CEDENCIA MINIMO 240 MPa
RESISTENCIA MINIMA A LA TENSION 415 MPa		RESISTENCIA MINIMA A LA TENSION 415 MPa
ELONGACION 35%		ELONGACION 30%
COMPOSICION QUIMICA		COMPOSICION QUIMICA
Elemento	Composición, %	Composición, %
Carbono	0.30 máx. (ver nota 1)	0.30 máx. (ver nota 2)
Manganeso	0.29 - 1.06	0.29 - 1.06
Fósforo	0.025 máx.	0.035 máx.
Azufre	0.025 máx.	0.035 máx.
Silicio	0.10 min.	0.10 min.
Cobre	.....	0.40 máx. (ver nota 3)
Níquel	.....	0.40 máx. (ver nota 3)
Cromo	.....	0.40 máx. (ver nota 3)
Molibdeno	.....	0.15 máx. (ver nota 3)
Vanadio	.....	0.08 máx. (ver nota 3)

Tomado de NOM-009-SESH-2011

En el siguiente apartado se exponen algunos conceptos importantes relacionados a la forja, y a la fabricación de tanques estacionarios. Así mismo, se muestran algunas características que deben poseer los materiales para la fabricación de piezas forjadas.

II. Marco Teórico

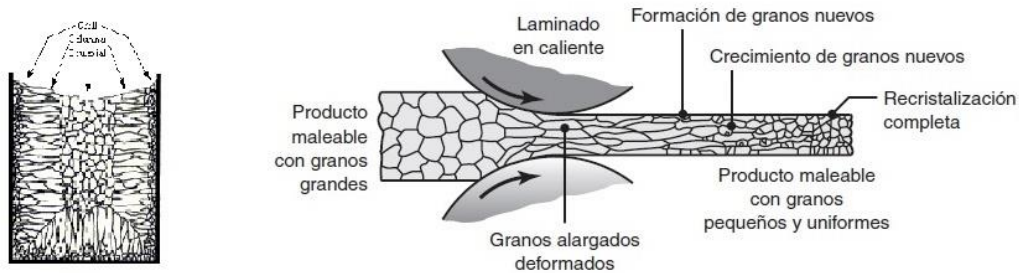
En este apartado se exponen algunos conceptos relacionados con la forja, la composición química, diseño y fabricación de los coples de acero, cabezas de latón y los tanques estacionarios. Se explican a grandes rasgos, algunos procesos por los cuales pasan los tanques antes de ser probados y lanzados al mercado.

II.1 - La forja

Varios autores coinciden en el concepto básico de la forja, sin embargo, algunos detallan los procesos que se deben llevar a cabo antes y después de la forja.

La forja es uno de los procesos de moldeo frecuentemente usado para dar forma y mejorar las propiedades mecánicas de una pieza de metal. La forma inicial de esta pieza de metal comúnmente se encuentra como lingote, tocho o simplemente como una pieza de metal en bruto. Los lingotes son piezas de metal fundido enfriado en condiciones normales, es decir que se deja enfriar de forma natural, sin acelerar su proceso de solidificación. Debido al gran tamaño que llegan a tener dichos lingotes, el enfriamiento puede tomar varios días. Esto hace que los granos que conforman el metal sean demasiado grandes y formen estructuras dendríticas a todo lo largo y ancho del lingote (figura ----). El metal en esta presentación no presenta buenas propiedades mecánicas. Es por ello que para mejorar sus propiedades es necesario “prepararlo”.

Figura 2.1 – a) Estructura dendrítica de lingote. b) Destrucción de estructura dendrítica.



Tomado y editado de: Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*.

Para mejorar las propiedades mecánicas del metal, es necesario destruir su estructura dendrítica. Esto se logra con trabajo en caliente.

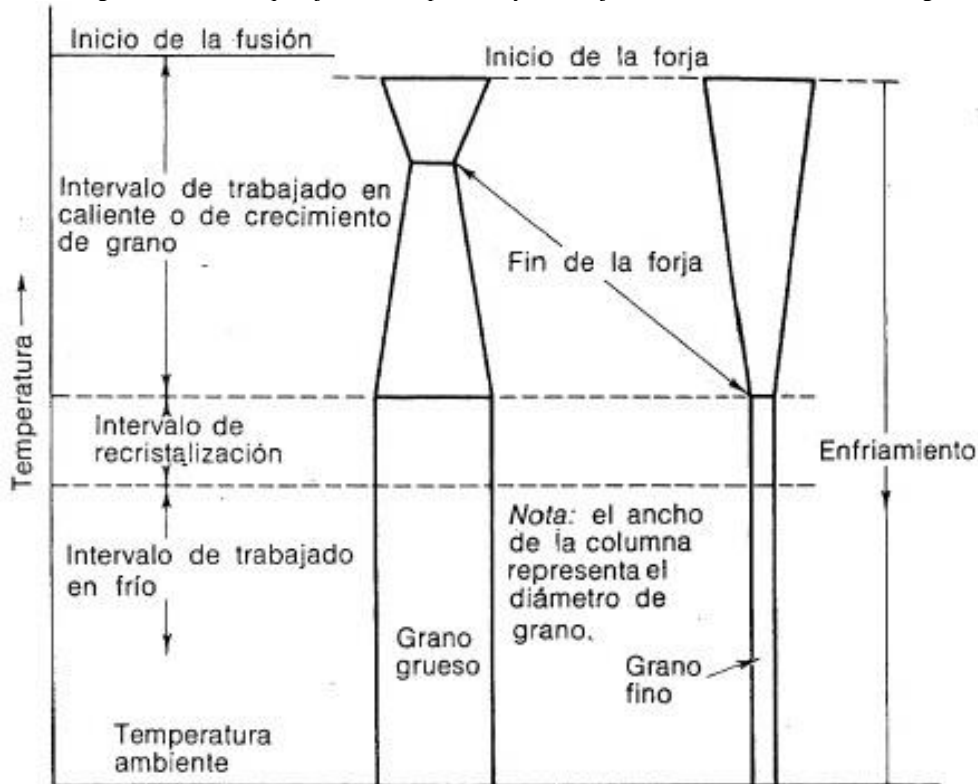
El trabajo en caliente generalmente se describe como la deformación de un material a temperaturas por encima de su temperatura de recrystalización.

El trabajo en caliente comienza con el calentamiento de la pieza de metal, posteriormente se hace pasar por una serie de rodillos de perímetro dentado que deforman el material dando un efecto de amasado que después de pasar por varias reducciones logra penetrar hasta el núcleo del tocho. Todo este trabajo hace que los granos con estructura dendrítica se deformen, y posteriormente, la temperatura hace que dichos granos se dividan para formar nuevos granos de menor tamaño que comienzan a crecer mientras el tocho se encuentra a temperaturas mayores a la de recrystalización.

George E. Dieter menciona que el trabajo en caliente se define como la deformación en condiciones de temperatura en las que los procesos de recuperación y la tasa de deformación tienen lugar simultáneamente. En el trabajo en caliente, el endurecimiento por deformación y la estructura de grano distorsionada producida por la deformación se eliminan muy rápidamente por la formación de nuevos granos como resultado de la recrystalización.

La temperatura a la cual se termina el trabajo en caliente determinará el tamaño de grano disponible para el trabajo ulterior en frío. Inicialmente se utilizan temperaturas más altas para promover la uniformidad en el material, y los grandes granos resultantes permiten una reducción en dimensiones más económicas durante la primera parte del trabajo subsecuente. Conforme el material se enfría y el trabajo continúa, el tamaño de grano disminuirá, llegando a ser muy fino justo arriba de la temperatura de recrystalización.

Figura 2.2 - Efecto que ejerce la temperatura y el trabajo en caliente sobre el tamaño de grano.



Fuente: Avner, S. H., & Aracama, L. L. (1966). Introducción a la metalurgia física.

Sydney H. Avner dice que el trabajo en caliente no solo resulta en una disminución de la energía requerida para deformar el metal y en una mayor capacidad de fluir sin agrietarse, sino que la rápida difusión a temperaturas de trabajo en caliente ayuda a mejorar la homogeneidad química de la estructura del lingote fundido.

Cuando el material ha perdido la estructura dendrítica, se corta al tamaño necesario para ser forjado. El metal puede ser forjado por impacto o presión. Cuando se realiza forja por impacto con martillos, las partes pueden ser troqueladas. Para dar la forma a las piezas se pueden usar distintas matrices o dados. Los dados pueden ser planos, ligeramente en forma, o con preforma, o tener una impresión cerrada. La forja se lleva a cabo con prensas de distintos tipos, sin embargo, hoy en día el mayor trabajo se realiza en prensas hidráulicas.

La forja permite la reducción de peso muerto en las piezas. La buena relación resistencia/peso permite la reducción en las dimensiones de las piezas sin sacrificar su resistencia. El resultado, a menudo, es la mejora en el diseño de los productos.

Forjar formas uniformes con tolerancias dimensionales más exactas puede eliminar las operaciones de mecanizado. También resulta en una reducción en la cantidad de tiempo de mecanizado requerido para el acabado necesario.

Debido a que es posible controlar el flujo de metal en una matriz y la estructura de los granos del material, las partes forjadas obtienen buena resistencia y tenacidad y son muy confiables en aplicaciones críticas sujetas a grandes esfuerzos.

El diseño y el control de los procesos de formado dependen de la comprensión de las características del material a trabajar, las condiciones en la interfaz de la herramienta y la pieza, la mecánica de la deformación plástica (flujo de metal), el equipo utilizado y los requisitos del producto terminado. Estos factores influyen en la selección de la geometría y el material de la herramienta, así como en las condiciones de procesamiento (por ejemplo, la temperatura de la pieza y del troquel, y la lubricación).

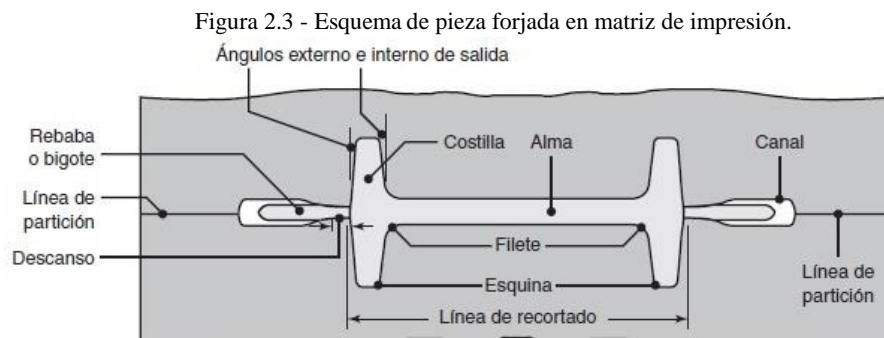
La forja en frío es un proceso en el cual el material es deformado a temperaturas que van de la temperatura ambiente hasta varios cientos de grados, pero siempre por debajo de la temperatura de recristalización. La temperatura dependerá del material. Se puede llevar a cabo con prensas, dados,

matrices y/o martillos. Es importante destacar que mientras mayor sea la deformación que sufre un metal a temperatura ambiente, mayor será la fuerza necesaria para continuar la deformación. Esto se debe a que las dislocaciones van interfiriendo unas a otras, incrementando con ello la resistencia a la deformación. La forja en frío proporciona un mejor acabado en comparación con la forja en caliente debido a que la formación de óxidos en la superficie de la pieza es nula; Algo que es inevitable cuando se realiza trabajo en caliente.

El acero de bajo carbono es ideal para ser forjado en frío, debido a que presenta una estructura de solución sólida homogénea. Debido a la baja concentración de carbono en su estructura, el material no opone mucha resistencia a la deformación hasta que sufre una deformación considerablemente alta. Después de dicha deformación, el material necesita un mayor esfuerzo para ser deformado nuevamente. Esto debido a que la acumulación de dislocaciones dentro del material es tal que comienzan a obstruirse entre ellas, dando como resultado el endurecimiento del material.

La forja en matriz abierta se lleva a cabo con martillos o prensas que dan forma a las piezas mediante golpes o someténdolas a presión con matrices planas. Se puede realizar en frío o en caliente dependiendo de las propiedades de material a forjar. Se pueden forjar piezas pequeñas como clavos, pernos o tornillos o piezas grandes como cigüeñales para motores de barcos que pueden llegar a pesar 300 toneladas. La forja en matriz abierta o forja de matriz plana generalmente se usa para dar forma a piezas simples.

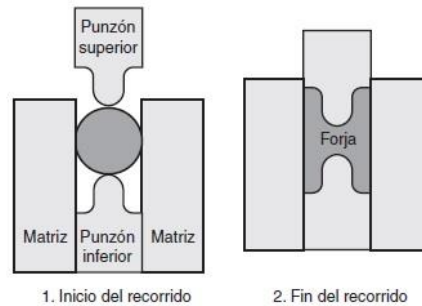
La forja por matriz de impresión. En el forjado por matriz de impresión, la pieza de trabajo toma la forma de la cavidad de la matriz mientras se va forjando entre dos matrices con forma. Por lo general, este proceso se realiza a temperaturas elevadas para mejorar la ductilidad de los metales y disminuir las fuerzas. Durante la deformación, parte del material fluye hacia el exterior y forma unos *bigotes o rebaba de forja*. La rebaba desempeña un papel importante en el forjado por matriz de impresión. La temperatura elevada y la alta resistencia a la fricción resultante en la rebaba representan una severa restricción al flujo exterior del material en la matriz. Por lo tanto, con base en el principio de que en la deformación plástica los materiales fluyen hacia donde hay menor resistencia (debido a que requiere menos energía), el material empieza a fluir al interior de la cavidad de la matriz, llenándola finalmente.



Fuente: Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología.

La forja en matriz cerrada. Al proceso mostrado anteriormente también se le conoce como *forjado en matriz cerrada*. Sin embargo, en éste no se forma rebaba (de ahí el término *forjado sin rebaba*) y la pieza de trabajo llena la cavidad de la matriz. Por consiguiente, la presión de forjado es muy alta. Son fundamentales el control preciso del volumen de la pieza en bruto y el diseño adecuado de la matriz para producir un forjado con las tolerancias dimensionales deseadas (ver figura 2.4). Las piezas en bruto subdimensionadas evitan el llenado de la cavidad de la matriz; por el contrario, las piezas sobredimensionadas generan presiones excesivas y pueden hacer que las matrices fallen de manera prematura o que la máquina se atasque.

Figura 2.4 - Forja de matriz cerrada.



Fuente: Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología

Lubricación. Muchos trabajos pueden realizarse en seco, pero con el uso de un lubricante se obtienen mejores resultados y una vida más larga de las matrices. A presiones moderadas, casi cualquier lubricante líquido viscoso hará un buen trabajo. La protección contra la oxidación y la fácil eliminación del lubricante son a menudo factores importantes para su elección. Los lubricantes para metalurgia a menudo se clasifican según el coeficiente de fricción de su interfaz, que depende del material de la pieza de trabajo y del lubricante que se utiliza.

Se puede usar un revestimiento anodizado para aluminio como alojamiento para el lubricante. Algunas veces un tratamiento químico de este tipo más un barniz o recubrimiento de plástico y un lubricante es efectivo para operaciones de embutido. La principal razón es evitar que la soldadura por presión local comience como abrasión o adherencia, con el consiguiente rayado, manteniendo una separación de película fluida entre las superficies metálicas.

Se usa aceite de manteca o de esperma cuando se perfora hierro, acero o cobre. La vaselina se utiliza para dibujar aluminio. Una solución jabonosa se usa comúnmente para extraer latón, cobre o acero. Algunos fabricantes utilizan 90 por ciento de aceite mineral, 5 por ciento de colofonia y 5 por ciento de ácido oleico para trabajo ligero y una emulsión de aceite mineral, degrás (aceite de pescado y ácido nítrico) y un pigmento que consiste en tiza, azufre o litopón para trabajo pesado.

Para operaciones de estirado pesado y extrusión, los aceros pueden tener un revestimiento de fosfato de zinc adherido y un estearato de zinc o sodio adherido a eso, para soportar presiones de más de 300,000 lb / in².

Tabla 2.1 – Lubricantes típicos y coeficientes de fricción en deformación plástica.

Workplace material	Working	Forging		Extrusion† lubricant	Wire drawing		Rolling		Sheet metalworking	
		Lubricant	μ		Lubricant	μ	Lubricant	μ	Lubricant	μ
Sn, Pb, Zn alloys		FO-MO	0.05	FO or soap	FO	0.05	FA-MO or MO-EM	0.1	FO-MO	0.05
	Hot or warm	GR and/or MoS ₂	0.1–0.2	None			MO-FA-EM	0.2	GR in MO or dry soap	0.1–0.2
Al alloys	Hot	GR or MoS ₂	0.1–0.2	None			MO-FA-EM	0.2		
	Cold	FA-MO or dry soap	0.1	Lanolin or soap on PH	FA-MO-EM, FA-MO	0.1, 0.03	1–5% FA in MO(1–3)	0.03	FO, lanolin, or FA-MO-EM	0.05–0.1
Cu alloys	Hot	GR	0.1–0.2	None (or GR)			MO-EM	0.2		
	Cold	Dry soap, wax, or tallow	0.1	Dry soap or wax or tallow	FO-soap-EM, MO	0.1, 0.03	MO-EM	0.1	FO-soap-EM or FO-soap	0.05–0.1
Steels	Hot	GR	0.1–0.2	GL (100–300), GR			None or GR-EM	ST‡, 0.2	GR	0.2
	Cold	EP-MO or soap, on PH	0.1, 0.05	Soap on PH	Dry soap or soap on PH	0.05, 0.03	10% FO-EM	0.05	EP-MO, EM, soap, or polymer	0.05–0.1
Stainless steel, Ni and alloys	Hot	GR	0.1–0.2	GL (100–300)			None	ST‡	GR	0.2
	Cold	CL-MO or soap on PH	0.1, 0.05	CL-MO or soap on PH	Soap on PH or CL-MO	0.03, 0.05	FO-CL-EM or CL-MO	0.1, 0.05	CL-MO, soap, or polymer	0.1
Ti alloys	Hot	GL or GR	0.2	GL (100–300)				GR, GL	0.2	
	Cold	Soap or MO	0.1	Soap on PH	Polymer	0.1	MO	0.1	Soap or polymer	0.1

* Some more frequently used lubricants (hyphenation indicates that several components are used in the lubricant):
 CL – chlorinated paraffin
 EM – emulsion; listed lubricating ingredients are finely distributed in water
 EP – “extreme-pressure” compounds (containing S, Cl, and P)
 FA – fatty acids and alcohols, e.g., oleic acid, stearic acid, stearyl alcohol
 FO – fatty oils, e.g., palm oil and synthetic palm oil
 GL – glass (viscosity at working temperature in units of poise)
 GR – graphite, usually in a water-base carrier fluid
 MO – mineral oil (viscosity in parentheses, in units of centipoise at 40°C).
 PH – phosphate (or similar) surface conversion, providing keying of lubricant
 † Friction coefficients are misleading for extrusion and therefore are not quoted here.
 ‡ The symbol ST indicates sticking friction.

Fuente: Avallone, E., & Baumeister, T. (1996). Mark's standard handbook for mechanical engineers.

El coeficiente de fricción μ de la interfaz a menudo se define como la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal en la interfaz. En la tabla 2.1 se muestran los valores típicos de μ para diferentes pares de piezas.

Ángulos de salida. El calado, o cono, se agrega a las paredes laterales rectas de una forja para permitir un retiro más fácil de la impresión del dado. Las piezas forjadas que tienen secciones transversales redondas u ovaladas o paredes laterales inclinadas forman su propio calado. Las forjas que tienen paredes laterales rectas, como secciones cuadradas o rectangulares, pueden forjarse separándolas a través de la diagonal e inclinando la impresión en el troquel para que la línea de separación sea paralela al plano de forja. Otro método es colocar la línea de separación en ángulo con el plano de forja y mecanizar una cavidad de pared recta y un contrabloqueo en cada matriz. Si se usan expulsores o expulsiones de troquel, se pueden minimizar los ángulos de tiro. Los ángulos de salida utilizados en las impresiones de matrices normalmente varían de 3 a 7 ° para las paredes externas de la forja. Las superficies que rodean los orificios o los rebajes tienen ángulos de tiro de 5 a 10 °. Se utiliza más calado en las paredes que rodean los huecos para evitar que la forja se adhiera a la matriz como resultado de la contracción natural del metal a medida que se enfría.

II.1.1 - Colada continua

La colada continua de acero está entrando en una nueva era de desarrollo, no solo con respecto a su creciente aplicación en el proceso de producción, sino también en su propia evolución como proceso y su interacción con otros procesos en la fabricación de acero. La producción de colada continua ha mostrado una curva de crecimiento acelerada. Más del 50% de la producción mundial actual de acero se moldea continuamente, y la fundición continua en Japón supera el 80%.

El propósito de la fundición continua es eludir la fundición de lingotes convencional y moldear a una forma que sea directamente enrollable en los molinos de acabado. El uso de este proceso debe dar como resultado una mejora en el rendimiento, la condición de la superficie y la calidad interna del producto en comparación con el material hecho con lingotes.

El lanzamiento continuo implica la siguiente secuencia de operaciones:

- Entrega de metal líquido al hilo de fundición.
- Flujo de metal a través de un distribuidor (artesa) en el molde de fundición
- Formación de la sección fundida en un molde de cobre refrigerado por agua.
- Retirada continua de la colada del molde.
- Eliminación de calor adicional para solidificar el núcleo líquido de la pieza fundida mediante pulverización de agua más allá del molde
- Cortar a medida y quitar las secciones fundidas.

El acero fundido en una cuchara se entrega a un depósito por encima de la máquina de colada continua llamada “tandish”. El flujo de acero de la artesa hacia uno o más moldes de cobre enfriados por agua y con extremos abiertos se controla mediante una boquilla de varilla de tope o una disposición de válvula de compuerta deslizante.

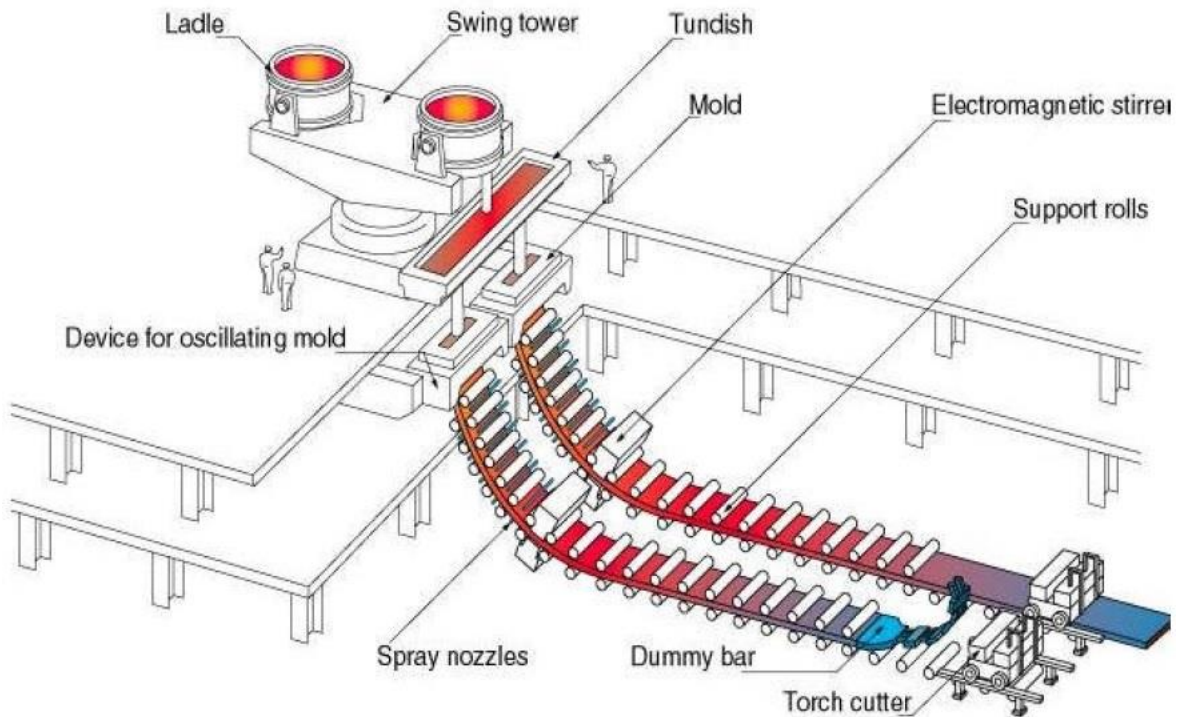
Para iniciar un molde, se inserta una barra de inicio o una barra de relleno en el molde y se sella de manera que el flujo inicial de acero esté contenido en el molde y se forme una capa sólida. Una vez que el molde se ha llenado a la altura deseada, la barra de relleno se retira gradualmente a la misma velocidad que el acero fundido se agrega al molde.

El acero líquido inicial se solidifica en un accesorio adecuado de la barra de relleno para que la hebra fundida pueda retirarse a través de la máquina. La solidificación de una concha comienza inmediatamente en la superficie del molde de cobre. La longitud del molde y la velocidad de fundición son tales que el grosor de la cubierta es capaz de soportar las presiones del núcleo de metal fundido al salir del molde de cobre.

Para evitar que la cubierta solidificada se pegue al molde de cobre, el molde normalmente oscila durante la operación de fundición y se agrega un lubricante al molde. La hebra de acero es soportada mecánicamente por rodillos debajo del molde donde se logra el enfriamiento secundario rociando agua de refrigeración sobre la superficie de la hebra para completar el proceso de solidificación.

Después de que la hebra se haya solidificado completamente, se secciona en las longitudes deseadas mediante un soplete o una antorcha de corte. Esta parte final de la máquina de colada continua también tiene provisión para el desenganche y almacenamiento de la barra de relleno.

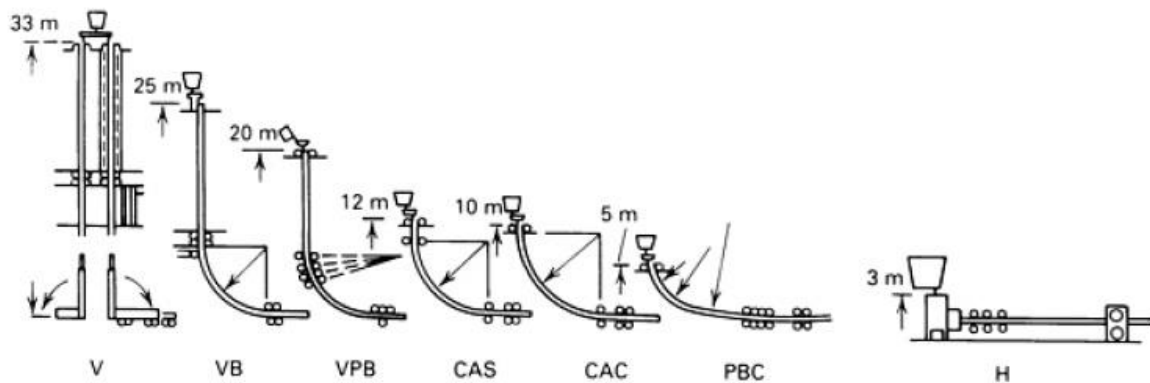
Figura 2.5 - Componentes básicos de una colada continua estándar.



Fuente: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, *Industrias I*.

En la actualidad existen varios arreglos en el uso comercial para la colada continua. En la Figura 2.6 se muestran ejemplos de los principales tipos de colada continua que actualmente producen palanquillas.

Figura 2.6 - Principales tipos de colada continua. V, vertical; VB, vertical con flexión; VPB, vertical con flexión progresiva; CAS, arco circular con molde recto; CAS, arco circular con molde curvado; PBC, flexión progresiva con molde curvado; H, horizontal.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 15, Casting.

El proceso para la colada continua del latón es llevado a cabo de la siguiente manera. El latón en estado líquido es vertido continuamente, en un molde abierto de grafito refrigerado por agua, y que determina la forma transversal. La longitud del producto no está restringida por el molde ya que mientras la aleación solidifica en el exterior, es deslizado con ayuda de rodillos. En algunas empresas el líquido es transferido a través de exclusas con presión de nitrógeno para ser extruido, esto ayuda reducir el tamaño de grano y a eliminar la posible aparición de escorias que más tarde podrían contaminar el lingote. A continuación se corta el lingote y para ser laminado hasta obtener las dimensiones necesarias para el trabajo en la forja.

Este proceso se puede realizar en colada horizontal o bien vertical. El material ya solidificado es refrigerado en el molde por agua, retirado por unos rodillos y finalmente cortado con las dimensiones adecuadas. El producto de la colada continua es el billet, tiene forma circular de entre 76 y 406 mm de diámetro y un peso entre 45 kg y 1905 kg.

II.1.2 – Prensas para forja

Las máquinas para forja se pueden clasificar de acuerdo con su principio de funcionamiento. Los martillos y las máquinas de forjado de alta tasa de energía deforman la pieza de trabajo por la energía cinética del martillo; Por lo tanto, se clasifican como máquinas de energía restringida. La capacidad de las prensas mecánicas para deformar el material de trabajo está determinada por la longitud de la carrera de la prensa y la fuerza disponible en varias posiciones de carrera. Por lo tanto, las prensas mecánicas se clasifican como máquinas con carrera restringida. Las prensas hidráulicas se denominan máquinas de fuerza restringida porque su capacidad para deformar el material depende de la capacidad máxima de fuerza de la prensa. Aunque son similares en construcción a las prensas mecánicas e hidráulicas, las prensas de tornillo se clasifican como máquinas de energía restringida.

Históricamente, los martillos han sido el tipo de equipo más utilizado para forjar. Son el tipo de equipo de forja menos costoso y más flexible en la variedad de operaciones de forja que pueden realizar. Los martillos son capaces de desarrollar grandes fuerzas y tienen tiempos de contacto cortos. Los componentes principales de un martillo son un ariete, un armazón, un yunque y una tapa de yunque. El yunque está conectado directamente al conjunto del bastidor, el troquel superior está unido al ariete y el troquel inferior está unido a la tapa del yunque.

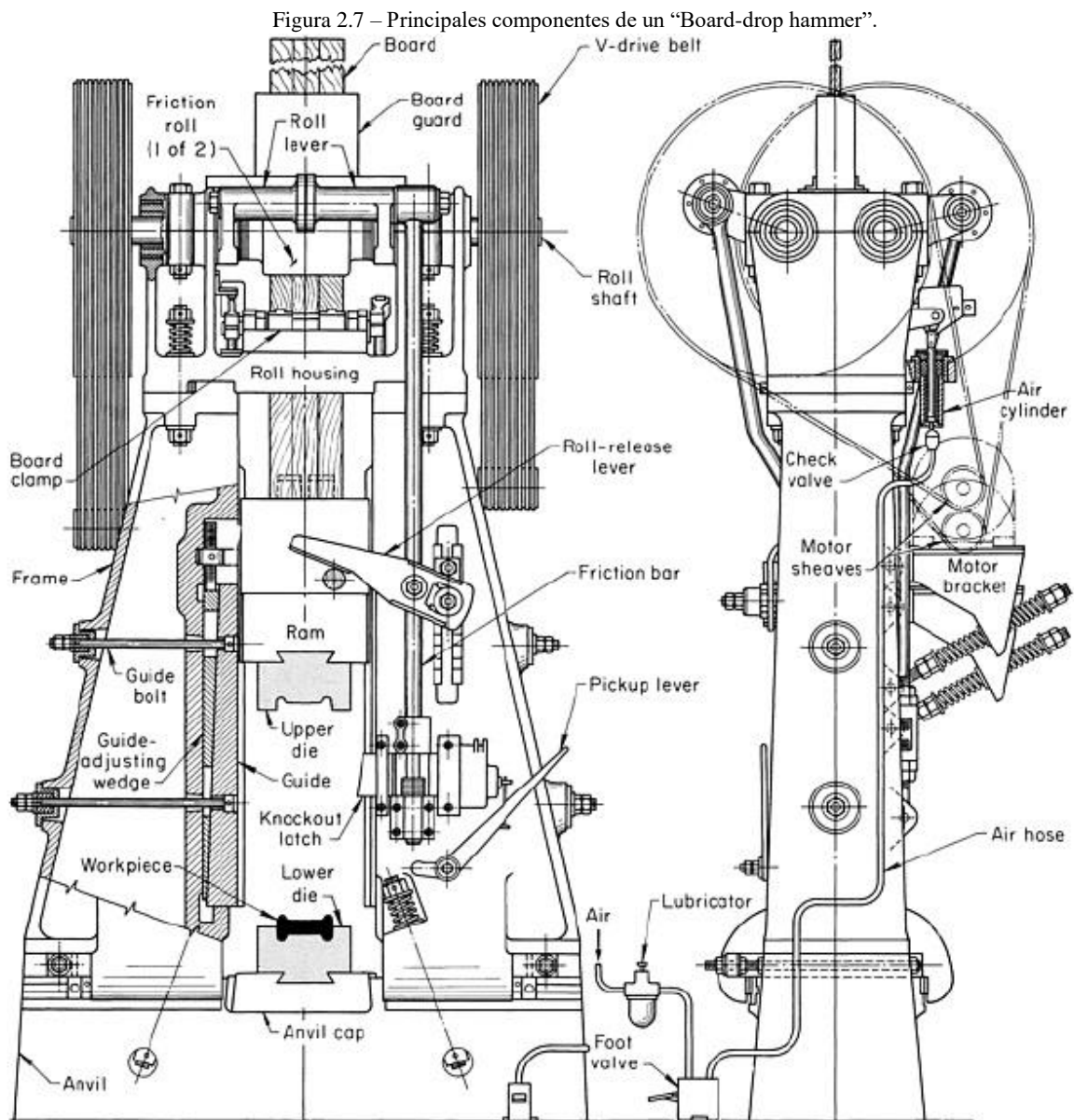
En funcionamiento, la pieza de trabajo se coloca en el troquel inferior. El ariete se mueve hacia abajo, ejerciendo una fuerza sobre el yunque y haciendo que la pieza de trabajo se deforme. Los martillos de forja se pueden clasificar de acuerdo con el método utilizado para empujar el ariete hacia abajo. En la siguiente tabla se muestran algunas capacidades de algunos tipos de martillos para forja.

Tabla 2.2 – Capacidades de algunos tipos de martillos para forja.

Type of hammer	Ram weight		Maximum blow energy		Impact speed		Number of blows per minute
	kg	lb	kJ	ft-lb	m/s	ft/s	
Board drop	45-3400	100-7500	47.5	35,000	3-4.5	10-15	45-60
Air or steam lift	225-7250	500-16,000	122	90,000	3.7-4.9	12-16	60
Electrohydraulic drop	450-9980	1000-22,000	108.5	80,000	3-4.5	10-15	50-75
Power drop	680-31,750	1500-70,000	1153	850,000	4.5-9	15-30	60-100

Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

Board-drop o Martillo pilón de caída libre. (Figura 2.7) Son ampliamente utilizados, especialmente para producir piezas forjadas que no pesan más de unos pocos kilogramos. En el martillo pilón de caída, el ariete se levanta mediante uno o más tableros que se introducen y pasan entre dos rodillos de fricción en la parte superior del martillo. Los rodillos hacen subir los tableros y luego se liberan mecánicamente, lo que permite que el ariete caiga desde la altura deseada. La potencia para levantar el ariete es suministrada por uno o más motores. Los martillos tienen un peso decreciente, o tamaño nominal, de 180 a 4500 kg (400 a 10,000 lb); Los tamaños estándar varían de 450 a 2250 kg (1000 a 5000 lb) en incrementos de 225 y 450 kg (500 y 1000 lb). La altura de caída del ariete varía con el tamaño del martillo, desde aproximadamente 900 mm (35 in.) Para un martillo de 180 kg (400 lb) hasta aproximadamente 2 m (75 in.) Para un martillo de 3400 kg (7500 lb). La altura de caída, y por lo tanto la fuerza de golpeo, del martillo es aproximadamente constante para un ajuste dado y no se puede alterar sin detener la máquina y ajustar la longitud de la carrera. Los yunques en los martillos de caída de tabla son 20 a 25 veces más pesados que los arietes.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

El **martillo de caída por gravedad de levantamiento de aire** es similar al martillo de caída de tablero en el que la fuerza de forjado se deriva del peso del conjunto de pistón descendente y del troquel superior. Se diferencia en que el ariete es elevado por aire o vapor. Mordazas de control de

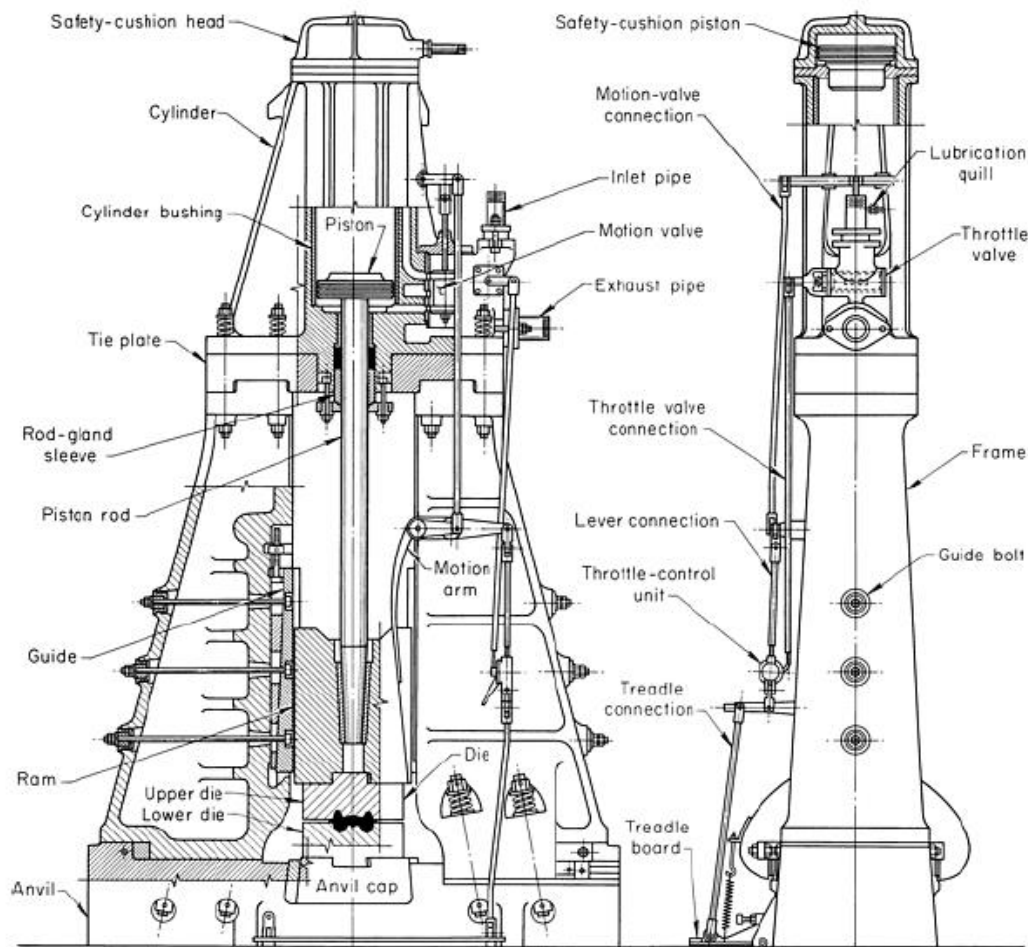
carrera, pre ajustado en un balancín y accionado por el ariete, controlan la potencia del cilindro del ariete. Con el martillo apagado, las mordazas se pueden reiniciar en el balancín para ajustar la longitud de la carrera. Hay dispositivos disponibles que permiten tanto una carrera larga como una carrera corta en una secuencia variable.

Martillos electrohidráulicos de caída por gravedad. En los últimos años, se han introducido dos innovaciones significativas en el diseño de martillos. El primero es el martillo electrohidráulico de caída por gravedad. En este tipo de martillo, el ariete se levanta con presión de aceite contra un colchón de aire. El aire comprimido ralentiza la carrera ascendente del ariete y contribuye a su aceleración durante el golpe descendente. Por lo tanto, el martillo de caída electrohidráulico también tiene una acción de martillo de potencia menor.

La segunda innovación en el diseño de martillos es el uso del control electrónico de energía de soplado. Dicho control permite al usuario programar la altura de caída del ariete para cada golpe individual. Como resultado, el operador puede establecer automáticamente el número de golpes que se desean para forjar en cada cavidad del troquel y la intensidad de cada golpe individual. El control electrónico del golpe aumenta la eficiencia de las operaciones del martillo y disminuye el ruido y la vibración asociados con golpes de martillo innecesariamente fuertes.

En un **martillo de potencia o Power-drop hammer**, el ariete se acelera durante la carrera descendente por medio de aire, vapor o presión hidráulica. Los componentes de un martillo de caída de potencia accionado por vapor o aire se muestran en la Figura 2.8. Este equipo se utiliza casi exclusivamente para forja de matriz cerrada (troquelado de impresión).

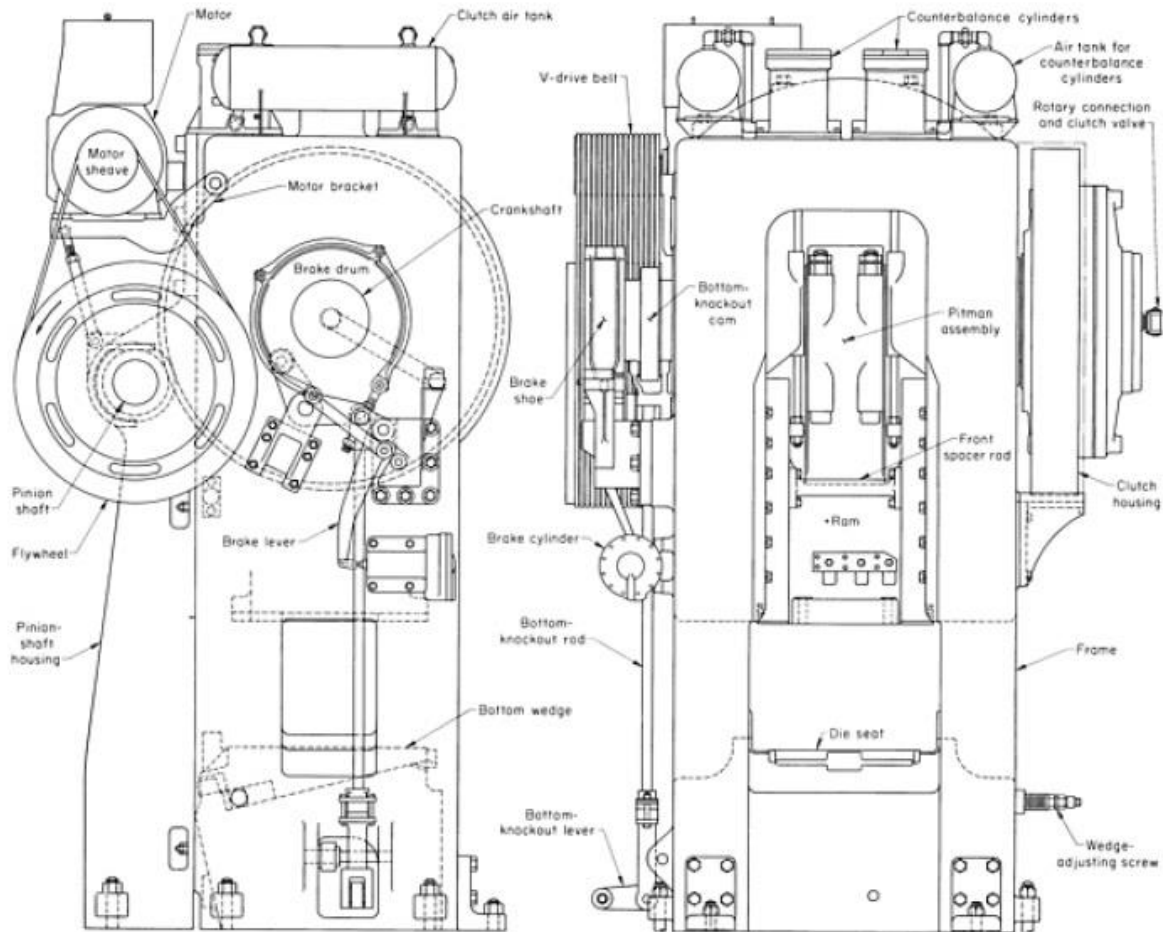
Figura 2.8 - Componentes principales de un martillo de potencia con control de pie para regular la fuerza del golpe.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

Prensas mecánicas para forja. Todas las prensas mecánicas emplean la energía de un volante, que se transfiere a la pieza de trabajo mediante una red de engranajes, excéntricos o palancas. Impulsadas por un motor eléctrico, y controladas por medio de un embrague tipo clutch, las prensas mecánicas tienen un tipo de eje de accionamiento totalmente céntrico que imparte una carrera de longitud constante a un pistón que opera verticalmente (Figura 2.9). Se utilizan varios mecanismos para traducir el movimiento giratorio del eje excéntrico en movimiento lineal para mover el ariete. El ariete se lleva la parte superior junto con el dado superior y se mantiene en esa posición, mientras que la parte inferior está sujeta al asiento del marco principal, y en este mismo se coloca el dado inferior. La carrera del ariete es más corta que la de un martillo de forja o una prensa hidráulica. La velocidad del ariete es mayor en el centro de la carrera, pero la fuerza es mayor en la parte inferior de la carrera. Las capacidades de estas prensas de forja se clasifican según la fuerza máxima que pueden aplicar y van desde aproximadamente 2.7 a 142 MN (300 a 16,000 tonf).

Figura 2.9 – Componentes principales de una prensa mecánica.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

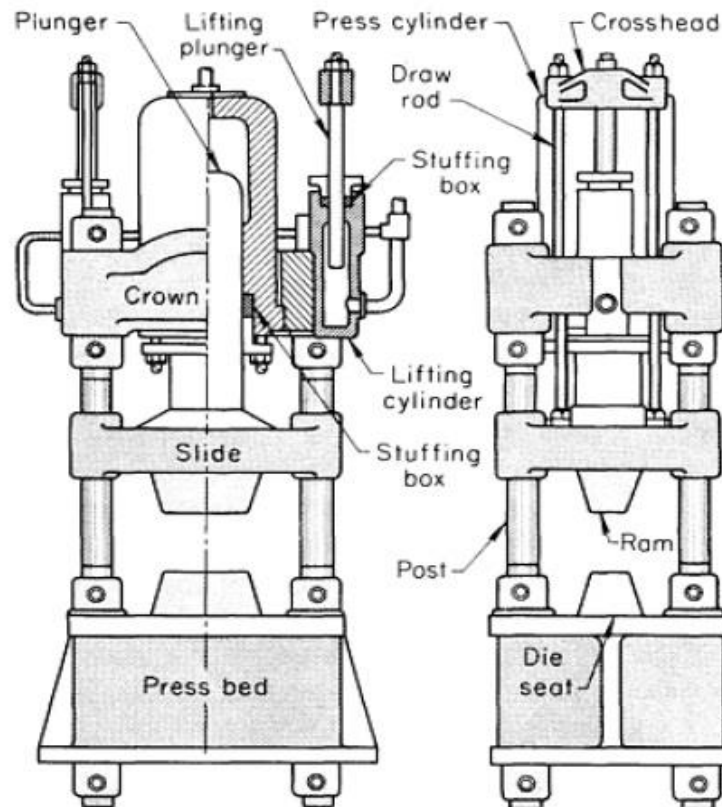
A diferencia del golpe de un martillo de forja, el golpe de una prensa es más un apretón que un impacto y se entrega con una longitud de carrera uniforme. Las prensas de forjado mecánico utilizan mecanismos de accionamiento similares a los de los “upsetters”, sin embargo, un upsetter es generalmente una máquina horizontal.

En comparación con la forja con martillo, la forja mecánica en prensa produce piezas precisas de tolerancias estrechas. Las prensas mecánicas permiten que los mecanismos automáticos de alimentación y transferencia alimenten, recojan y muevan la pieza de un troquel al siguiente, y tienen mayores tasas de producción que los martillos de forja. Debido a que las matrices utilizadas en prensas mecánicas están sujetas a fuerzas de compresión en lugar de fuerzas de impacto, se pueden

usar materiales de matriz más duros para prolongar la vida útil de la matriz. Las matrices también pueden ser menos masivas en la forja de prensas mecánicas.

Las **prensas hidráulicas** se utilizan tanto para la forja de matriz abierta como cerrada. El pistón de una prensa hidráulica es impulsado por cilindros hidráulicos y pistones, que forman parte de un sistema hidráulico o hidroneumático de alta presión. Después de una velocidad de aproximación rápida, el ariete (con el dado superior unido) se mueve a una velocidad lenta mientras ejerce una fuerza de compresión sobre el metal de trabajo. Las velocidades de prensado se pueden controlar con precisión para permitir el control de las velocidades de flujo de metal; esto es particularmente ventajoso en la producción de piezas forjadas de tolerancia estrecha.

Figura 2.10 – Componentes principales de una prensa hidráulica de 4 postes para matriz cerrada.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

Algunas prensas están equipadas con un circuito de control hidráulico diseñado específicamente para la forja de precisión (consulte el artículo "Forja de precisión" en este volumen). Con este circuito, es posible obtener una carrera de avance rápido, seguida de las velocidades de prensado primero y segundo preseleccionadas. Si es necesario, la fuerza máxima de la prensa se puede utilizar al final de la segunda carrera de presión sin límites en el tiempo de reposo. El mismo circuito también proporciona una velocidad de extracción lenta y puede accionar expulsores y separadores a intervalos seleccionados durante la carrera de retorno.

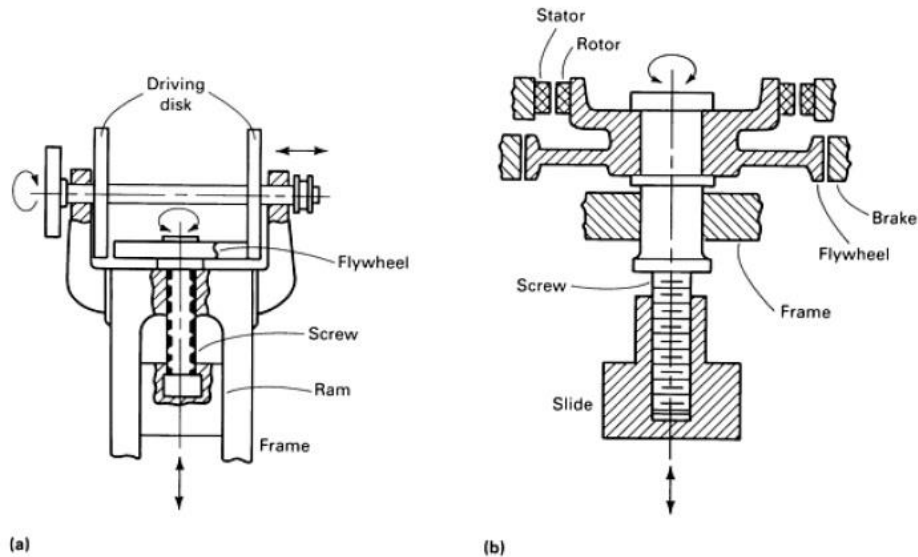
Prensas de tornillo. Las prensas de tornillo son máquinas de energía limitada, y utilizan la energía almacenada en un volante para proporcionar la fuerza necesaria para forjar. La energía de rotación de inercia del volante se convierte en movimiento lineal mediante un tornillo roscado unido al volante en un extremo y al pistón en el otro extremo.

Las prensas de tornillo son ampliamente utilizadas en Europa para la forja de ferretería en el taller, la forja de piezas de latón y aluminio, la forja de precisión de las palas de turbinas y compresores, herramientas manuales y piezas de engranajes. Recientemente, las prensas de tornillo

también se han introducido en América del Norte para una amplia gama de aplicaciones, en particular, para forjar turbinas de vapor y palas de compresores de motores a reacción y cigüeñales de motores diesel.

La prensa de tornillo utiliza un mecanismo de fricción, engranaje, eléctrico o hidráulico para acelerar el volante y el conjunto de tornillo, y convierte la energía cinética angular en la energía lineal de la corredera o ariete.

Figura 2.11 - Dos tipos comunes de prensas de tornillo, a) fricción directa al volante, b) motor directo al volante.



Fuente: ASM Handbook, Vol. 14, Forming and forging.

II.1.3 - Defectos en piezas forjadas

Existen varias causas que pueden provocar la falla de las piezas forjadas. Procesos llevados a cabo de forma incorrecta o una composición química no controlada pueden provocar defectos en las piezas forjadas.

Si la deformación durante el forjado es limitada únicamente a las capas superficiales, como cuando se usan golpes de martillos rápidos, la estructura dendrítica del lingote no se descompondrá en el interior de la pieza forjada. La penetración de forja incompleta se puede detectar fácilmente con el macroataque de una sección transversal de la forja. El macroataque se usa para analizar la penetración de forja en la pieza, para buscar fases segregadas, estructuras dendríticas y grietas. Este es un procedimiento estándar para control de calidad en la forja.

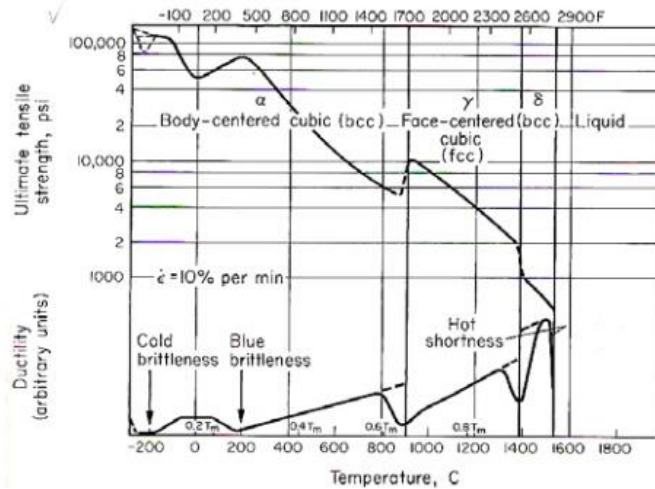
Las grietas superficiales pueden ocurrir como resultado de un excesivo trabajo sobre la superficie del material a una baja temperatura o como resultado de una "Fragilidad en caliente". Una alta concentración de azufre en la atmosfera del horno puede provocar la fragilidad en caliente a piezas de acero y níquel.

Fig. 2.12 Piezas forjadas de acero con grietas por fragilidad en caliente.



La ductilidad disminuye hasta un mínimo, después se incrementa, justo antes del punto de fusión presenta una pérdida abrupta de ductilidad por la fusión local de regiones con impurezas, generalmente límites de grano. Esto se conoce como “Hot shortness” o “Fragilidad en caliente”.

Fig. 2.13 Ductilidad y resistencia a la tracción en función de la temperatura de un acero al carbón.



Fuente: Procesos de conformado mecánico. (2008) M. en I. Teresita Robert N.

En los latones alfa-beta, el plomo es un elemento de aleación muy común, hasta un 3% se adiciona para mejorar la maquinabilidad. El plomo es insoluble en las fases α y β , pero está en forma de finas partículas esféricas (menos de $5\mu\text{m}$) y distribuidas en forma discontinua y dispersa. No tiene efecto en la resistencia a la corrosión, pero puede dar lugar al agrietamiento en el trabajo en caliente.

Las grietas en las salidas de rebaba (Fig. 2.14) son un problema común de la forja en dado cerrado. Se forman cuando el material fluye en esa zona en direcciones contrarias, es decir, una parte del material fluye por la parte superior de la cavidad del dado, mientras que la otra parte lo hace por la parte inferior hasta encontrarse una frente a la otra generando una grieta que penetra el cuerpo de la pieza forjada. Estas grietas pueden prevalecer a pesar de que la rebaba sea removida de la pieza.

En las siguientes figuras se observan algunos de los típicos problemas en la forja.

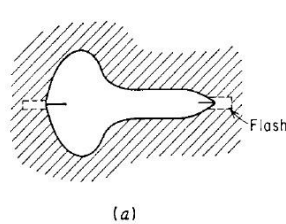


Fig. 2.14 Grietas en las salidas de rebaba.

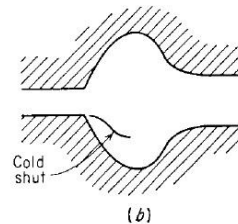


Fig. 2.15 Cold shut.

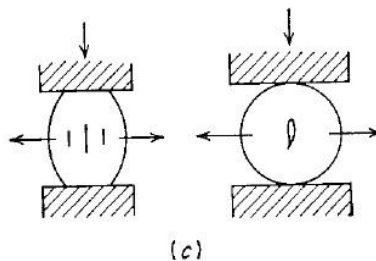


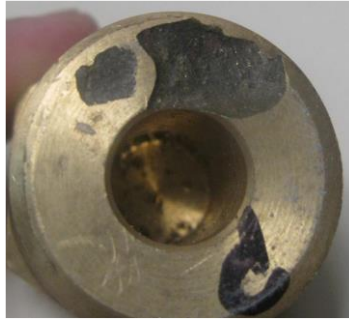
Fig. 2.16 Agrietamiento interno por esfuerzos de tracción secundarios.

Este tipo de grietas pueden ser evitadas incrementando el espesor de la rebaba o reubicando la salida de rebaba a una región menos crítica. También puede ser evitada haciendo un corte de rebabas en caliente o realizando un tratamiento para aliviar esfuerzos antes de realizar la forja.

Otro de los defectos comunes en la forja con dado cerrado es el llamado “Cold shut”. (Fig. 2.15) Se le llama cold shut a una discontinuidad producida cuando dos superficies del metal de pliegan una sobre la otra y no sueldan completamente. Esto puede suceder cuando el metal fluye demasiado rápido en la cavidad del dado y no llena la cavidad de manera uniforme. Esto es debido a una esquina aguda en el dado, un enfriamiento excesivo, o por la alta fricción entre el dado y la pieza. La causa más común del cold shut son los radios cerrados en el dado.

La acumulación de residuos lubricantes y/o escamas del material en el fondo del dado pueden ocasionar la formación de bolsas o un llenado del material insuficiente. (Fig. 2.17) La incompleta descalcificación de la pieza de trabajo también puede afectar el acabado de la pieza.

Fig. 2.17 Bolsa ocasionada por acumulación de residuos.



Se pueden desarrollar esfuerzos de tensión secundarios (Fig. 2.6) durante la forja, lo que puede dar pie a la formación de grietas que pueden llevar a la falla de las piezas. Sin embargo, el apropiado diseño del dado de forja puede reducir al mínimo este tipo de agrietamiento. Con el fin de reducir el arremolinamiento del material y el desarrollo de tensiones de tracción circunferenciales, es algo común el uso de troqueles cóncavos. El agrietamiento interno es menos frecuente en la forja cerrada debido a los esfuerzos de compresión laterales desarrollados por las paredes de la matriz.^[14]

La deformación que produce la forja da como resultado una orientación en la microestructura de las fases y las incrustaciones, paralela a la dirección en la que hubo mayor deformación. Cuando esta orientación se presenta con magnificación baja, se muestran como líneas de flujo o estructura de la fibra. Esto es algo característico de las piezas forjadas y no debe considerarse un defecto. Sin embargo, la estructura de fibra da como resultado baja ductilidad a la tracción y a la fatiga en la dirección normal de la misma (Dirección transversal).

Para lograr un equilibrio óptimo entre la ductilidad de las direcciones longitudinales y transversales de la pieza forjada, a menudo es necesario limitar la cantidad de deformación de un 50% hasta un 70% en reducciones de sección transversal.

II.2 - Diagramas binarios

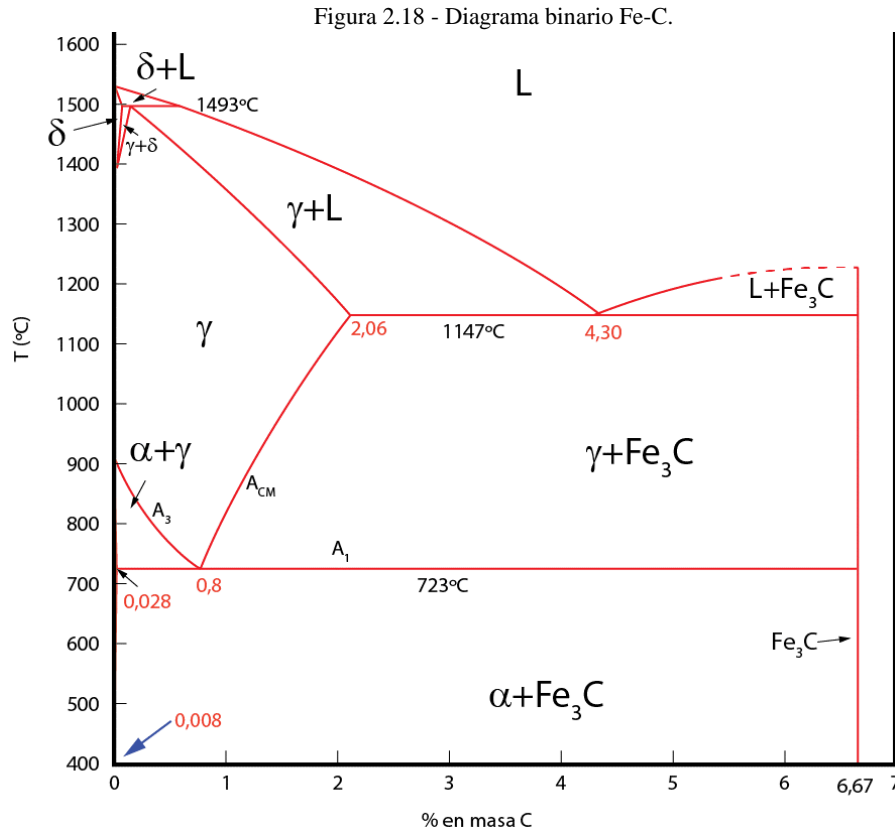
Las propiedades mecánicas de los materiales pueden controlarse por la adición de defectos puntuales como átomos sustitucionales e intersticiales. Particularmente en el caso de los metales, los defectos puntuales distorsionan el arreglo atómico en la red, interfiriendo con el movimientos o deslizamiento de las dislocaciones. Por tanto, los defectos puntuales hacen que el material se endurezca por solución sólida.

Además, la introducción de defectos puntuales modifica la composición del material, influyendo sobre el comportamiento durante la solidificación. Este efecto se analiza mediante el diagrama de fases de equilibrio, a partir del cual se podrá predecir cómo se solidificará un material tanto en condiciones de equilibrio como fuera de éste.

Con el fin de registrar y visualizar los resultados del estudio de los efectos de las variables de estado en un sistema, se han diseñado diagramas para mostrar las relaciones entre las diversas fases que aparecen en el sistema bajo condiciones de equilibrio. Como tal, los diagramas se denominan diversamente diagramas constitucionales, diagramas de equilibrio, diagramas de fase o diagramas

binarios. En un diagrama de un solo componente se pueden observar los diferentes cambios de fase que tiene una sustancia o material dependiendo de la temperatura a la que se encuentre. Estos diagramas deben cumplir con las condiciones de equilibrio. La mayoría de los diagramas de dos o tres dimensiones describen las relaciones de fase en sistemas compuestos por dos o más componentes, y éstos contienen por lo general los campos (áreas) que componen las fases mixtas, así como campos de una sola fase.

Si el sistema que está siendo considerado comprende dos componentes, debe ser añadido un eje composición del diagrama, lo que requiere construcción de un gráfico tridimensional. Sin embargo la mayoría de los problemas metalúrgicos, se refieren sólo a la presión atmosférica fija, y el gráfico se reduce a un diagrama bidimensional de la temperatura contra la composición.



Fuente: <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/diagrama-fe-c-1>

Un sistema físico está constituido por una sustancia (o un grupo de sustancias) que se aísla de su entorno, un concepto utilizado para facilitar el estudio de los efectos de las condiciones de estado. "Aislado" significa que no hay intercambio de masa entre la sustancia y sus alrededores. Las sustancias en un sistema de aleación, por ejemplo, podrían ser dos metales, tales como cobre y zinc; un metal y un no metal, tal como hierro y carbono; un metal y un compuesto intermetálico, tales como el hierro y la cementita; o varios metales, tales como aluminio, magnesio y manganeso. Estas sustancias constituyen los componentes que comprende el sistema y no se deben confundir con las diversas fases que se encuentran dentro del sistema. El sistema, sin embargo, también puede consistir en un solo componente, tal como un elemento o compuesto.

II.2.1 - Fases

Todos los materiales existen en estado líquido, gaseoso o sólido, dependiendo de las condiciones de estado. Las variables de estado incluyen la composición química, temperatura, presión, campo magnético, campo electrostático, campo gravitatorio, etcétera. La "fase" se refiere a esa región del espacio ocupado por un material físicamente homogénea. Sin embargo, hay dos usos del término homogéneo: en el sentido estricto, normalmente utilizado por los científicos físicos,

significa que las propiedades físicas de toda la región del espacio ocupado por la fase son absolutamente idénticos, y cualquier cambio en la condición de estado, no importa cuán pequeña sea, resultará en una fase diferente. Por ejemplo, una muestra de metal sólido con una apariencia aparentemente homogénea no es verdaderamente un material de una sola fase, debido a que la condición de presión varía en la muestra debido a su propio peso en el campo gravitatorio.

Por otra parte, los ingenieros de materiales, en un diagrama de fases, a cada campo de una sola fase generalmente se le administra una etiqueta única que a menudo les resulta conveniente utilizar para referirse a todos los materiales que se encuentran dentro del campo independientemente de la cantidad de propiedades físicas de los materiales que cambian continuamente de una parte a otra del campo. Esto significa que en la práctica de la ingeniería, rara vez se hace la distinción entre el término "fase" y "campo de fase", y todos los materiales que tienen el mismo nombre de la fase se conocen como la misma fase.

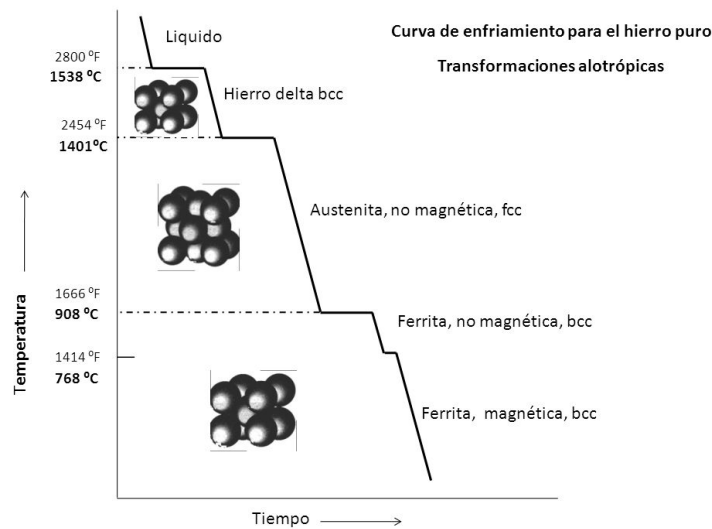
Polimorfismo. Los metales forman estructuras cristalinas diferentes con el propósito de minimizar la energía necesaria para ajustarse entre sí y formar patrones regulares. Sin embargo, un mismo metal puede formar estructuras diferentes debido a un requerimiento menor de energía para dicha temperatura. A la presencia de más de un tipo de estructura cristalina se le conoce como alotropismo o polimorfismo.

Dado que la estructura cristalina influye de manera importante a las propiedades y al comportamiento del metal, el polimorfismo es un factor importante para los tratamientos térmicos de los metales y en operaciones de trabajo de metal y soldadura.

Transformación de fase. Para hablar de transformación de fase es necesario hablar primero de los *diagramas de enfriamiento*, los cuales son diagramas que han sido de gran ayuda para describir el comportamiento de los materiales con respecto a la temperatura a la que se encuentra. Al igual que el diagrama binario, los diagramas de enfriamiento fueron creados bajo condiciones de equilibrio, es decir, a una velocidad de enfriamiento muy lenta y a presión constante. Estas líneas son particulares para cada elemento y cada una de sus aleaciones, y muestran el comportamiento que estas siguen al ser enfriadas desde su fase líquida hasta su fase sólida, pasando por las diferentes fases intermedias que puede tener cada elemento o aleación en particular. De hecho, los diagramas binarios están creados a partir de los diagramas de enfriamiento. Cada punto porcentual en un diagrama binario representa la línea de enfriamiento correspondiente a ese porcentaje de aleación.

Enfriamiento y transformaciones de fase de un metal puro. Cuando un metal puro es enfriado desde su estado líquido, a una presión constante, su temperatura tiende disminuir de una manera relativamente constante hasta llegar a la temperatura de cristalización, en la cual, el enfriamiento se detiene durante un lapso de tiempo hasta que todo el material ha solidificado por completo. Cuando el metal llega a su punto de congelación, comienza a formar pequeños grupos de átomos llamados núcleos, estos núcleos aparecen y desaparecen constantemente debido al movimiento de los átomos generado por la alta cantidad de energía. Cuando la energía se ha disipado lo suficiente, algunos núcleos comienzan a crecer hasta formar pequeños cristales o granos. Con el crecimiento de granos y la aparición de nuevos núcleos, la cantidad de material en estado líquido va disminuyendo hasta que todo el material se solidifica. Una vez terminada la solidificación del material, la temperatura vuelve a disminuir hasta llegar al siguiente estado alotrópico o fase, o en su defecto hasta llegar a la temperatura ambiente.

Fig. 2.19 - Línea de enfriamiento del hierro puro.



En la figura 2.19 se muestra la curva de enfriamiento del hierro. En el diagrama se observan los diferentes estados alotrópicos por los cuales pasa el hierro, desde su estado líquido hasta llegar a la temperatura ambiente. El hierro sufre tres cambios en su estructura cristalina antes de enfriarse a temperatura ambiente. Cada una de estas configuraciones cristalinas es una fase. Desde los 1538°C y hasta los 1401°C presenta una estructura cristalina BCC (δ), entre los 1400°C y los 908°C el arreglo cristalino es del tipo FCC (γ), y desde los 907°C y hasta temperatura ambiente presenta una forma BCC pero ahora nombrada fase alfa (α).

A pesar de que los átomos en el estado líquido no tienen ningún orden definido, es posible que algunos, en cualquier instante dado, se encuentren en posiciones que corresponden exactamente a la red espacial que adoptarán cuando solidifiquen. Cuando la temperatura del líquido disminuye, las vibraciones y el movimiento de los átomos también disminuyen logrando con esto que el núcleo dure más tiempo con vida y habrá mayor número de embriones presentes al mismo tiempo que pueden comenzar a crecer hasta que los alcancen un tamaño crítico y formen pequeños cristales a los cuales se adhieren más átomos en forma tridimensional pero con cierta dirección preferida a lo largo de los ejes del cristal. Esto da lugar a una estructura con apariencia de árbol llamada *dendrítica*.

Figura 2.20 – Estructura dendrítica de una pieza de plomo altamente puro.

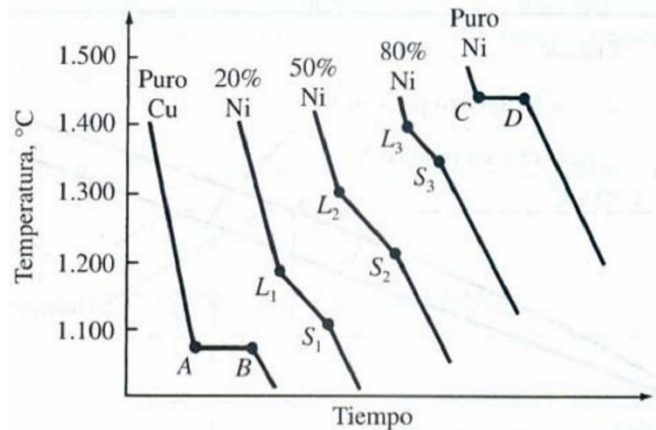


Fuente: Sydney H. Avner.

La estructura dendrítica en la superficie del material, tiende a tomar una orientación que va de la superficie al centro de la pieza. Esto puede provocar grietas en el materia que podrían generar la falla en las piezas si éstas se fragilizan.

Enfriamiento y transformaciones de fase de una aleación. En la figura 2.21, el diagrama muestra cinco curvas de enfriamiento. A los extremos, las líneas correspondientes al cobre y al níquel, los cuales sufren sólo una transformación de fase en la que pasan de ser líquidos a sólidos. Al solidificar, el cobre adquiere una estructura cristalina FCC al igual que el níquel, debido a esto, la solubilidad de un metal en el otro es completa.

Figura 2.21 - Curvas de enfriamiento de dos metales puros y tres aleaciones.



Fuente: <http://tecnomarco.weebly.com/diagramas-de-solidificacioacuten.html>

Las tres líneas restantes representan tres aleaciones de Ni-Cu, 20%Ni, 50%Ni y 80%Ni respectivamente. Para los tres casos, la velocidad de enfriamiento desde su fase líquida es constante hasta llegar al punto L_n . En este punto comienza la solidificación del material y la velocidad de enfriamiento disminuye constantemente. A diferencia de un metal puro, algunas aleaciones solidifican al mismo tiempo que su temperatura disminuye. Una solución que se encuentra a una temperatura apenas por debajo del punto L está conformada por pequeños núcleos (cristales) de un material sólido y en mayor cantidad material en forma líquida. A medida que la temperatura disminuye, la cantidad de material sólido va aumentando hasta llegar al punto S . Apenas por encima del punto S , casi todo el material se ha transformado en fase sólida. Una vez que todo el material ha pasado por el punto S , la temperatura disminuye sin cambios en el estado del material hasta llegar a la temperatura ambiente.

El comportamiento de la línea de enfriamiento dependerá de los porcentajes de cada una de las partes aleadas y la solubilidad de un elemento en el otro.

II.2.2 - Forjabilidad

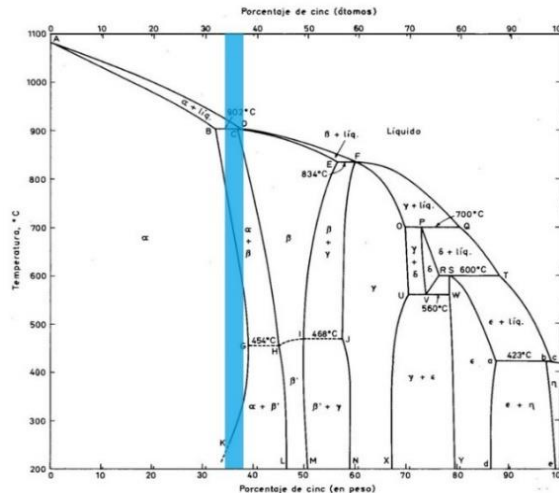
La forjabilidad es la capacidad que tienen los materiales para ser deformados sin agrietarse. Debido a que la estructura cristalina de un metal puro teóricamente no contiene impurezas, es muy dúctil y se puede deformar con relativa facilidad. Una solución sólida monofásica contiene por lo menos dos elementos distintos en su estructura, sin embargo, bajo las condiciones adecuadas, ambos materiales se acomodan para formar una misma estructura cristalina la cual opone relativamente baja resistencia a la deformación. A menudo es necesario elevar la temperatura de las aleaciones forjables para encontrar su forma de solución sólida monofásica.

En pruebas de laboratorio a piezas forjadas, a menudo se encuentran dos fases diferentes dentro de la estructura del metal. Esto es, por que el material es forjado a una temperatura donde presenta una estructura monofásica, de modo que, al enfriar, una parte del material sufra un cambio en su estructura por precipitación debido a la saturación en la solución, creando una nueva fase. Este cambio en el material puede favorecer la resistencia del material, ya que esta nueva fase puede ayudar a obstruir el deslizamiento de planos y dislocaciones.

La aparición de la segunda fase se puede dar en forma de granos orientados en la misma dirección en la que fluyó el material al momento de ser forjado o como límite de grano.

En la Figura 2.22 se muestra el diagrama binario del Cinc – Cobre, y sobre este, una franja de color azul que indica el porcentaje de cinc que debe contener el latón forjable según la norma ASTM B 124M – 00.

Fig. 2.22 - Diagrama binario Cinc-Cobre y rango de forjabilidad del latón.



Tomado y editado de ASM Handbook Vol 3, Alloy Phase Diagrams.

El rango de forjabilidad para esta aleación según la norma ASTM B 283-04 es del 100%. Cumple con propiedades monofásicas a determinada temperatura, y al enfriar, parte del material se transforma en una segunda fase, logrando con esto una mayor resistencia mecánica.

Las aleaciones alfa-beta contienen entre el 38% y 42% de cinc. A diferencia de los latones alfa, la capacidad de ser deformados a temperatura ambiente es limitada. Por el contrario, estos trabajan bien a elevadas temperaturas, pueden ser extruidos en barras o secciones complejas, en macizo o con agujero, y forjados en caliente en matrices cerradas.

La presencia de fase beta en latones alfa-beta, dificulta el trabajo en frío. Las aleaciones alfa-beta también son resistentes a la tracción y con mayor porcentaje de cinc son más económicas que los latones alfa. Pero son más susceptibles a la corrosión por descincificación.

En la tabla 2.3 se expone la forjabilidad de diversos metales y aleaciones, en orden decreciente. Se basan en consideraciones como ductilidad y resistencia del material, temperatura requerida para el forjado, comportamiento de fricción y calidad de las forjas producidas. Estos valores se deben considerar sólo como guías generales.

Tabla 2.3 – Clasificación de metales en orden decreciente de forjabilidad.

Clasificación de metales en orden decreciente de forjabilidad	
Metal o aleación	Intervalo aproximado de temperaturas para forjado en caliente (°C)
Aleaciones de aluminio	400–550
Aleaciones de magnesio	250–350
Aleaciones de cobre	600–900
Aceros al carbono y de baja aleación	850–1150
Aceros inoxidables martensíticos	1100–1250
Aceros inoxidables austeníticos	1100–1250
Aleaciones de titanio	700–950
Superalaciones de base hierro	1050–1180
Superalaciones de base cobalto	1180–1250
Aleaciones de tantalio	1050–1350
Aleaciones de molibdeno	1150–1350
Superalaciones de base níquel	1050–1200
Aleaciones de tungsteno	1200–1300

Fuente: Kalpakjian

Cuanto más grande sea la deformación antes del agrietamiento, más grande será la forjabilidad del metal.

II.3 - Diseño de recipientes a presión con orientación a tanques estacionarios

El uso de gas L.P. en México es tan común que muchas veces puede llegar a ser indispensable tanto en hogares como en industrias. Por la cercanía que tienen las personas con este combustible es necesario poner especial atención al diseño de los recipientes. La gran mayoría de los tanques estacionarios y cilindros ya cuentan con un diseño preestablecido, pero vale la pena resaltar algunos detalles sobre su diseño.

- Espesor de lámina
- Rolado
- Conformado de tapas
- Colocación de tapas
- Soldadura
- Conformado de coples y/o boquillas
- Colocación de coples y/o boquillas

El espesor de la lámina de un tanque o recipiente a presión dependerá mucho de la capacidad de almacenamiento del mismo, ya que mientras mayor sea la cantidad de combustible que almacene, mayor deberá ser el espesor de la lámina. Según la clasificación de la NOM-009-SESH-2011, para el diseño de los tanques de tipo A, B, C y D, debe considerarse una presión de diseño de 1.72 MPa. Se deben realizar los cálculos pertinentes, siempre considerando los espesores mínimos con los que debe contar cada tanque según su tipo. La norma indica que el espesor mínimo de los tanques estacionarios debe ser el siguiente:

- Tanques tipo A y D: El espesor de la lámina, una vez realizados los cálculos, no debe ser menor a 6 mm.
- Tanques tipo B: El espesor de la lámina para el cuerpo cilíndrico no debe ser menor a 4.18 mm, y el espesor de la lámina que conforma las cabezas no debe ser menor a 3.72 mm.
- Tanques tipo C: El espesor de la lámina no debe ser menor a 3.72 mm.
- Tanques tipo E: El espesor de la lámina dependerá de la capacidad de almacenamiento del tanque. En seguida se muestra el análisis matemático para calcular los espesores de lámina para los tanques de tipo A, B, C y D.

Para calcular el espesor de dichos tanques se debe considerar una presión de diseño mínima de 1.72 MPa.

Para el espesor mínimo de pared de cuerpo de recipientes cilíndricos.

- a) En función del radio interior:
a1) Juntas longitudinales (esfuerzo circunferencial).

$$t = \frac{PR_i}{SE - 0.6P}; \quad P = \frac{SEt}{R_i + 0.6t}$$

- a2) Juntas circunferenciales (esfuerzo longitudinal).

$$t = \frac{PR_i}{2SE + 0.4P}; \quad P = \frac{2SEt}{R_i - 0.4t}$$

En donde:

- t es el espesor mínimo de pared.
P es la presión de diseño del recipiente.
R_i es el radio interior del cuerpo del recipiente.
S es el esfuerzo máximo permisible del material (factor de seguridad de 3.5).

E es la eficiencia de junta soldada (0.65 es el valor mínimo indicado en la norma).

- b) En función del radio exterior:
Juntas longitudinales (esfuerzo circunferencial)

$$t = \frac{PRe}{SE + 0.4P} ; \quad P = \frac{SEt}{Re - 0.4t}$$

En donde:

Re es el radio exterior del cuerpo del recipiente.

Para calcular el espesor mínimo de las cabezas del recipiente según el tipo de cabeza.

- a) Cabezas semielipsoidales.
a1) En función al diámetro interior.

Estas fórmulas son aplicables cuando la relación entre el eje mayor y el eje menor ($D_i/2h$) es 2:1.

$$t = \frac{PD_i}{2SE - 0.2P} ; \quad P = \frac{2SEt}{D_i + 0.2t}$$

- a2) Cuando esta relación es diferente, estas fórmulas se afectan por un factor K que depende de la relación entre el eje mayor y el eje menor de la cabeza.

$$t = \frac{PD_iK}{2SE - 0.2P} ; \quad P = \frac{2SEt}{KD_i + 0.2t}$$

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left[\frac{D_i}{2h} \right]^2 \right]$$

En donde:

D_i es la longitud interior del eje mayor de la elipse o diámetro interior del faldón.

h es la mitad de la longitud interior del eje menor de la elipse o diámetro interior del faldón.

- a3) En función del diámetro exterior:

$$t = \frac{PDeK}{2SE + 2P(k - 0.1)} ; \quad P = \frac{2SEt}{KDe + 2t(K - 0.1)}$$

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left[\frac{D_i}{2h} \right]^2 \right]$$

En donde:

De es la longitud exterior del eje mayor de la elipse o del diámetro exterior del faldón.

- b) Cabezas toriesféricas

- b1) En función del radio central interior.

Estas fórmulas son aplicables cuando el radio interior de nudillos (r) es 6% del radio central interior de la cabeza y éste es igual al diámetro exterior del faldón.

$$t = \frac{0.885PL_i}{SE + 0.1P} ; \quad P = \frac{2SEt}{0.885L_i + 0.1t}$$

En donde:

L_i es el radio central interior de la cabeza.

b2) Cuando no se cumplen estas condiciones, se deben aplicar las fórmulas siguientes:

$$t = \frac{PLiM}{2SE - 0.2P} ; P = \frac{2SEt}{LiM + 0.2t}$$

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \sqrt{\frac{Li}{r}} \right]$$

En donde:

M es el factor que depende de la relación entre el radio central interior y el radio interior de nudillos (Li/r).

b3) En función del radio central exterior:

$$t = \frac{PLeM}{2SE - P(M - 0.2)} ; P = \frac{2SEt}{MLe - t(M - 0.2)}$$

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \sqrt{\frac{Li}{r}} \right]$$

En donde:

Le es el radio central exterior de la cabeza.

c) Cabezas semiesféricas.

$$t = \frac{PLi}{2SE - 0.2P} ; P = \frac{2SEt}{Li + 0.2t}$$

En donde:

Li es el radio interior de la cabeza.

Estas fórmulas son aplicables cuando el espesor de pared (t) no es mayor de 0.35 Li, o P no es mayor de 0.665 SE.

Para calcular el espesor mínimo de pared de un tanque esférico, la norma sugiere utilizar las siguientes fórmulas. Estas fórmulas nos son aplicables a tanques de tipo E.

a) En función del radio interior.

$$t = \frac{PRi}{2SE - 0.2P} ; P = \frac{2SEt}{Ri + 0.2t}$$

En donde:

Ri es el radio interior de la esfera.

Estas fórmulas son aplicables cuando el espesor de pared (t) no es mayor de 0.35 Ri, o P no es mayor a 0.665 SE.

b) En función del radio exterior.

$$t = \frac{PRe}{2SE - 0.8P} ; P = \frac{2SEt}{Re - 0.8t}$$

En donde:

Re es el radio exterior del recipiente.

Para calcular el espesor de pared de un tanque esférico tipo E, la norma sugiere usar los siguientes cálculos:

- a) En función del radio interior:

$$t = \frac{PD_i}{4S - 1.2P}$$

En donde:

- t es el espesor mínimo de pared
 P es la presión interna de diseño
 S es el esfuerzo máximo permisible del material.
 Di es el diámetro interior del recipiente.

- b) En función del diámetro exterior:

$$t = \frac{PDe}{4S - 0.6P}$$

En donde:

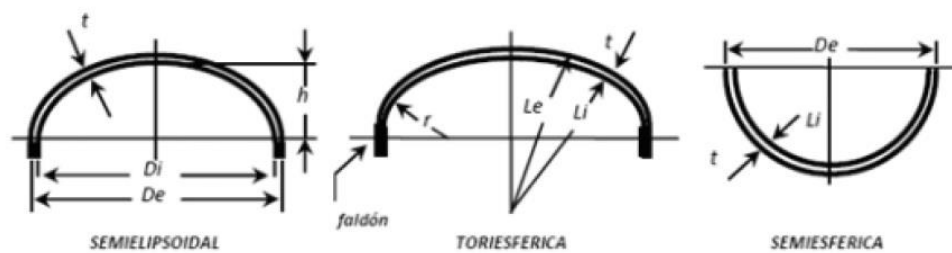
- De es el diámetro exterior del recipiente.

Rolado: También conocido comercialmente como cilindrado, es empleado para conformar principalmente tanques. La fabricación de los tanques estacionarios consiste en transformar una placa de metal plana en un cilindro por medio de rodillos.

Conformado de tapas: Un tanque estacionario cilíndrico está conformado por dos tapas también llamadas cabezas, y una placa rolada en forma cilíndrica que formará el cuerpo del tanque. El conformado de las cabezas comienza con una placa en forma circular la cual se coloca en una prensa que, con ayuda de un dado se le da la forma que será necesaria para cada tanque. Posterior a esto, se elimina el exceso de material y se le da forma de ceja en la orilla, esta ceja es la zona en donde será unida la cabeza con el cuerpo del tanque.

Fig. 2.23 Cabezas para los tanques estacionarios.

FORMA DE LAS CABEZAS DE LOS RECIPIENTES



Fuente: NOM-009-SESH-2011.

Colocación de tapas: Una vez que se tienen las piezas preparadas (cilindro y cabezas) se procede al ensamblaje, el cual se lleva a cabo en una base donde se coloca el cuerpo del tanque y las tapas a los extremos de este. Con ayuda de una prensa, se hace ensamblar las cabezas con el cuerpo para posteriormente ser unidas de forma permanente.

Soldadura: El siguiente paso en la fabricación de un tanque estacionario es la unión de las piezas por soldadura la cual se realiza con el proceso de soldadura por arco sumergido. Este proceso se lleva a cabo con un sistema de soldadura por arco eléctrico en el cual no es posible observar el arco ya que al tiempo que se lleva el proceso de la soldadura, el sistema va dejando caer un polvo

granulado que ayuda a proteger la soldadura de la oxidación que puede provocar el medio ambiente. En este caso, el tanque se coloca sobre una base y sobre él se coloca el sistema de soldadura para soldar la costura del cuerpo. Posteriormente la base hace girar el tanque mientras el sistema va soldando cada una de las cabezas.

Conformado de coples: Para el conformado de los coples donde serán instaladas las válvulas, la NOM-009-SESH-2011 dice que los coples pueden ser forjados o maquinados a partir de barras sólidas. Además menciona que la composición química del material usado debe coincidir con lo establecido en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 - Composición química para coples de acero.

Composición química	
Elemento	Composición en %
Carbono	0.35% Máx.
Manganeso	1.05% Máx.
Fosforo	0.04% Máx.
Azufre	0.05% Máx.
Silicio	0.4% Máx.

Fuente: NOM-009-SESH-2011.

Instalación de coples: Una vez que se tienen preparados los coples, es momento de ser colocados en la posición en la que serán soldados en el tanque. El proceso de soldadura es el mismo que para el cuerpo y las tapas del tanque.

La NOM-009-SESH-2011 dice que una vez terminados todos los procesos de soldadura en la conformación de los tanques, éstos deben ser sometidos a un tratamiento térmico. (Ver tabla 1.2 del apartado I.2)

II.3.1 - Dispositivos de medición y control. (Protocolos de uso, seguridad y prueba)

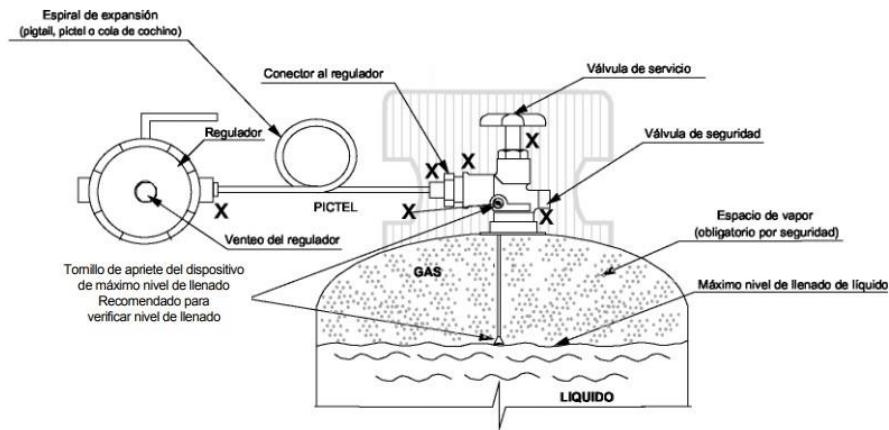
La instalación segura de tanques para gas L.P. debe contar con algunos accesorios que cumplen ciertas funciones dependiendo del lugar en el que estén instalados, es decir, un tanque estacionario doméstico, no cuenta con manómetros para medir la presión dentro del tanque, sin embargo, existen algunas instalaciones en las que se pueden colocar para medir la presión con la que llega el gas al tanque o la presión con la que sale el gas de éste.

Para la instalación de un tanque estacionario se deben considerar distintos accesorios dependiendo del tipo de tanque que se usará y la actividad que se realizará con dicha instalación.

PEMEX ha puesto a disposición una hoja de seguridad del gas licuado de petróleo en su portal: <http://www.gas.pemex.com.mx/pgpb/Productos%20y%20Servicios/Gas%20Licuado>. En dicho documento, se dan algunas sugerencias sobre el uso y almacenamiento de los tanques estacionarios y los cilindros para gas LP.

1. Los tanques y cilindros para gas licuado deben instalarse sobre una base firme, preferentemente a la intemperie o en lugares abiertos, protegidos contra golpes y caída de objetos. Los tanques estacionarios además, deberán anclarse.
2. Los cilindros deben sujetarse a la pared con un cable, cincho u otro medio adecuado para evitar que se caigan.
3. Proteja los recipientes de los rayos solares. La exposición a altas temperaturas provoca aumentos de presión y apertura de las válvulas de seguridad, con la subsecuente liberación de gas a la atmósfera.
4. Para evitar sobrellenos y presión excesiva en los recipientes, con la consecuente liberación de gas, se recomienda instalar en ellos, válvulas de servicio con dispositivo indicador de máximo nivel de llenado de líquidos.

Figura 2.24 – Instalación doméstica de un cilindro.



Muestra el dispositivo indicador de máximo nivel de llenado de líquidos, la espiral de expansión (pictel) y la localización de posibles puntos de fuga (X).

Fuente: http://www.gas.pemex.com.mx/NR/rdonlyres/D3D851A9-FDE6-4F68-8FD1-3CC6E50163E4/0/HojaSeguridadGasLP_v2007.pdf

5. Para evitar que las válvulas de seguridad fallen, manténgalas con un capuchón metálico, o un tapón especial de hule que las protege de la lluvia y de agentes extraños como polvo, basura, agua, etc.
6. Cada vez que cambie cilindros, exija a los operadores que no los maltraten y que le entreguen cilindros en buenas condiciones (pintura, golpes, abolladuras, corrosión, etc.). Si la apariencia de éstos no le satisface, pida que se los cambien.
7. Asegúrese de utilizar las herramientas adecuadas al conectar y desconectar los cilindros.
8. Una vez abierta la válvula de servicio, busque fugas con agua jabonosa en los puntos marcados con "X". Si observa burbujas, cierre la válvula de servicio y reapriete las conexiones. No fume mientras realiza estos trabajos.
9. No fuerce la espiral de expansión (pictel, pictail o cola de cochino) su flexibilidad está diseñada para facilitar, sin dañar, la conexión entre las válvulas de servicio y los reguladores de presión. Figura 3.
10. No modifique su instalación de gas sin la debida autorización. Consulte a su distribuidor.

Instalación doméstica de gas L.P. con tanque estacionario: Para este tipo de instalación son necesarios los siguientes accesorios (Figura 2.24):

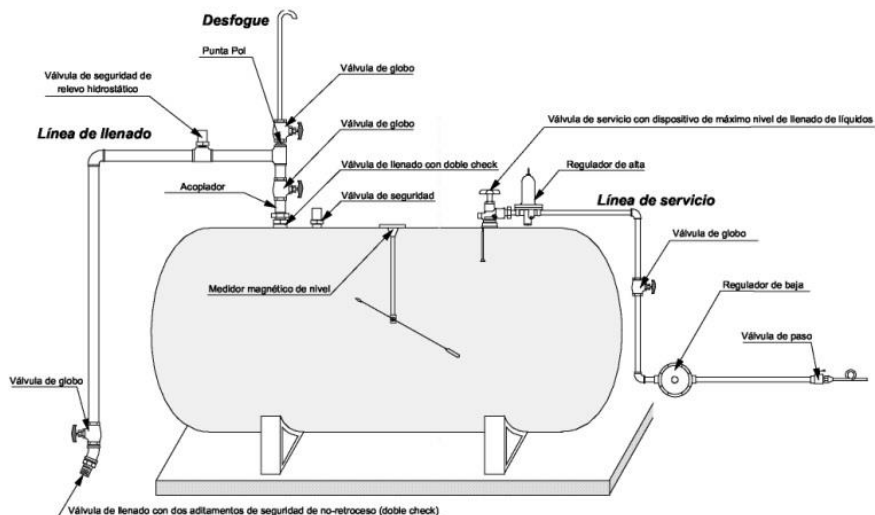
Válvula de llenado con doble check de no retroceso. Estas válvulas van instaladas una al inicio de la línea de llenado y una más en el tanque. En caso de que la instalación no cuente con una línea de llenado, dicha válvula se encuentra instalada directamente al tanque.

En la línea de llenado se debe contar con, por lo menos, dos válvulas de globo, una justo después de la válvula de llenado y una más a la antes de la segunda válvula de llenado (cerca del tanque).

En la línea de llenado, entre las válvulas de globo, se debe instalar una válvula de seguridad.

En el tanque debe ir instalada por lo menos una válvula de seguridad, esto con el fin de evitar el sobre llenado del tanque. Esta válvula alivia la presión excesiva que pudiera existir dentro del tanque, sin embargo, esto conlleva la liberación de gas a la atmosfera.

Figura 2.24 – Instalación domestica de un tanque estacionario.



Fuente: http://www.gas.pemex.com.mx/NR/rdonlyres/D3D851A9-FDE6-4F68-8FD1-3CC6E50163E4/0/HojaSeguridadGasLP_v2007.pdf

Todos los tanques estacionarios deben contar con un indicador de nivel, este indicador funciona con un flotador conectado a un mecanismo que transfiere el movimiento generado por el aumento o disminución del líquido dentro del tanque, y a su vez por medio de un imán hace girar la aguja que se encuentra en la carátula del indicador, montada en la cabeza de latón.

Figura 2.25 – Indicador de nivel para tanque estacionario.

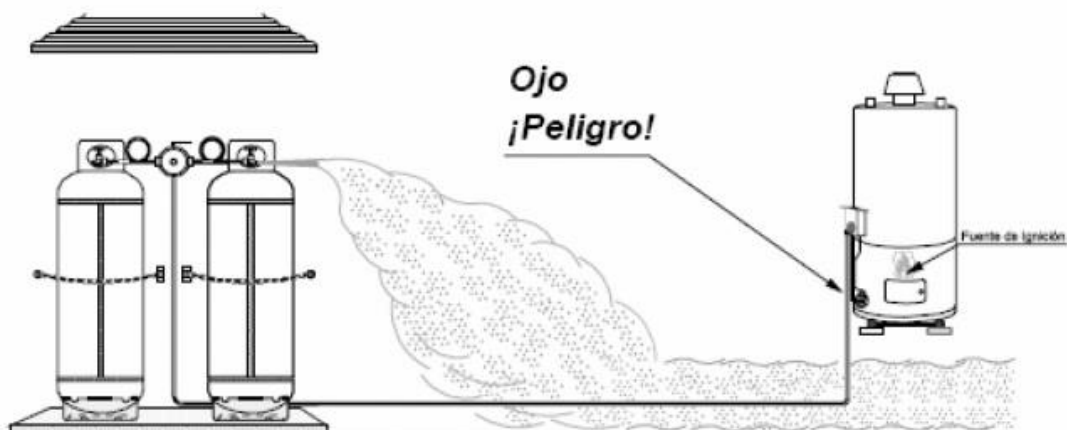


Fuente: <https://rochestermexico.co/api/product-families/56f1f24e49bd560f0030043e/products/571e4d7df7b3330f0064de03/es/document.pdf>

La hoja de datos de seguridad para gas licuado de petróleo dispuesta por PEMEX proporciona una serie de recomendaciones de seguridad para usuarios de gas licuado en caso de fuga.

1. Los vapores de gas licuado son más pesados que el aire, por lo tanto, al fugar tienden a descender y acumularse en sótanos, alcantarillas, fosas, pozos, zanjas, etc. Sin embargo, su olor característico por el odorizante adicionado permite percibirlo fácilmente. La nube de gas acumulada puede encontrar fuentes de ignición y originar explosiones.
2. Si huele a gas, cierre la válvula de servicio y busque fugas. Utilice agua jabonosa, nunca use encendedores, velas, cerillos o flamas abiertas para tratar de localizar la posible fuga.
3. Si observa acumulación de vapores, asegúrese primero que no haya flamas cercanas o posibilidad de generar chispas (interruptores eléctricos, pilotos de estufa, calentadores, anafres, velas, motores eléctricos, motores de combustión interna, etc.). Enseguida abra puertas y ventanas.

Figura 2.26 – Desplazamiento típico de una fuga de gas.



Fuente: http://www.gas.pemex.com.mx/NR/rdonlyres/D3D851A9-FDE6-4F68-8FD1-3CC6E50163E4/0/HojaSeguridadGasLP_v2007.pdf

4. Disipe los vapores de gas licuado abanicando el área con trapos o cartones grandes. no use ventiladores eléctricos, ni accione interruptores eléctricos, porque generan chispa y pueden producir explosiones.
5. No se confíe, mientras huelo a gas, existe un fuerte peligro de explosión.
6. Si la fuga es mayor, llame a la Central de Fugas, al Departamento de Bomberos y/o Protección Civil.
7. Cerciórese de que el problema se resuelva y no hayan quedado acumulaciones remanentes de gas.

III. Método Experimental

En este apartado se explica a grandes rasgos el proceso de vinculación llevado a cabo entre la UNAM y la empresa. También se explican los métodos usados para el estudio y análisis de las piezas. De igual manera, se dan a conocer las etapas del trabajo físico llevado a cabo por mi compañero Rogelio Sánchez Pérez y yo en los distintos laboratorios, los procesos del micro y macroataque, el análisis químico y las pruebas de dureza realizadas a las piezas.

III.1 - Vinculación Centro Tecnológico - MIRSA

Este convenio nació después de una visita que realizó el Dr. Jacinto Cortés Pérez, Secretario Académico del Programa de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, a la planta de la empresa Medidores Internacionales Rochester S.A. de C.V. ubicada en Tlalnepantla, Estado de México. Durante su visita, el Dr. Jacinto y el Ing. Nicolás Alfaro Escamilla, director de la planta, platicaron sobre los procesos de control de calidad de los productos que la empresa produce.

En la planta se llevan a cabo pruebas hidrostáticas a coples de acero y cabezas de latón que son instalados en tanques estacionarios para gas L.P. Estas pruebas muestran cuando las piezas tienen grietas o poros que provocan la fuga del material que deben contener. Estas pruebas sólo muestran si las piezas analizadas presentan fugas, sin embargo, la prueba hidrostática no revela la causa de la falla. Era necesario pues, un proceso que ayudara a revelar la causa del problema.

Los proveedores de las piezas, en donde se montan los medidores, aseguran que las piezas que proveen son forjadas y cumplen con las normas requeridas para las piezas de latón y de acero. Sin embargo, algunas de las piezas de latón han mostrado problemas de manera concurrente.

El Dr. Jacinto explicó al Ing. Nicolás Alfaro un método que podría revelar la causa de falla de las piezas forjadas. Dicho método puede mostrar la forma en la que el material fluyó cuando fue forjado. Esto permite analizar la estructura del material y observar las posibles causas de falla. El método implica el sacrificio de algunos especímenes, los cuales deben ser cortados y preparados para ser atacados con algunos ácidos.

III.2 - Metodología usada

Muchos de los procedimientos realizados fueron en un principio basados en normas ASTM. El ideal era trabajar, en todo momento, basados en éstas. Sin embargo, debido a que en repetidas ocasiones los resultados no eran los esperados, optamos por seleccionar procedimientos diferentes adaptados de otros procedimientos que funcionaran mejor dadas las condiciones que se nos presentaban. En un par de ocasiones se realizaron pruebas de macroataque a piezas de acero de forma experimental, únicamente sabiendo que los reactivos atacaban el material.

La mayoría de los procedimientos adoptados fueron basados en las normas pero indicados para materiales diferentes.

Uno de estos procedimientos fue el macroataque a piezas de latón. La solución usada para macro atacar las piezas de latón es una de las dos soluciones indicadas para el microataque para el latón.

III.2.1 - Análisis de fallas

En la empresa se trabajan los coples de acero que van unidos con soldadura a los tanques de gas estacionario, en estos coples se enroscan las válvulas y las cabezas de latón donde se instala el medidor.

Los coples de acero tienen una forma toroide inmersa en una forma cuadrada con una ceja en una de las aristas exteriores, y en algunos casos, con chaflán en la arista exterior restante. La ceja permite ubicar la pieza en el tanque para posteriormente ser unidos por soldadura.

Las piezas que la empresa usa para hacer los coples de acero y las cabezas de latón son piezas que aún requieren maquinado antes de su instalación final. A pesar de que las piezas de acero no presentan problemas de forma recurrente, fue necesario su análisis para corroborar que cumpliera con las especificaciones exigidas por las normas.

Figura 3.1 – Cople de acero forjado sin maquinar.



Los coples de acero y las cabezas de latón usadas en tanques de gas estacionario deben ser fabricados bajo las normas ASTM A105-05 para los coples de acero, y ASTM B 124/B 124M y B 249/B 249M para las piezas de latón. En ambos casos las normas indican que las piezas deben ser forjadas y deben cumplir con el porcentaje de aleación indicado.

Algunas piezas de latón presentaban problemas al momento de ser maquinadas. Frecuentemente, mientras la pieza era maquinada en los tornos de la empresa, las piezas se fracturaban sin explicación aparente. El control de calidad de la empresa no era basto para identificar las piezas con este defecto antes de comenzar a trabajar con ellas.

Los ingenieros de la empresa comenzaron a dudar que las piezas hubiesen sido forjadas, o que tal vez no cumplían con los porcentajes químicos establecidos en las normas para la aleación. Sin un control de calidad previo al maquinado, la empresa no tenía armas para exigir a sus proveedores una mejora en la calidad de las piezas que le eran provistas.

III.3 - Estudio para encontrar los reactivos para micro y macroataque

Los microataques y macroataques fueron en parte basados en normas ASTM. Para ser más exactos en las normas E 340 – 00 para el macroataque, y E 407 – 99 para el microataque.

En las normas se indican los reactivos que deben ser usados para atacar metales y aleaciones. En el caso de las piezas de acero, no se tuvo ningún problema para obtener resultados satisfactorios. Básicamente todos los reactivos funcionaron. El verdadero problema comenzó cuando pretendíamos realizar el macroataque a las piezas de latón.

La norma E 340-00 indica varias soluciones que sirven para atacar las piezas de latón. Optamos por usar la que está indicada únicamente para latones sin tener resultados satisfactorios. Usamos otras soluciones indicadas por la norma sin obtener buenos resultados.

Decidimos dejar el macroataque para después y continuar con el microataque para latón. En esta ocasión los resultados fueron favorables. Sin embargo, por error olvidamos una pieza dentro de una de las soluciones. Después de alrededor de 30 minutos nos encontrábamos almacenando los residuos, y nos percatamos del error.

Este error provocó un sobre ataque tal en la pieza que dejaría al descubierto las líneas de flujo que tanto buscábamos.

III.4 - Estudio para encontrar pruebas optimas de dureza

Las pizas de acero tienen impreso el código “A105” haciendo referencia a la norma ASTM A 105. Lo que en teoría indica que la composición química del acero con el que está hecha la pieza coincide con lo marcado por dicha norma. La misma norma indica algunas propiedades mecánicas promedio que deben tener las piezas fabricadas con dicho material. Una de esas propiedades es la dureza, la cual está indicada en un rango de “HB137 a HB187”.

En la norma ASTM E 10-01 dice que “el grosor de la muestra analizada debe ser tal que no aparezca una protuberancia u otra marca que muestre el efecto de la fuerza de prueba en el lado opuesta de la pieza. Como regla general, el grosor de la muestra debe ser al menos diez veces la profundidad de la muesca”. Tomando en cuenta que el mayor espesor que se podía obtener de las piezas era de alrededor de 5mm, se determinó que el ensayo Brinell no sería el correcto.

Por otro lado la norma E 140-02 recomienda el uso de la escala Rockwell B con carga de 100Kg e indentador de bola endurecida de 1/16” para probetas de aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio y aceros maleables. Basados en esta información, se eligió realizar la pruebas con estas indicaciones.

III.5 - Etapas

En este apartado se muestran los procedimientos llevados a cabo durante el proyecto y que dieron lugar a este trabajo de tesis. Es el paso a paso de todos los experimentos llevados a cabo.

1. Preparación de probetas para los distintos ensayos metalográficos.
2. Macroataque, el cual sirve para revelar líneas de flujo dentro del material cuando éste ha sido forjado, entre otras.
3. Microataque. Este proceso es utilizado para observar de manera microscópica la microestructura del material, tamaño y forma de grano así como las diferentes fases que conforman al material en estudio.
4. Análisis químico. Es de gran relevancia saber la composición química de los materiales que se estudian, ya que conociendo las proporciones de los elementos químicos que conforman una aleación se puede conocer y predecir, con base en los estudios empíricos realizados por investigadores del rubro, el comportamiento que tendrá el material y sus propiedades físicas y mecánicas.
5. Prueba de dureza o ensayo de dureza. Esta prueba es una comparación de la dureza de un material con respecto a otro por medio de escalas las cuales sirven para asignar un valor numérico a la dureza de la pieza ensayada. Este ensayo sirve para detectar si la pieza ensayada cumple con la dureza establecida por alguna norma.

III.5.1 - Preparación de probetas para Macroataque y Microataque

Para llevar a cabo las pruebas, es necesario preparar las probetas que serán utilizadas en cada una de las pruebas.

La norma ASTM E3-95 menciona los criterios y procesos a seguir para la preparación de especímenes para los diferentes ensayos, sin embargo, no se siguieron todos los procedimientos como lo indica la norma, ya que en algunos casos fue de mayor conveniencia omitirlos debido a los resultados que se buscaban.

El proyecto contempló el análisis de los coples de acero y cabezas de latón.

Las piezas de acero son provistas de tres fabricantes diferentes a los cuales se les asignó un apelativo para tener una mejor clasificación de las piezas. Los apelativos son: PTT, DW y SSE, que son las siglas que aparecen impresas en cada una de las piezas. Todas las piezas

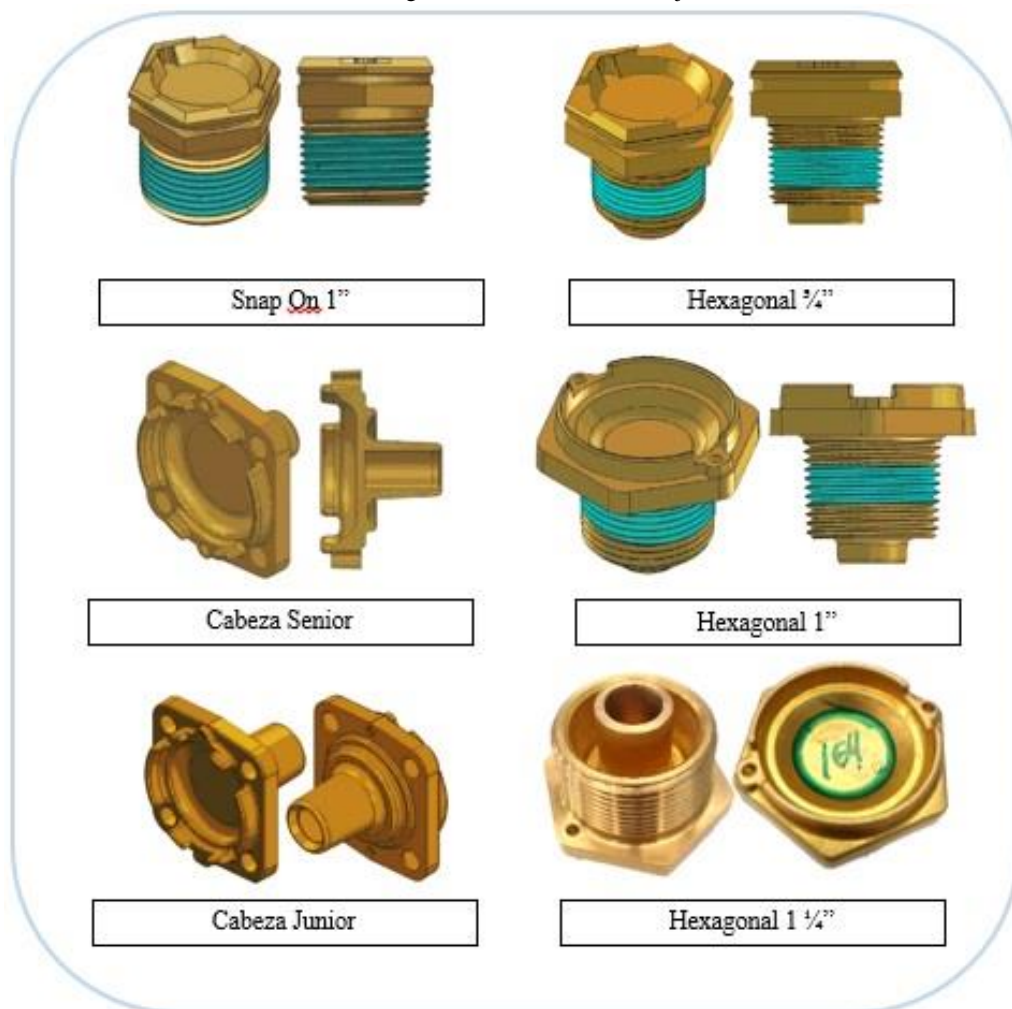
comparten ciertas similitudes a simple vista. En la figura 3.2 se observan las similitudes y siglas impresas en cada pieza.

Fig. 3.2 - Coples de acero. De izquierda a derecha PTT, DW y SSE.



En el caso de las piezas de latón (Figura 3.3), todas pertenecen al mismo proveedor y tienen la siguiente forma.

Fig. 3.3 - Cabezas de latón forjado.



Antes de comenzar se debe saber que el proceso para la preparación de las probetas de acero y de latón es el mismo para ambos casos, y que una vez preparadas, pueden ser utilizadas para realizar macroataque o microataque.

El primer paso para la preparación de las probetas consiste en cortar las piezas con una cortadora para muestras metalográficas (Fig. 3.4). La cortadora debe estar equipada con un sistema de refrigeración-lubricación para evitar el sobre calentamiento de las muestras.

Fig. 3.4 Cortadora para muestras metalográficas.



Debido a que se busca ver la forma en que fluyó el material al momento de ser forjado, es conveniente realizar un corte a cada pieza que la divida en partes iguales. El corte debe ser paralelo a la dirección en la que se cree, fluyó el material al momento de ser forjado. (Fig. 3.5)

Fig. 3.4 Coples de acero y cabezas de latón cortados.



Una vez cortadas las piezas, de cada una de ellas obtenemos dos probetas, que pueden ser usadas para realizar macroataque en una, y microataque en la otra. En cualquiera de los casos, cada probeta debe ser lijada y pulida en la cara donde fue realizado el corte. El acabado que debe tener dicha cara, se le llama acabado espejo (ver fig. 3.9).

El acabado espejo se logra lijando la cara de la probeta con diferentes lijas, iniciando con una lija de grano relativamente grueso, continuar con lijas de grano más fino, y hasta llegar a una lija de grano muy fino. Posteriormente la pieza debe ser pulida para obtener el acabado ya mencionado.

Las lijas tienen asignado un número que indica la cantidad de granos promedio por centímetro cuadrado, esto quiere decir que, entre más pequeño sea el número de la lija, más gruesos serán los granos la que conforman, y viceversa.

El pulido de la pieza debe comenzar con una lija del número 400. Se debe realizar siempre en una misma dirección y sentido. Es necesario utilizar abundante agua mientras se está lijando, esto para evitar que los residuos que se han desprendido de la pieza y de la lija, generen rayas profundas en la cara de la probeta. Es necesario observar constantemente la cara de la probeta, para saber cuándo detener el lijado y cambiar a la siguiente lija.

Para saber que es tiempo de cambiar de lija, todas las rayas que se observan en la cara de la probeta, deben verse en una misma dirección y deben tener tamaños similares.

Una vez terminado el lijado en una dirección, hay que continuar con la siguiente lija. Esta debe ser de grano más fino que la anterior, y la probeta se debe girar 90° con respecto a la posición que se tenía anteriormente. Esto se hace para observar la diferencia del rayado, evitar confusiones y saber cuándo es el momento ideal para pasar a la siguiente lija. En este caso, la cara debe tener un rayado

más fino y en una sola dirección. Este procedimiento debe repetirse cambiando la lija cada vez por una de grano más fino y hasta llegar a la lija de número 1000.

Cuando se termina con la lija del número 1000, se procede a pulir la probeta con una pulidora de probetas metalográficas (Fig. 3.5). Este tipo de pulidoras cuenta con un disco de metal que se hace girar con un motor eléctrico. Sobre el disco se coloca un paño un poco más grande que el disco, y es asegurada en todo el perímetro del disco con una abrazadera. La máquina cuenta con un sistema de lubricación por flujo de agua el cual es regulado por una válvula.

Fig. 3.5 Pulidora de probetas metalográficas.



En un dosificador de 500 ml. se deben colocar dos cucharadas cafeteras de alúmina en polvo y rellenar el resto con agua corriente. La alúmina debe tener un grosor de grano máximo de 5 micras. Esta es una mezcla que se debe agitar constantemente debido a que la alúmina no se disuelve en el agua. La alúmina es un abrasivo en polvo que, junto con la pulidora metalográfica dará el acabado espejo a probetas.

Se debe poner en marcha la máquina y abrir un poco la válvula del agua hasta obtener un ligero pero constante goteo.

Con mucho cuidado, se coloca la cara de la probeta sobre el disco con el paño, teniendo siempre la precaución de que las líneas sean perpendiculares a las anteriores. Se debe rociar constantemente la solución de alúmina y agua sobre el paño. (Fig. 3.6)

Fig. 3.6 Pulido de probeta de latón.

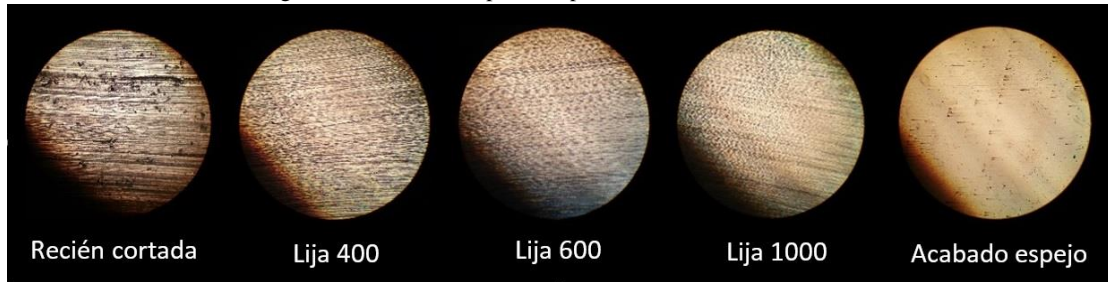


Una vez terminado este paso, se debe cambiar el paño y la solución de alúmina por una de alúmina más fina, aunque el acabado que deja la alúmina de 5 micras es suficiente para realizar el macroataque.

La siguiente figura (Figura 3.7) muestra una serie de fotos tomadas a una probeta de acero a 50X con ayuda de un microscopio óptico, el cual muestra el acabado que deja cada una de las lijas

sobre la cara de la probeta. Se observa de izquierda a derecha lo siguiente: Pieza recién cortada, lija 400, lija 600, lija 1000 y el acabado espejo.

Fig. 3.7 - Secuencia de pulido a probeta de acero visto a 100X.



La siguiente figura (Fig. 3.8) muestra una serie de fotos tomadas a una probeta de latón a 50X con ayuda de un microscopio óptico, el cual muestra el acabado que deja cada una de las lijas sobre la cara de la probeta. Se observa de izquierda a derecha lo siguiente: Pieza recién cortada, lija 400, lija 600, lija 1000 y el acabado espejo. ^[10]

Fig. 3.8 Secuencia de pulido a probeta de latón visto a 100X.

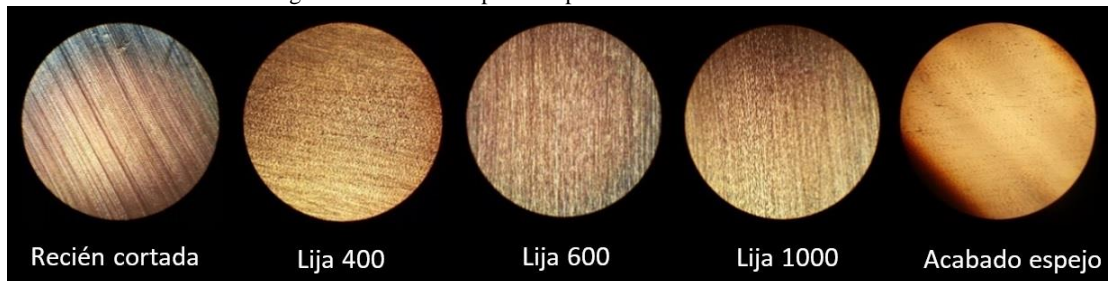


Fig. 3.9 Acabado espejo. Probeta de acero.



III.5.2 - Preparación de probetas para análisis químico

El análisis químico se lleva a cabo con un equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) por sus siglas en inglés (Fig. 3.10). Este es un análisis no destructivo el cual nos permite analizar las piezas sin la necesidad de sacrificarlas. No obstante, a las piezas se les realizaron cortes para analizarlas con más detalle buscando alguna variación en la composición química entre una y otra área de la misma pieza.

Fig. 3.10 - Pistola de fluorescencia de rayos X S1 TITAN de la marca Bruker.



Esta prueba puede ser realizada a las piezas de acero y latón teniendo como único inconveniente (según el equipo con el que se realiza la prueba) su incapacidad para detectar algunos materiales.

III.5.3 - Preparación de probetas para prueba de dureza

La prueba de dureza es realizada con un durómetro tipo Rockwell B, para lo cual es necesario que las probetas cumplan con las siguientes características:

1. Debe tener caras paralelas.
2. El espesor mínimo de la probeta puede variar dependiendo de la dureza del material. Para las pruebas realizadas en este trabajo, se consideró un espesor aproximado de 5 milímetros.
3. La superficie de la probeta en donde se llevará a cabo la prueba debe tener un área 3 veces mayor al diámetro del indentador.
4. La distancia entre una prueba y otra en una misma probeta debe ser de por lo menos 3 veces el diámetro del indentador.
5. La distancia mínima entre el borde de la probeta y el centro de la indentación debe ser de 2.5 veces el diámetro del indentador.
6. La probeta no debe tener juego (bailoteo) cuando esté colocada en la superficie en la que será ensayada.

Si la pieza no cumple con éstos puntos, se le deberá hacer las correcciones pertinentes hasta que cumpla con los requerimientos, de lo contrario la probeta no será apta para realizar la prueba.

Debido a la dureza estimada de las piezas, el indentador que se utilizó fue la bola de acero endurecido con diámetro de 1/16 de pulgada, es decir, 1.588 mm, ^[11] por lo tanto las probetas deben tener un espesor mínimo de 4.764 mm y una superficie mínima de 2.522 mm².

Para la preparación de las probetas de acero fue necesaria la ayuda de un torno (Fig. 3.11) en el cual se realizó, a cada una de las piezas, un refrentado en ambas caras de la pieza haciendo que éstas queden paralelas (Fig. 3.12).

Fig. 3.11 Torno Titanium.



Fig. 3.12 Cople refrentado y cople sin refrentar.



Un refrentado con un avance y velocidad de corte bajos son excelentes para dejar un acabado lo suficientemente fino como para realizar la prueba sin mayor preparación (Ver fig. 3.7).

Para las probetas de latón, debido a la forma que las piezas presentan, es necesario obtener pequeñas placas que cuenten con un espesor aproximado de 5 mm. Para ello se debe colocar la pieza en una cortadora metalográfica y realizar dos cortes cuidando que éstos sean paralelos.

Fig. 3.13 Cortadora de muestras metalográficas.



El acabado que deja la cortadora metalográfica es lo suficientemente bueno como para realizar la prueba de dureza sin mayor preparación (ver fig. 3.8).

III.6 - Macroataque. Norma ASTM E 340-00

El macroataque en este proceso fue utilizado para encontrar principalmente líneas de flujo en un material que ha sido forjado. También puede ser utilizado para encontrar posibles problemas en el diseño de una pieza forjada como puntos críticos, que puedan dar paso a la formación de grietas y con ello el posible fallo de la pieza. Sirve también para observar la estructura interna de los materiales, la penetración de la soldadura, la dilución de un material en otro, etc. ^[15]

El macroataque consiste básicamente en sumergir la probeta previamente preparada en una solución ácida. Idealmente las piezas forjadas en caliente, cuando se encuentran a temperatura ambiente, deben presentarse un estado bifásico, es decir, está formado por dos fases. El ácido que contiene dicha solución, corroe el material, pero la velocidad con la que corroe las diferentes fases, es diferente debido a la constitución de cada una de las ellas. El ácido corroe más rápido una de las fases, dejando al descubierto la segunda fase, generando un contraste entre fases que permite observar los granos que conforman la pieza, su deformación y la alineación, algo que puede se puede traducir como *líneas de flujo* las cuales pueden ser observadas en algunos casos a simple vista.

Para realizar el macroataque a las piezas de acero y de latón, se consultó la norma **ASTM E 340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys**. Esta norma contiene una lista de las soluciones que se pueden utilizar para realizar macroataques a los metales y sus aleaciones.

La norma indica, en algunos casos, más de un método para realizar el macroataque. Para el caso del acero, se eligieron dos métodos.

Para el macroataque a las piezas de latón, se buscó un procedimiento basado en la norma **ASTM E 340-00** pero a pesar de que se hicieron varias pruebas, los resultados obtenidos no eran los esperados. Algunos de los macroataques eran muy agresivos y/o demasiado acelerados. Por razones como esta es que fueron descartados para proponerlos como opciones viables para usarse en la empresa. Se optó, entonces, por diseñar métodos menos agresivos y con una velocidad de ataque más baja.

Algunos de los siguientes macroataques fueron basados en la norma **ASTM E340-00** sin embargo hubo que hacer modificaciones en los porcentajes de las soluciones indicadas para obtener mejores resultados y en uno de los casos del latón fue tomada una solución indicada para microataque por la norma **ASTM E 407-99**.

III.6.1 - Macroataque a piezas de acero: Opción 1

La norma ASTM E 340-00 indica el uso de una solución formada en un 50% de ácido clorhídrico (HCl) y 50% de agua destilada (H₂O).

Cabe mencionar que se realizaron varias pruebas y no todas están basadas en la norma ya que fue tomada sólo como referencia y algunos procesos fueron ajustados según las necesidades.

Reactivos:

HCl (concentrado)	150 ml
H ₂ O	150 ml
Alcohol etílico	50 ml

Materiales:

1	Recipiente de cristal refractario
1	Parrilla de inducción
1	Tenazas
1	Termómetro
3	Vasos de precipitados de 250 ml
1	Pipeta de 25 ml
1	Pera de goma de tres vías para pipeta
1	Probeta graduada de 50 ml
*	Algodón

Equipo de seguridad:

Guantes de látex

Bata

Zapatos antiderrapantes

Anteojos de seguridad

Campana de extracción de gases

Cubrebocas

Procedimiento:

1. Limpiar todas las piezas con ayuda del algodón y el alcohol. Deben estar libres de grasas y de cualquier otro residuo.
2. Con ayuda de la probeta graduada medir 150 mL de H₂O destilada y vaciarla en el recipiente de cristal refractario.
3. En otro de los vasos de precipitados medir con ayuda de la pipeta y la pera para pipeta, 150 mL de HCl concentrado.
4. Vaciar lentamente el HCl concentrado en el recipiente de cristal refractario teniendo cuidado de que el ácido se vaya deslizando por las paredes del recipiente.

5. Colocar el recipiente con la solución en la parrilla de inducción y esperar a que se caliente entre 70 u 80 grados Celsius.
6. Una vez que la solución ha alcanzado la temperatura, se colocan las piezas de acero dentro del recipiente (ver fig. 3.14) y se cronometran 30 minutos.
7. Pasados los 30 minutos se sacan las piezas de la solución y se lavan bajo el chorro del agua con ayuda de una fibra vegetal.
8. En algunos casos puede ser necesario dar una ligera pulida a las piezas con ayuda de una lija de número 1200 y posteriormente con la pulidora metalográfica.
9. Las líneas de flujo deben mostrarse a simple vista.

Fig. 3.14 Pieza de acero dentro de la solución de HCL al 50% a 80°C.



III.6.2 - Macroataque a piezas de acero: Opción 2

Este proceso es básicamente el mismo que el anterior pero se sustituye el HCl por ácido nítrico (HNO_3). Este es un macroataque que surgió como resultado de una confusión, ya que en el laboratorio donde se llevaban a cabo los ensayos, se usaba también HNO_3 para hacer macroataques a piezas de latón. Cuando se pretendía realizar el macroataque anterior, se tomó por error HNO_3 en vez de HCl y se preparó la solución con las mismas proporciones. Al final del macroataque se observó el error y a pesar de esto, se observaron resultados similares y satisfactorios.

Reactivos:

HNO_3 (concentrado)	150 ml
H_2O	150 ml
Alcohol etílico	50 ml

Materiales:

1	Recipiente de cristal refractario
1	Parrilla de inducción
1	Tenazas
1	Termómetro
3	Vasos de precipitados de 250 ml
1	Pipeta de 25 ml
1	Pera de goma de tres vías para pipeta
1	Probeta graduada de 50 ml
*	Algodón

Equipo de seguridad:

Guantes de látex

Bata

Zapatos antiderrapantes

Anteojos de seguridad
Campana de extracción de gases
Cubrebocas

Procedimiento:

1. Limpiar todas las piezas con ayuda del algodón y el alcohol. Deben estar libres de grasas y de cualquier otro residuo.
2. Con ayuda de la probeta graduada medir 150 mL de H₂O destilada y vaciarla en el recipiente de cristal refractario.
3. En otro de los vasos de precipitados medir con ayuda de la pipeta y la pera para pipeta, 150 mL de HNO₃ concentrado.
4. Vaciar lentamente el HNO₃ concentrado en el recipiente de cristal refractario teniendo cuidado de que el ácido se vaya deslizando por las paredes del recipiente.
5. Colocar el recipiente con la solución en la parrilla de inducción y esperar a que se caliente entre 70 u 80 grados Celsius.
6. Una vez que la solución ha alcanzado la temperatura, se colocan las piezas de acero dentro del recipiente y se cronometran 30 minutos (ver fig. 3.15).
7. Pasados los 30 minutos se sacan las piezas de la solución y se lavan bajo el chorro del agua con ayuda de una fibra vegetal.
8. En algunos casos puede ser necesario dar una ligera pulida con ayuda de una lija de número 1200 y posteriormente con la pulidora metalográfica.
9. Las líneas de flujo deben mostrarse a simple vista.

Fig. 3.15 Piezas de acero dentro de solución de HNO₃ al 50% a 80°C.



III.6.3 - Macroataque a piezas de latón: Opción 1

Este macroataque fue realizado tomando como base una de las soluciones que indica la norma ASTM E 407-99, la cual indica las soluciones que se deben emplear para realizar *microataques* a los metales y sus aleaciones. Esta norma sugiere para el microataque del latón dos soluciones, una solución A que contiene 40 g. de CrO₃, 1.5 g. de Na₂SO₄ y 200 ml de H₂O; y una solución B que contiene 40 g. de CrO₃ y 200 ml de H₂O.

Se tomó únicamente la solución A.

Reactivos:

Ácido crómico (trióxido de cromo) CrO ₃	40g.
Sulfato de sodio Na ₂ SO ₄	1.5g.
Agua destilada H ₂ O	200mL.
Alcohol etílico	20mL

Materiales:

Vaso de precipitados 250mL	Cantidad:	2
Vaso de precipitados 50mL		2
Recipiente donde quepa la pieza		1

Probeta de 50mL	1
Cuchara pequeña	2
Agitador de vidrio	1
Pinzas	1
Cronómetro	1
Algodón	*
Lupa	1
Báscula electrónica de 300g.	1

Equipo de seguridad:

Guantes de látex
 Bata
 Zapatos antiderrapantes
 Anteojos de seguridad
 Campana de extracción de gases
 Cubrebocas

Procedimiento:

1. Colocar un vaso de precipitados de 50mL dentro de la báscula y esperar un momento hasta que la báscula deje de variar, posteriormente presionar el botón de tarar para colocar el indicador en ceros.
2. Con ayuda de una cuchara, colocar dentro del vaso de precipitados que se encuentra en la báscula 40g de ácido crómico y se vacía en uno de los vasos de precipitados de 250mL.
3. Se repite el paso 1. pero con el segundo vaso de precipitados de 50mL.
4. Con ayuda de la segunda cuchara se pesa 1.5g de Sulfato de sodio en el vaso de precipitados de 50mL que se encuentra en la báscula y se vacía en el vaso de precipitados que contiene los 40g de ácido crómico.
5. Con ayuda de la probeta de 50mL se miden 200mL de agua destilada en el segundo vaso de precipitados de 250mL.
6. A continuación se vacía el ácido crómico y el sulfato de sodio en el vaso de precipitados que contiene el agua destilada y con ayuda de un agitador, se mueve hasta que todos los sólidos se hayan diluido.
7. Se vacía la solución en el recipiente donde será sumergida la pieza.
8. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
9. Con ayuda de las pinzas y con mucha precaución se coloca la pieza dentro de la solución cuidando que quede totalmente sumergida (ver fig. 3.16). Se debe comenzar a cronometrar el tiempo en cuanto la pieza se encuentre totalmente sumergida en la solución.
10. Con el agitador se debe agitar levemente la solución teniendo cuidado de no rozar la pieza con él ya que puede provocar rayaduras en la superficie de la pieza.
11. Pasados 20 minutos, nuevamente con ayuda de las pinzas y teniendo cuidado de no rayar la superficie de la pieza, ésta se debe sacar y enjuagar con abundante agua.
12. Con un algodón se secan todas las superficies de la pieza.
13. Observar los resultados con ayuda de la lupa.

Fig. 3.16 Pieza de latón sumergida en solución de ácido crómico y sulfato de sodio.



III.6.4 - Macroataque a piezas de latón: Opción 2

Este macroataque fue realizado con base en la norma ASTM E340-00 pero con una variación en las proporciones de los reactivos ocupados. Esto debido a que la velocidad con la que se corroe el material de la probeta es demasiado rápido y por ende es muy fácil sobreatacar la superficie de la pieza, lo cual no es conveniente ya que no se obtendrían los resultados esperados.

Reactivos:

Ácido nítrico HNO ₃ concentrado	25mL.
Nitrato de plata AgNO ₃	5g.
Agua destilada H ₂ O	75mL.
Alcohol etílico	20mL

Materiales:

Materiales:	Cantidad:
Vaso de precipitados 250mL	1
Vaso de precipitados 50mL	2
Recipiente de cristal refractario 1L	1
Probeta de 100mL	1
Parrilla eléctrica	1
Pipeta de 25mL	1
Pera de goma para pipeta	1
Termómetro	1
Cuchara pequeña	1
Agitador de vidrio	1
Pinzas	1
Cronómetro	1
Algodón	*
Lupa	1
Báscula electrónica de 300g.	1

Equipo de seguridad:

- Guantes de látex
- Bata
- Zapatos antiderrapantes
- Anteojos de seguridad
- Campana de extracción de gases
- Cubrebocas

Procedimiento:

1. Calentar en el recipiente de cristal refractario agua común hasta los 60°C con ayuda de la parrilla eléctrica. Corroborar la temperatura con el termómetro.

2. Con la probeta de 100mL medir 75mL de agua destilada y vaciarla en el vaso de precipitados de 250mL.
3. Vaciar del frasco del ácido nítrico a un vaso de precipitados de 50mL aproximadamente 25mL.
4. Con ayuda de la pipeta y la pera para pipeta medir 25mL de ácido nítrico y vaciarlo lentamente y por las paredes en el vaso de precipitados que contiene el agua destilada.
5. Colocar un vaso de precipitados de 50mL dentro de la báscula y esperar un momento hasta que la báscula deje de variar, posteriormente presionar el botón de tarar para colocar el indicador en ceros.
6. Colocar dentro del vaso de precipitados que se encuentra en la báscula 5g. de Nitrato de plata y vaciarlo en la solución de agua destilada con ácido nítrico.
7. Con el agitador de vidrio mezclar la solución hasta que se desintegren todos los sólidos.
8. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
9. Tomar fijamente la pieza con las pinzas y sumergirla en la solución sin soltarla dentro del recipiente y agitándola levemente (ver fig. 3.17). Cronometrar 10 segundos.
10. Una vez cumplidos los 10 segundos, se saca la pieza y se enjuaga con el agua previamente calentada.
11. Se saca del agua caliente y enseguida se enjuaga y se limpia en el chorro del agua de llave con ayuda de una fibra suave para eliminar los residuos superficiales.
12. Secar todas las superficies con ayuda de un algodón.
13. Observar los resultados con ayuda de la lupa.
14. Si las líneas de flujo no se observan claramente, se puede repetir el procedimiento una vez más a partir del paso 9. Si después de repetir el procedimiento no se observa una mejora, probablemente haya algún problema con la pieza.

Fig. 3.17 Pieza de latón sumergida en Solución de HNO_3 y AgNO_3 .



III.6.5 - Macroataque a piezas de latón: Opción 3

Este macroataque se llevó a cabo basado en la norma ASTM E340-00 con los mismos porcentajes y reactivos que indica. Esta norma indica a grandes rasgos el procedimiento que se debe seguir. Sin embargo, la metodología ha sido desarrollada empíricamente y por este motivo es que no se tiene el tiempo exacto que se debe mantener sumergida la pieza dentro de la solución.

Los materiales y el equipo de seguridad son exactamente los mismos que en la opción 2 del macroataque para latón. Los reactivos también son los mismos pero las cantidades indicadas por la norma son las siguientes:

Ácido nítrico HNO_3	50mL
Nitrato de plata AgNO_3	5g
Agua destilada H_2O	50mL

Procedimiento:

1. Calentar en el recipiente de cristal refractario agua común hasta los 60°C con ayuda de la parrilla eléctrica. Corroborar la temperatura con el termómetro.
2. Con la probeta de 100mL medir 75mL de agua destilada y vaciarla en el vaso de precipitados de 250mL.
3. Vaciar del frasco del ácido nítrico a un vaso de precipitados de 50mL aproximadamente 25mL.
4. Con ayuda de la pipeta y la pera para pipeta medir 25mL de ácido nítrico y vaciarlo lentamente y por las paredes en el vaso de precipitados que contiene el agua destilada.
5. Colocar un vaso de precipitados de 50mL dentro de la báscula y esperar un momento hasta que la báscula deje de variar, posteriormente presionar el botón de tarar para colocar el indicador en ceros.
6. Colocar dentro del vaso de precipitados que se encuentra en la báscula 5g. de Nitrato de plata y vaciarlo en la solución de agua destilada con ácido nítrico.
7. Con el agitador de vidrio mezclar la solución hasta que se desintegren todos los sólidos.
8. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
9. Tomar fijamente la pieza con las pinzas y sumergirla en la solución sin soltarla dentro del recipiente y agitándola levemente. Cronometrar de 3 a 5 segundos.
10. Una vez cumplido el tiempo de ataque, se saca la pieza y se enjuaga con el agua previamente calentada.
11. Se saca del agua caliente y enseguida se enjuaga y se limpia en el chorro del agua de llave con ayuda de una fibra suave para eliminar los residuos superficiales.
12. Secar todas las superficies con ayuda de un algodón.
13. Observar los resultados con ayuda de la lupa.

Fig. 3.18 Pieza de latón sumergida en HNO_3 y AgNO_3 .



III.6.6 - Macroataque a piezas de latón: Opción 4

Este macroataque fue parte de la experimentación que se llevó a cabo durante la búsqueda de la metodología más eficiente para este proceso, por lo tanto, no fue basado en ninguna norma. Es un macroataque que se llevó a cabo con HNO_3 al 100%.

Reactivos:

Ácido nítrico HNO_3 100mL

Alcohol etílico 20mL

Materiales:

Vaso de precipitados 250mL 1

Probeta de 100mL 1

Pinzas 1

Lupa 1

Algodón *

Equipo de seguridad:

Guantes de látex

Bata

Zapatos antiderrapantes

Anteojos de seguridad

Campana de extracción de gases

Cubre bocas

Procedimiento:

1. Medir 100mL de ácido nítrico en la probeta y vaciarlo con cuidado en el vaso de precipitados de 250mL.
2. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
3. Tomar fijamente la pieza con las pinzas y sumergirla en la solución sin soltarla dentro del recipiente y agitándola levemente (ver fig. 3.19). Cronometrar 3 segundos.
4. Una vez cumplido el tiempo de ataque, se saca la pieza y se enjuaga con agua del grifo. Puede ser necesario limpiarla con ayuda de una fibra suave para quitar el exceso de residuos.
5. Secar con ayuda de un algodón seco.
6. Observar los resultados con ayuda de la lupa.

Fig. 3.19 Pieza de latón sumergida en HNO_3 concentrado.



Debido a la alta cantidad de ácido utilizados en las opciones 3 y 4, los macroataques se realizan de manera muy rápida, esto puede facilitar el sobre ataque a las piezas.

III.7 - Microataque. Norma ASTM E 407-99

El microataque es un procedimiento que se utiliza para analizar piezas de metal en busca de granos, su tamaño, deformación, orientación, límites de grano, etc. Se pueden observar también las diferentes fases del material (si éste está formado por más de una fase). El microataque puede revelar también grietas en el material, incrustaciones, burbujas, e infinidad de cosas que pueden llegar a ser de gran relevancia para piezas que deben desempeñar trabajos específicos.

Los microataques realizados fueron basados en la norma **ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals And Alloys**, que ofrece una lista de los diferentes reactivos que normalmente son utilizados para el microataque. También da una breve descripción de lo que se debe hacer para cada proceso.

III.7.1 - Microataque a piezas de acero; Opción 1

Este microataque se realizó basado en la norma ASTM E407-99. Es una solución conocida comúnmente como Nital con una concentración aproximada al 5%.

Reactivos:

Ácido nítrico HNO ₃	5mL
Alcohol etílico o metílico	100mL

Materiales:

Vaso de precipitados 250mL	2
Mortero mediano	1
Probeta de 100mL	1
Pipeta de 10mL	1
Pera de goma para pipeta	1
Cronómetro	1
Algodón	*
Microscopio metalográfico	1

Equipo de seguridad:

Guantes de látex
Bata
Zapatos antiderrapantes
Anteojos de seguridad
Campana de extracción de gases
Cubrebocas

Procedimiento:

1. Con la probeta de 100mL medir 100mL de alcohol etílico y vaciarlo en el vaso de precipitados de 250mL.
2. Vaciar en el vaso de precipitados de 50mL aproximadamente 15mL de ácido nítrico.
3. Con ayuda de la pipeta y la pera para pipeta medir 5 mL de ácido nítrico y vaciarlo lentamente sobre las paredes del vaso de precipitados de 250 mL que contiene el alcohol etílico.
4. Colocar aproximadamente 100mL de alcohol etílico en el segundo vaso de precipitados de 250mL.
5. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
6. Con ayuda de las pinzas sumergir la pieza en la solución (ver fig. 3.20) y cronometrar 5 segundos aproximadamente. La norma dice que la pieza debe permanecer sumergida desde unos pocos segundos hasta un minuto. La pieza puede ser retirada por unos instantes cada 5 segundos para observar el ataque. El microataque debe ser detenido apenas la pieza pierda el brillo que dejó el pulido.

7. Retirar la muestra de la solución ácida y sumergirla en el vaso que contiene únicamente alcohol etílico.
8. Sacar la pieza del alcohol y secarla con ayuda de un algodón
9. Una vez seca, se coloca en el microscopio para su observación.

Fig. 3.20 Microataque con solución de alcohol etílico y HNO₃ al 5% a pieza de acero.



III.7.2 - Microataque a piezas de acero; Opción 2

Para este microataque la norma ASTM E407-99 indica una solución de ácido pícrico, HCl y alcohol metílico o alcohol etílico. Esta es una solución saturada por la cantidad de ácido pícrico.

Reactivos:

Ácido pícrico	10g
Ácido clorhídrico	5 gotas
Alcohol etílico o metílico	100mL

Materiales:

Vaso de precipitados 250mL	2
Vaso de precipitados 50mL	1
Cuchara de plástico	1
Probeta de 100mL	1
Gotero de vidrio	1
Cronómetro	1
Algodón	*
Microscopio metalográfico	1

Equipo de seguridad:

- Guantes de látex
- Bata
- Zapatos antiderrapantes
- Anteojos de seguridad
- Campana de extracción de gases
- Cubrebocas

Procedimiento:

1. Con la probeta de 100mL medir 100mL de alcohol etílico y vaciarlo en uno de los vasos de precipitados de 250mL.
2. Medir aproximadamente 150mL de alcohol etílico o metílico y vaciarlo en el segundo vaso de precipitados de 250mL.
3. Colocar el vaso de precipitados de 50mL en la báscula electrónica y presionar el botón de tarar para colocar en ceros la carátula.

4. Con ayuda de la cuchara, colocar ácido pícrico dentro del vaso que se encuentra en la báscula hasta que ésta indique 10g.
5. Vaciar lentamente y con cuidado el ácido pícrico en el vaso de precipitados que contiene 100mL de alcohol.
6. Agregar a la solución 5 gotas de HCl con ayuda del gotero.
7. Agitar levemente la solución hasta que se haya disuelto al máximo posible el ácido pícrico. Cabe mencionar que la solución quedará saturada de ácido pícrico.
8. Con ayuda de un algodón y alcohol etílico se limpian las piezas para evitar que tengan residuos grasos o cualquier sustancia que pueda alterar los resultados.
9. Con ayuda de las pinzas sumergir la pieza en la solución y cronometrar 5 segundos aproximadamente. La norma dice que la pieza debe permanecer sumergida desde unos pocos segundos hasta un minuto. La pieza puede ser retirada por unos instantes cada 5 segundos para observar el ataque. El microataque debe ser detenido apenas la pieza pierda el brillo que dejó el pulido.
10. Retirar la muestra de la solución ácida y sumergirla en el vaso que contiene únicamente alcohol etílico.
11. Sacar la pieza del alcohol y secarla con ayuda de un algodón
12. Una vez seca, se coloca en el microscopio para su observación.

III.7.3 - Microataque a piezas de latón

El microataque a las piezas de latón también fue realizado con base en la norma ASTM E407-99. La norma sugiere un microataque con dos soluciones, A y B (ver fig. 3.21). La solución A es una mezcla de 40g de ácido crómico CrO_3 , 1.5 g. de sulfato de sodio Na_2SO_4 y 200 ml de agua destilada.

La solución B contiene 40g de ácido crómico CrO_3 y 200ml de agua destilada.

Reactivos de solución A:

Ácido crómico CrO_3	40g.
Sulfato de sodio Na_2SO_4	1.7g.
Agua destilada H_2O	200ml.

Reactivos de solución B:

Ácido crómico CrO_3	40g.
Agua destilada H_2O	200ml.
Alcohol etílico	20ml.

Materiales:

Vaso de precipitados 250mL	2
Vaso de precipitados 50mL	1
Vaso de precipitados 10mL	1
Cuchara de plástico	2
Probeta de 100mL	1
Agitador de vidrio	1
Báscula digital	1
Pinzas de laboratorio	1
Cronómetro	1
Algodón	*
Microscopio metalográfico	1

Equipo de seguridad

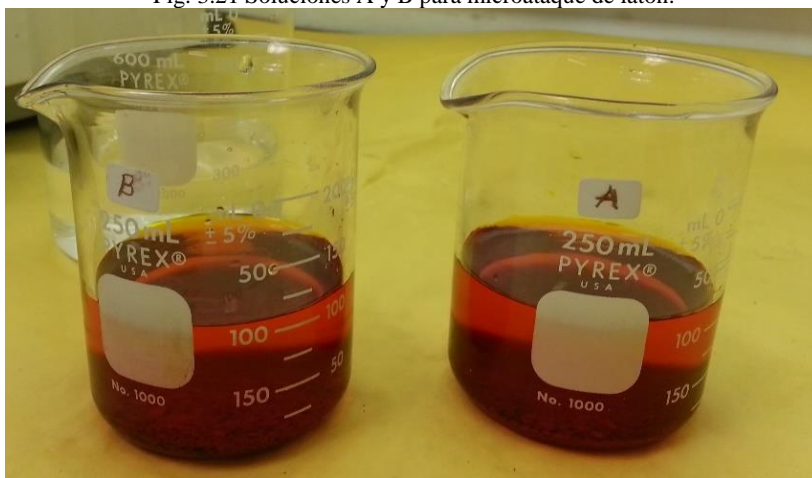
Guantes de látex
Bata

Zapatos antiderrapantes
Anteojos de seguridad
Campana de extracción de gases
Cubrebocas

Procedimiento:

1. Colocar 200ml de agua destilada en cada uno de los vasos de precipitados de 250ml con ayuda de la probeta de 100ml y etiquetarlos, uno con la letra A y el otro con la letra B.
2. Con ayuda de la báscula, el vaso de precipitados de 10ml y una cuchara de plástico, pesar 1.7g de NaSO_4 y vaciarlo en el vaso marcado con la letra A.
3. Con ayuda de la báscula, el vaso de precipitados de 50ml y una cuchara de plástico, pesar 40g de CrO_3 y vaciarlo en el vaso marcado con la letra A.
4. Con ayuda de la báscula, el vaso de precipitados de 50ml y una cuchara de plástico, pesar 40g de CrO_3 y vaciarlo en el vaso marcado con la letra B.
5. Agitar el contenido de los vasos A y B con ayuda de un agitador hasta que todos los sólidos se diluyan.
6. Humedecer un poco de algodón y limpiar las piezas con él para evitar residuos que puedan afectar en los resultados.
7. Con ayuda de las pinzas, sumergir cuidadosamente la pieza dentro del recipiente con la solución A y agitar levemente durante unos cuantos segundos.
8. Posteriormente sacar la pieza y sumergirla en la solución B a modo de enjuagarla.
9. Sacar la pieza de la solución B y enjuagar con abundante agua del grifo.
10. Con un algodón seco, secar la pieza.
11. Colocar la pieza en el porta probetas del microscopio y observar los resultados.

Fig. 3.21 Soluciones A y B para microataque de latón.



III.8 - Análisis químico

El análisis químico es utilizado para saber la composición química y las proporciones de cada elemento químico que componen una sustancia o un material, en este caso la composición química de los coples de acero y las cabezas de latón.

Estas pruebas fueron llevadas a cabo con un equipo de Fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés) de la marca Bruker, modelo S1 Titan 500 (ver fig. 3.22), el cual dispara un rayo X en la superficie del material y el aparato detecta la fluorescencia de los rayos dando así un resultado sumamente preciso. Este equipo cuenta con una base la cual sostiene la pistola XRF y tiene una superficie en la cual se coloca la pieza que se analizará. Posteriormente se realiza el disparo de rayos X y se espera unos cuantos segundos hasta que aparezca en la pantalla de la pistola el resultado obtenido.

Es una prueba muy rápida y sencilla la cual no requiere de mucha preparación de las piezas que se analizarán. Basta con tener la superficie de la pieza libre de cualquier impureza que pudiera

hacer variar el resultado. Esto se puede lograr limpiando la superficie de las piezas con un algodón levemente humedecido con alcohol etílico.

A pesar de que no es necesario realizar ningún corte a las piezas para esta prueba, para el caso de las piezas de latón fue llevado a cabo dos cortes para cada pieza ya que se estudia la homogeneidad de la composición química en toda la pieza.

Fueron llevadas a cabo tres pruebas por cada una de las piezas y se hizo un promedio de los tres resultados obtenidos.

Para el caso de los coples de acero, solo fue necesario realizar una prueba para cada pieza ya que la empresa no ha tenido problemas con este tipo de piezas y no fue requerida tanta atención para las mismas.

Fig. 3.22 Ejemplo del análisis químico a una válvula de latón.



III.9 - Prueba de dureza

Fue realizada con un durómetro de la marca Phase II, modelo THT-10, con el que se pueden realizar pruebas de dureza tipo Rockwell B y Rockwell C.

Para llevar a cabo el ensayo se deben seleccionar las probetas que son aptas para la prueba, esto se hace colocando la probeta en una superficie plana y aplicando una pequeña fuerza en diferentes zonas de la probeta, si la probeta presenta algún movimiento de desbalance, esto quiere decir que la probeta no es apta para la prueba, por el contrario, si la probeta no presenta movimiento alguno, se puede continuar con la prueba.

La prueba en este caso es la misma para los dos materiales que se estudian ya que debido a su composición química, ambos son aptos para la misma prueba.

Procedimiento:

1. Se debe seleccionar la escala en la que se llevará a cabo la prueba. La norma ASTM E 18-03 muestra una tabla con las diferentes escalas Rockwell (Tabla 3.1) y los materiales a los que puede ser aplicada dicha escala, así como el indentador que será utilizado para la prueba.
2. Los materiales en estudio para este caso son: acero A105 y latón forjable (C37700) que corresponden al acero suave y aleación de cobre respectivamente, por lo tanto, se selecciona la escala Rockwell B que de manera implícita utiliza un indentador de bola de acero endurecido de $\frac{1}{16}$ " y una carga de 100Kg.

Tabla 3.1 Escala de ensayo de dureza Rockwell tomada de ASTM E 18-03.

Scale Symbol	Indenter	Total Test Force, kgf	Dial Figures	Typical Applications of Scales
B	1/16-in. (1.588-mm) ball	100	red	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc.
C	diamond	150	black	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel, and other materials harder than B100.
A	diamond	60	black	Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel.
D	diamond	100	black	Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron.
E	1/8-in. (3.175-mm) ball	100	red	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals.
F	1/16-in. (1.588-mm) ball	60	red	Annealed copper alloys, thin soft sheet metals.
G	1/16-in. (1.588-mm) ball	150	red	Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys. Upper limit G92 to avoid possible flattening of ball.
H	1/8-in. (3.175-mm) ball	60	red	Aluminum, zinc, lead. Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect.
K	1/8-in. (3.175-mm) ball	150	red	
L	1/4-in. (6.350-mm) ball	60	red	
M	1/4-in. (6.350-mm) ball	100	red	
P	1/4-in. (6.350-mm) ball	150	red	
R	1/2-in. (12.70-mm) ball	60	red	
S	1/2-in. (12.70-mm) ball	100	red	
V	1/2-in. (12.70-mm) ball	150	red	

- Colocar la perilla de selección (fig. 3.23) en la carga de 100Kg que se aplicará.

Fig. 3.23 - Perilla de selección de carga de durómetro Rockwell.



- Colocar en la plataforma de ensayo la probeta seleccionada.

Fig. 3.24 Probeta colocada en la plataforma de ensayo.



- Se hace subir la plataforma de ensayo hasta que la probeta apenas toque el indentador. En este punto la aguja pequeña que se encuentra en la carátula del durómetro debe verse más o menos como se muestra en la fig. 3.25.

Fig. 3.25 Posición de las agujas en la carátula del durómetro sin carga ni precarga.



- En seguida se aplica la precarga de 10Kg. Esto se hace girando la rueda que sube la plataforma, de una sola vez y sin pausas, hasta que la aguja de precarga se vea como en la figura 3.26.

Fig. 3.26 Aguja de precarga con precarga aplicada.



7. A continuación se gira la carátula principal hasta que la aguja principal indique en la letra B (fig. 3.27).

Fig. 3.27 Carátula del durómetro antes de aplicar la carga principal.



8. Se aplica la carga de principal (100Kg). Esto se hace jalando la palanca que tiene la etiqueta "Loading" hacia donde indica la flecha (ver fig. 3.28).

Fig. 3.28 Palanca para aplicar la carga principal.



9. En la carátula (fig. 3.29) se observa que la aguja grande gira en sentido anti-horario y se va deteniendo poco a poco. Es importante esperar a que la aguja se detenga por completo. Normalmente 30 segundos son suficientes.

Fig. 3.29 La carátula muestra la deformación total que sufre la pieza.



10. Una vez transcurridos los 30 segundos se debe empujar la palanca que se encuentra debajo de la perilla de selección de carga (ver fig. 3.30) hasta que se escuche un clic para quitar la carga principal aplicada.

Fig. 3.30 Perilla para quitar la carga principal.



11. Ahora se toma el valor indicado en por la aguja grande en la carátula. Este valor es el que indica la dureza de la probeta en la escala que se seleccionó y se representa de la siguiente forma: HRB que en inglés significa “Hardness Rockwell B” y el valor que indica la aguja grande. Por ejemplo **HRB 56**.
12. Una vez que se obtiene el valor de la dureza, no queda más que quitar la precarga para liberar la probeta.

Hemos visto ya como se lleva a cabo la prueba de dureza con un durómetro de tipo Rockwell B. Es un procedimiento que si bien es muy sencillo, es pertinente tener en cuenta varios detalles que ayudarán a obtener un resultados preciso y lo más real posible.

El Durómetro debe encontrarse en una base bien cimentada para evitar vibraciones en el equipo. Las vibraciones pueden alterar los resultados arrojados por el durómetro.

La base donde será montado el durómetro debe estar perfectamente nivelado horizontalmente. Los resultados que arroja un durómetro mal nivelado pueden ser erróneos debido a que la carga aplicada va dirigida a una dirección diferente a la que apunta el indentador.

Se debe tener cuidado de revisar que el indentador no esté dañado. Un indentador dañado debe ser sustituido ya que es inservible para realizar más pruebas. La principal causa de daños en un indentador es porque ha sufrido golpes. Debido a su alta dureza, tienen una fragilidad muy alta, y un ligero golpe puede ocasionar la fractura del mismo. Es indispensable evitar que se caiga.

IV. Resultados y Discusión

En este capítulo están recopilados los resultados de todas las pruebas realizadas y documentadas durante el proyecto de investigación. Cabe mencionar que no todas las pruebas pudieron ser documentadas completamente.

IV.1 - Macroataque a piezas de acero

El proyecto contempló desarrollar un método para realizar macroataque a piezas de acero y localizar líneas de flujo dentro del material en caso de que éstas existieran y así reconocer si las piezas son forjadas o no.

Los resultados del macroataque a las piezas de acero se pueden observar en varios casos como se muestra en la figura 4.1, en la cual se pueden ver las líneas de flujo del material mayormente en la parte céntrica de la cara de la pieza. Este caso en particular fue obtenido simplemente limpiando la pieza con abundante agua justo después del macroataque.

Las líneas de flujo pueden ser vistas claramente a simple vista sin importar cuál de los dos métodos sea utilizado.

Fig. 4.1 - Pieza de acero macroatacada.



En algunos casos las piezas pudieran no mostrar líneas de flujo a simple vista o puede haber dificultad para observarlas. En la siguiente imagen (Fig. 4.2) se puede observar una pieza macroatacada en la cual se dificulta observar las líneas de flujo a simple vista. Esta dificultad para observar las líneas se debe a una ligera capa de residuos de material que queda adherida a la superficie de la pieza.

Fig. 4.2 - Pieza macroatacada con dificultad para observar líneas de flujo.



Los residuos de quedan adheridos a la superficie del materia se pueden eliminar frotando la superficie con una lija de número 1000 y dando una leve pulida con la pulidora metalográfica. Con esto se obtiene una superficie brillante y una mejor perspectiva de las líneas de flujo (fig. 4.3).

Fig. 4.3 - Pieza de acero macroatacada y posteriormente pulida.



Basados en la información encontrada, y haciendo una comparación con los resultados obtenidos en el macroataque de las piezas de acero, se puede entender que las piezas fueron forjadas posiblemente en forja de matriz cerrada (forja sin rebaba) debido a que no se observa un patrón de flujo que indique la salida de rebaba. Este tipo de forja es llevada a cabo comúnmente en prensas hidráulicas.

IV.2 - Macroataque a piezas de latón

En el caso de las piezas de latón, fue requerido tener un registro más detallado de los resultados de cada una de las piezas debido a que son provistas únicamente por un fabricante. Precisamente son las piezas de latón las que han reportado mayor índice de falla al ser maquinadas.

En el capítulo III.6 de este trabajo se mostraron cuatro procedimientos para realizar el macroataque a piezas de latón, sin embargo, no se pudieron documentar los intentos fallidos para encontrar las líneas de flujo. Es por ello que se dio mayor énfasis a los resultados que en los que sí encontramos líneas de flujo.

Varios de los resultados obtenidos fueron poco satisfactorios, ya sea por la dificultad para observar las líneas de flujo, o simplemente porque no se mostraban líneas de flujo en el material a pesar de que se nos aseguró que las piezas eran forjadas. En algunos casos a pesar de cambiar en distintas ocasiones los procedimientos y los reactivos, los resultados eran negativos, por así decirlo (ver fig. 4.4).

Fig. 4.4 - Perfil de pieza de latón macroatacada, con dificultad para ver líneas de flujo.



A diferencia de las piezas de acero, en las piezas de latón el ácido no logra penetrar más allá de la superficie. Por lo que no es posible pulir las piezas para mejorar la visibilidad de las líneas, es decir, si una pieza no ha mostrado líneas de flujo, lo único que se puede hacer para mejorar su visibilidad es sumergir nuevamente la pieza en la solución. Si después de haber hecho esto no se logran observar líneas de flujo, o su visibilidad es pobre, entonces se debe optar por una forma diferente de atacar la pieza.

Realizando varios intentos con el mismo proceso y también procesos diferentes, se descubrió que en algunos casos el problema estaba en las piezas, y aunque no se logró saber por qué no se veían líneas, se pudo constatar que eran casos aislados ya que al realizar el macroataque a otras piezas de la misma forma, fue posible observar líneas de flujo.

A continuación se enlistan las piezas de latón que fueron macroatacadas con ácido crómico y sulfato de sodio y que mostraron líneas de flujo al primer intento. Cabe mencionar que para llegar a estos resultados fueron llevados a cabo muchos intentos con procesos y reactivos diferentes.

En la figura 4.5 se observa una cara de la pieza nombrada Hexagonal 1 ¼" NPT la cual fue cortada y pulida para poder realizarle el macroataque.

Fig. 4.5 - Pieza de latón Hexagonal 1 ¼" NPT cortada y con acabado espejo.



En la siguiente figura (Fig. 4.6) se muestra la misma pieza macroatacada con ácido crómico. Se puede observar que el macroataque ha revelado la forma en que fluyó el material al momento de ser forjado o lo que es lo mismo, líneas de flujo.

Fig. 4.6 - Corte de pieza Hexagonal 1 ¼" NPT macroatacada.



A esta pieza se le realizó varios cortes para poder observar cómo es que fluye el material en distintas partes de la pieza. Ver figura 4.7.



Fig. 4.7 – 2do corte de la pieza Hexagonal 1 ¼” NPT macroatacada.

La siguiente pieza que fue macroatacada fue la Hexagonal 1” NPT. Esta pieza también fue cortada y pulida hasta acabado espejo (Fig. 4.8) para posteriormente realizarle el proceso de macroataque con ácido crómico y sulfato de sodio.



Fig. 4.8 Hexagonal 1” cortada y pulida con acabado espejo.

A continuación (Fig. 4.9) la misma pieza después de haberle realizado el macroataque.

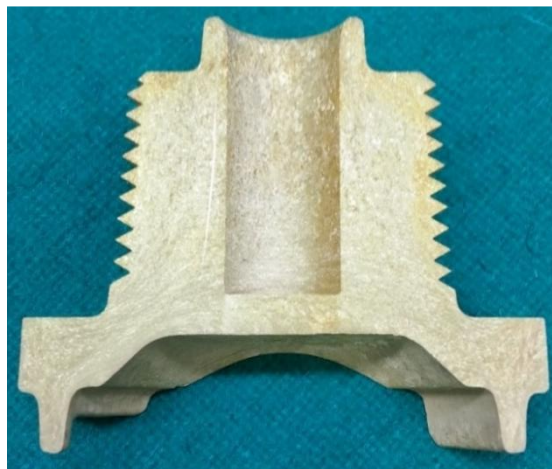


Fig. 4.9 Hexagonal 1” NPT macroatacada.

De la misma forma que a la primera pieza, también se le realizaron varios cortes para obtener distintas vistas de las líneas de flujo. Ver fig. 4.10.

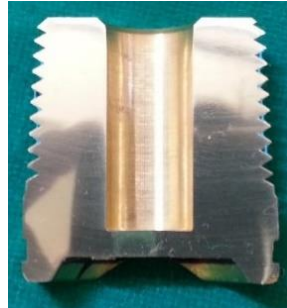


Fig. 4.10 Otra vista de Hexagonal 1" NPT macroatacada.

Esta fue una de las piezas que mostró líneas de flujo con una muy buena definición. Es fácil observar la forma en la que fluyó el material y es posible observar también los granos deformados que conforman las dos fases de las cuales está compuesto el material.

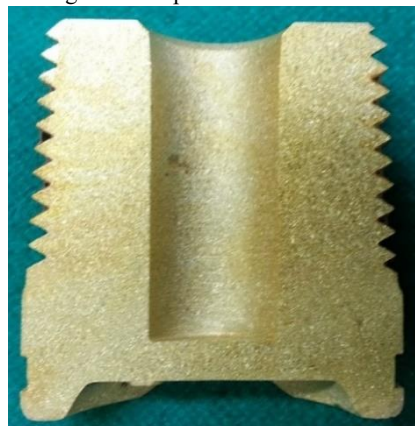
La siguiente foto (Fig. 4.11) muestra uno de los cortes realizados a la pieza llamada Snap on 1". A la pieza se le realizaron dos cortes, uno al centro de la pieza y otro aproximadamente a 5mm del centro para obtener una especie de placa. Esta placa fue pulida en ambas caras hasta obtener un acabado espejo. Esta pieza es una de las que con mayor frecuencia se ha reportado la fractura al momento de ser maquinada.

Fig. 4.11 Snap on 1" cortada y pulida con acabado espejo.



En la figura 4.12 se puede observar la pieza Snap on 1" después de haberle realizado el macroataque.

Fig. 4.12 Snap on 1" macroatacada.



En la figura 4.12 se puede observar que la pieza Snap on 1" que ha sido macroatacada y a pesar de que se observan con claridad los granos que conforman la pieza, estos no muestran rastros de deformación ni flujo del material.

La siguiente imagen (Fig. 4.13) muestra otra vista de la pieza Snap on 1" macroatacada en la cual las líneas de flujo son casi imperceptibles.

Fig. 4.13 Vista trasera de Snap on 1" macroatacada.



En esta pieza se puede observar un ligero aplastamiento en los granos de la parte central inferior, lo que da indicios de que la pieza fue forjada, sin embargo, fuera de esa zona se observan granos de un tamaño variado, un poco más fino en la parte inferior, y granos que aumentan de tamaño mientras más cerca están de la parte superior.

La poca penetración de la forja en la pieza puede ser la razón de la casi nula aparición de líneas de flujo. Esto se puede interpretar como una forja defectuosa debido a que la deformación que ha sufrido la pieza, no ha sido suficiente para que exista un flujo dentro del material. Probablemente la pieza previa a la forja provenga de una extrusión la cual pudo haber ayudado al afinado de grano. Una de las causas de la ausencia de líneas de flujo puede ser que la forja se haya terminado cuando la pieza aún se encontraba a temperaturas muy por encima de la temperatura de recristalización.

En la siguiente figura (fig. 4.14) se observa una de las partes de la pieza Cabeza senior que fue cortada, lijada y pulida hasta obtener acabado espejo para posteriormente realizarle un macroataque.

Fig. 4.14 Cabeza senior cortada y pulida hasta acabado espejo.



Una vez realizado el macroataque se puede observar la aparición de granos muy finos alineados que corroboran el trabajo de forja realizado a la pieza. (Figura 4.15)

Fig. 4.15 Cabeza senior macroatacada.



Este es otro claro ejemplo de que no siempre es fácil observar líneas de flujo en una pieza forjada, sin embargo, es posible apreciar que la pieza ha sufrido una gran deformación provocada por la presión ejercida por la prensa a través de los dados hacia la pieza.

La figura 4.16 muestra la pieza una probeta tomada de otro espécimen Cabeza senior, la cual fue macroatacada. Es posible observar con mayor facilidad las líneas de flujo producto del trabajo de forja.

Fig. 4.16 Parte de una probeta Cabeza senior macroatacada.



A pesar de que se pueden observar las líneas de flujo con mayor facilidad en comparación con la pieza anterior, existen zonas en la pieza en las que es difícil apreciar una alineación de granos, sin embargo el tamaño de grano en estas zonas es fino, algo que es característico en piezas forjadas.

La pieza llamada Cabeza junior es una de las que ha mostrado líneas de flujo con mejor resolución (ver fig. 4.17).

A esta pieza se le realizaron dos cortes paralelos, a una distancia aproximada de 5mm entre cada corte, de modo a que se obtuvo una placa con un espesor de aproximadamente 5mm.

Fig. 4.17 Cabeza junior cortada y pulida.



La pieza fue lijada y pulida en ambas caras para realizar el macroataque y poder observar la pieza en dos zonas diferentes de ella.

Una vez pulidas las dos caras de la pieza, fue sumergida en la solución para macroataque para latón.

Fig. 4.18 Cabeza junior macroatacada.



Esta pieza fue una de las que reveló líneas de flujo de manera muy clara. Las líneas pueden ser observadas a simple vista y sin dificultad.

Fig. 4.19 Vista trasera de Cabeza junior macroatacada.



En la vista trasera de la pieza se puede observar con mayor claridad el flujo del material. Es importante recalcar la aparición de concentraciones de material fase β (fase oscura) en la parte central superior de la pieza. Así mismo es posible apreciar ligeras concentraciones de fase α (fase blanca). Ambas fases son características de este tipo de latones, sin embargo, por tratarse de una pieza que en teoría proviene de una extrusión y que posteriormente fue forjada, no debería mostrar este tipo de problemas. Este puede ser un problema en diseño del dado de forja, ya que éste tipo de problemas está directamente relacionado a la poca o nula deformación en dicha zona.

IV.3 - Microataque a piezas de acero DW con opción 1

Una vez que las piezas han sido microatacadas, se debe proceder a su observación bajo el microscopio. A continuación se muestran varias series de fotos tomadas con 50, 100, 200 y 400 aumentos a través de un microscopio.

La siguiente serie de imágenes corresponde a piezas de acero del proveedor DW. Estas piezas fueron microatacadas con la opción 1 mencionada en la sección III.7.1 de este trabajo.

Las figura 4.20 y 4.21 son fotos tomadas a 50X y 100X respectivamente, de una pieza de acero DW microatacada con ácido nítrico.

Fig. 4.20 Pieza DW microatacada vista a 50X.

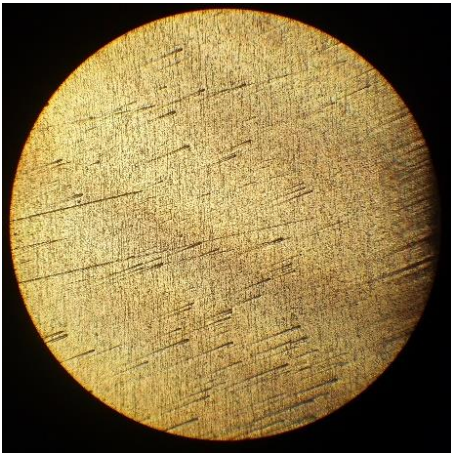
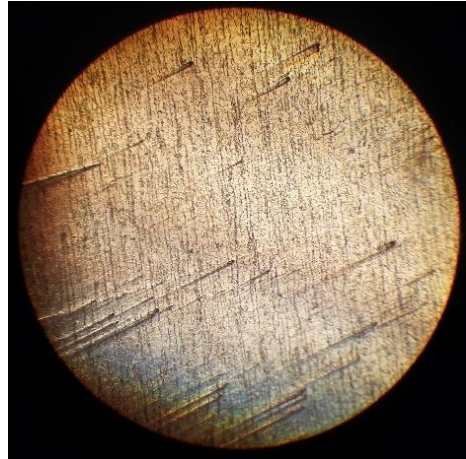


Fig. 4.21 Pieza DW microatacada vista a 100X.



Es posible observar granos muy finos alineados que conforman el material. Esta alineación es un indicativo de que hubo un flujo de material dentro de la pieza.

Las figuras 4.22 y 4.23 corresponden a la misma pieza DW microatacadas con ácido nítrico vistas a 200X y 400X respectivamente.

Fig. 4.22 Pieza DW microatacada vista a 200X.

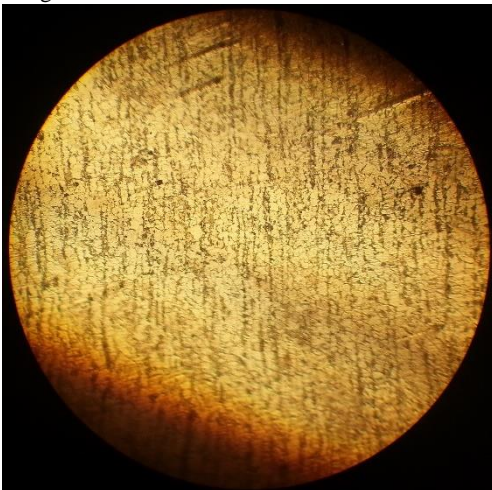
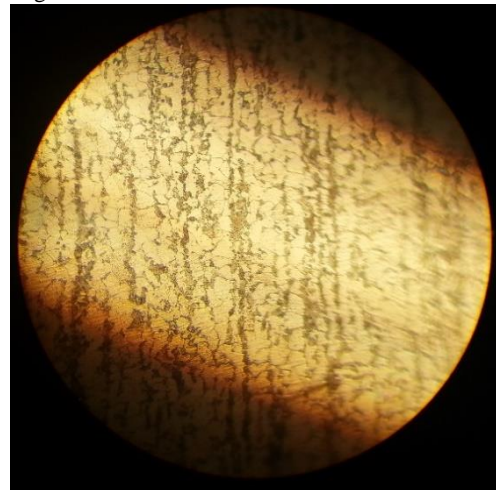


Fig. 4.23 Pieza DW microatacada vista a 400X.



En la figura 4.22 aún es difícil observar los granos del material, sin embargo es posible observar un poco más a detalle la alineación formada por las dos fases que componen el material. Esta alineación es característica de los materiales forjados.

En la figura 4.23 ya es posible observar con mejor claridad los granos, y aunque no fue posible medir el tamaño de grano debido a que están alargados y varían mucho en su tamaño, sí es posible apreciar las dos fases que componen el material. La mayor parte del material está formado por Ferrita (α) y en menor porcentaje por Perlita (franja oscura).

IV.4 - Microataque a piezas de acero DW con opción 2

La siguiente serie de imágenes corresponden a una pieza del proveedor DW que fue microatacada con la solución de ácido pícrico, ácido clorhídrico y alcohol etílico.

En las figuras 4.24 y 4.25 se observa una pieza microatacada vista a 50X y 100X, respectivamente. Debido a que la pieza fue forjada, los granos que conforman el material son muy finos y no son perceptibles aún a 100 aumentos, sin embargo, es posible observar una alineación de dos distintos materiales, en mayor cantidad una fase clara llamada Ferrita (α) y en menor cantidad una fase oscura llamada Perlita.

Fig. 4.24 pieza DW Microatacada vista a 50X.

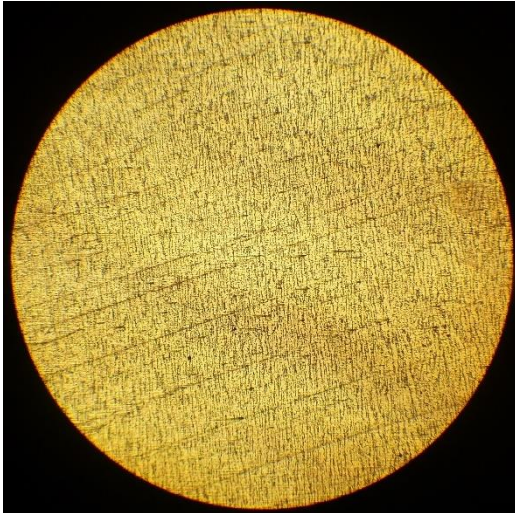


Fig. 4.25 Pieza DW microatacada vista a 100X.

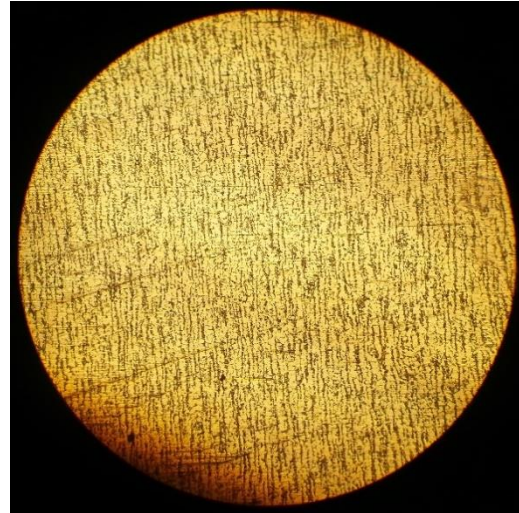


Fig. 4.26 Pieza DW microatacada vista a 200X.

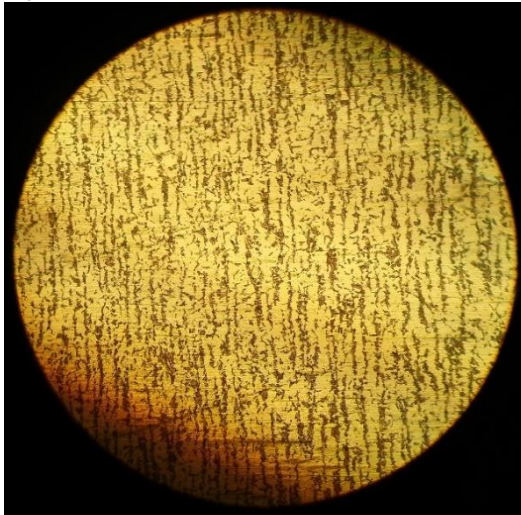
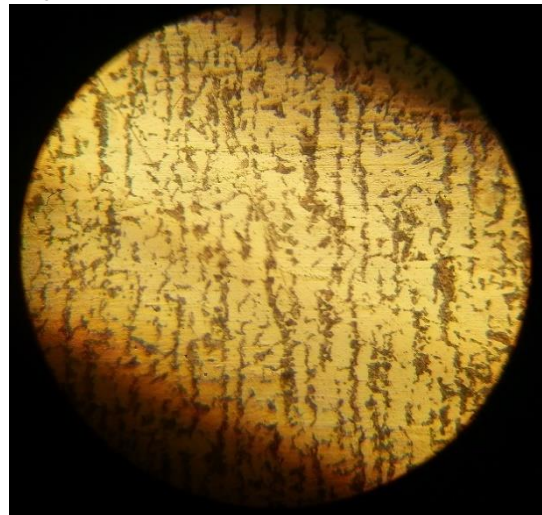


Fig. 4.27 Pieza DW microatacada vista a 400X.



En la figura 4.26 es posible observar con mayor detalle las líneas que indican que hubo un flujo de material en esa zona.

En la figura 4.27 es posible observar con mayor detalle las líneas ya mencionadas.

IV.5 - Microataque a piezas de acero PTT con opción 1

La siguiente serie de imágenes corresponde a una pieza de acero del proveedor PTT, la cual fue microatacada con una solución de ácido nítrico y alcohol etílico. La figura 4.28 es una toma de una pieza microatacada y observada a 50X. Es difícil detectar alguna característica específica en ésta vista.

En la figura 4.29 se pueden observar con dificultad una distribución de granos muy finos en colores claros formados por ferrita α y en menor cantidad granos de color oscuro probablemente formados por perlita.

Fig. 4.28 Pieza PTT Microatacada vista a 50X.

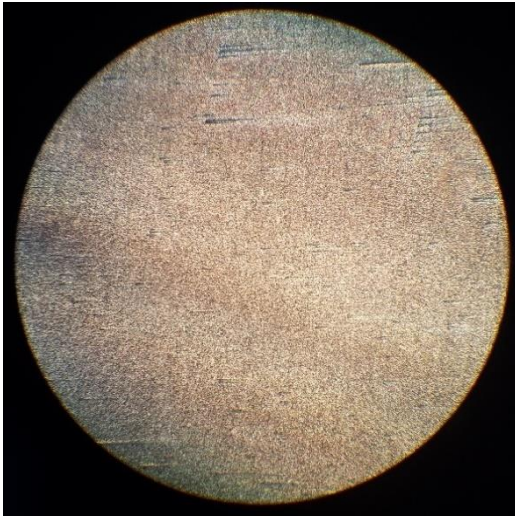


Fig. 4.29 Pieza PTT microatacada vista a 100X.

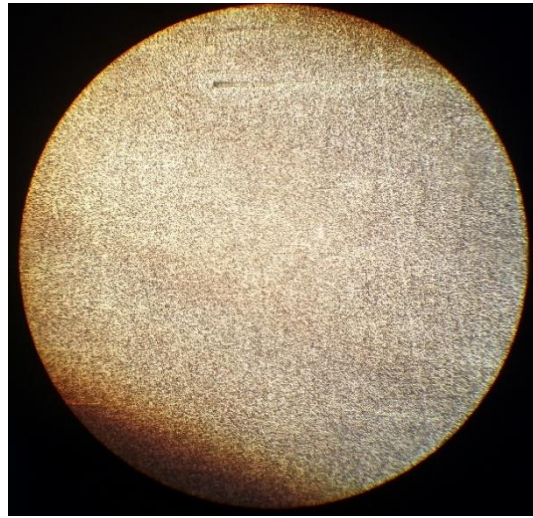


Fig. 4.30 Pieza PTT microatacada vista a 200X.

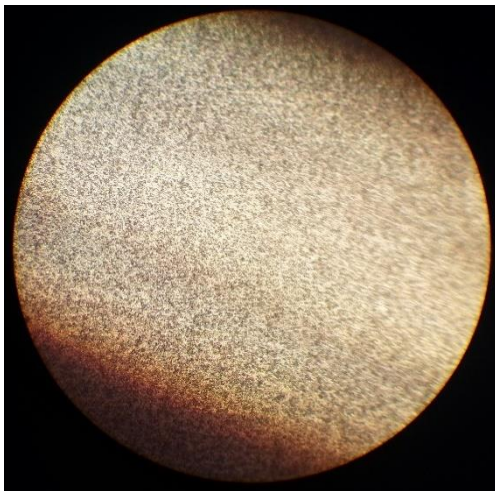
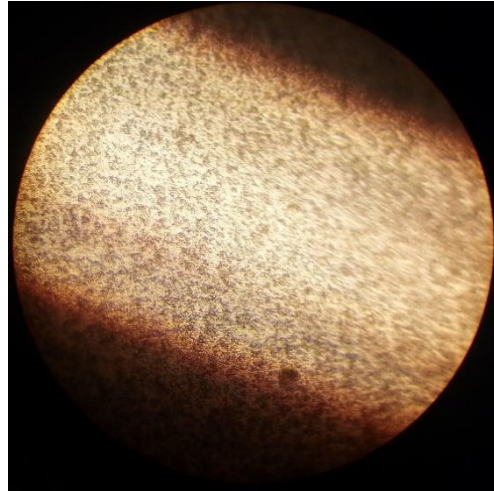


Fig. 4.31 Pieza PTT microatacada vista a 400X.



La figura 4.30 muestra una imagen tomada a 200 aumentos de una pieza de acero PTT microatacada, en la cual se observa con un poco de dificultad, un patrón de alineamiento similar al que presenta una pieza que ha sido forjada.

En la figura 4.31 se puede observar una especie de membrana que conforma a la pieza. Esto sucede cuando la pieza es sobreatacada, es decir, el microataque fue prolongado por más tiempo de lo debido; sin embargo, la fase perlítica (fase oscura) da indicios de una alineación dentro del material y que es característico de una pieza que ha sido forjada.

IV.6 - Microataque a piezas de acero PTT con opción 2

La siguiente serie de imágenes corresponden a una pieza del proveedor PTT que fue microatacada con la solución de ácido pícrico, ácido clorhídrico y alcohol etílico.

En la figura 4.32 es difícil apreciar algún patrón o característica especial del material, sin embargo, en la figura 4.33 se logra observar un ligero alineamiento de forma casi vertical, ligeramente inclinada hacia el lado izquierdo de la imagen.

Fig. 4.32 Pieza PTT microatacada vista a 50X.

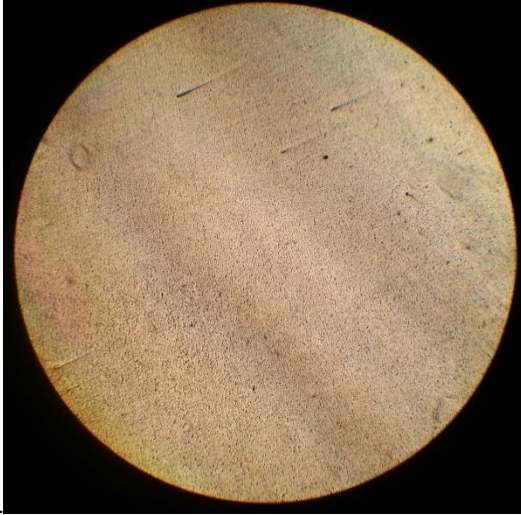


Fig. 4.33 Pieza PTT microatacada vista a 100X.

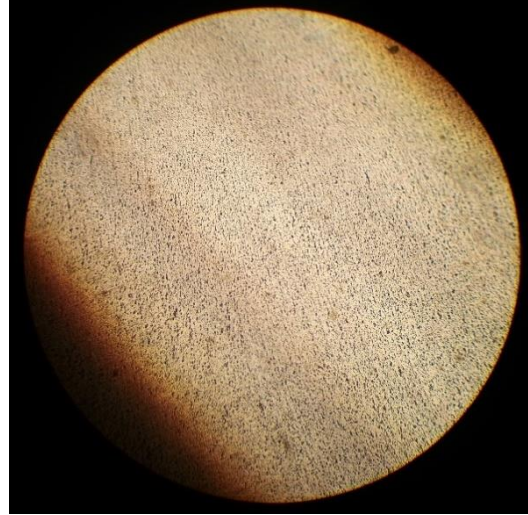


Fig. 4.34 Pieza PTT microatacada vista a 200X.

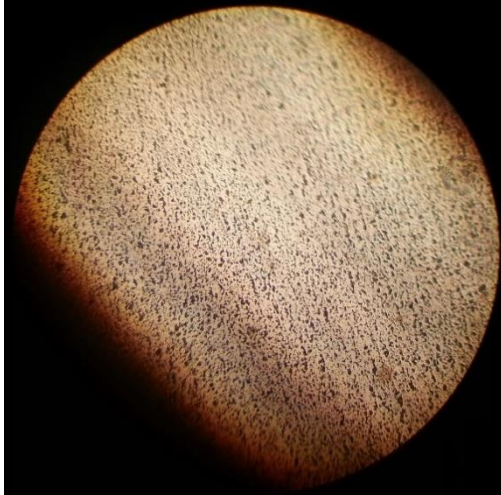
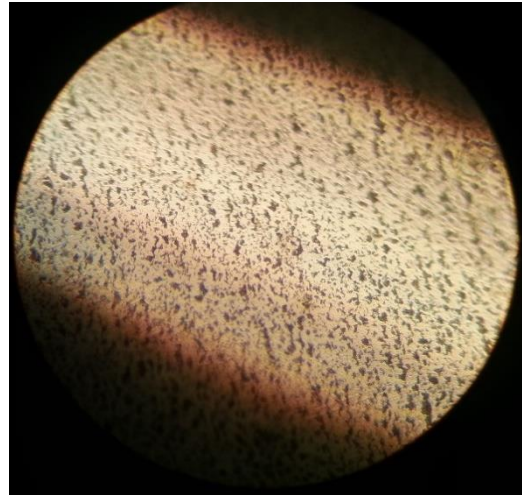


Fig. 4.35 Pieza PTT microatacada vista a 400X.



En las figuras 4.34 y 4.35 se pueden apreciar las micrografías a 200 y 400X respectivamente, de la pieza de acero PTT. En las imágenes es posible observar pequeños puntos oscuros de fase perlítica dispersos en una matriz de ferrita α . Esta dispersión de perlita forma una ligera alineación probablemente producto del trabajo en caliente.

IV.7 - Microataque a piezas de acero SSE con opción 1

La siguiente serie de imágenes corresponde a una pieza de acero del proveedor SSE, la cual fue microatacada con una solución de ácido nítrico y alcohol etílico.

Fig. 4.36 Pieza SSE microatacada vista a 50X.

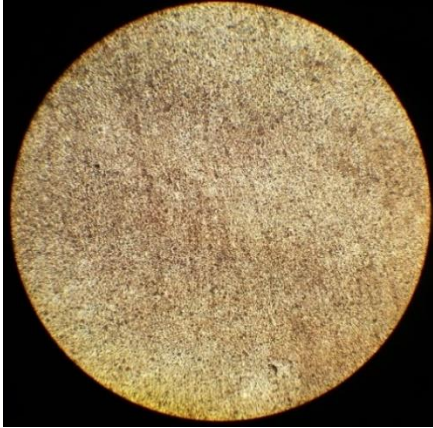


Fig. 4.37 Pieza SSE microatacada vista a 100X.

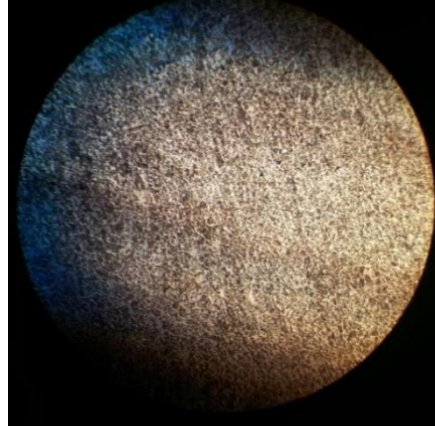


Fig. 4.38 Pieza SSE microatacada vista a 200X.

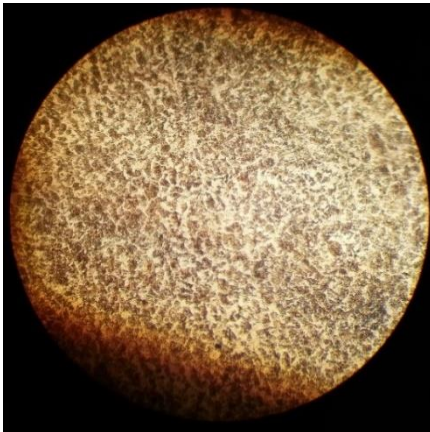
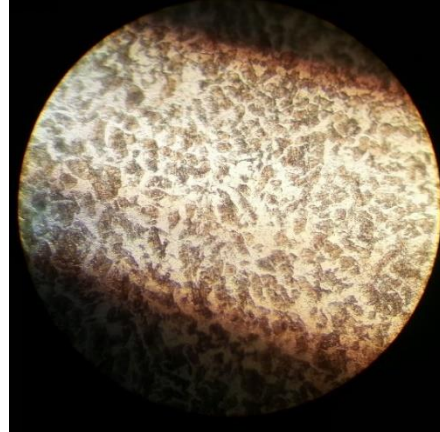


Fig. 4.39 Pieza SSE microatacada vista a 400X.



Esta serie de figuras (4.36, 4.37, 4.38 y 4.39) son ejemplo de una pieza que fue sobreatacada. El sobre ataque sucede cuando la probeta se somete al ataque químico por más tiempo del debido. El sobre ataque también puede ser ocasionado por una concentración muy alta de ácido en la solución usada para el microataque.

El sobre ataque se puede apreciar como la disolución prácticamente completa de los granos de la superficie atacada. Esto se puede apreciar mejor en la imagen 4.39. No existe forma de corregir este error, sin embargo esta pieza se puede lijar y pulir nuevamente hasta eliminar toda la superficie que sufrió el ataque químico previo, y repetir el microataque.

IV.8 - Microataque a piezas de acero SSE con opción 2

Las siguientes figuras (4.40, 4.41, 4.42 y 4.43) corresponden a una pieza SSE microatacada con una solución de ácido pícrico, ácido clorhídrico y alcohol etílico. Es una pieza que fue sobreatacada. Debido al sobre ataque, no es posible ver los granos que conforman el material.

Fig. 4.40 Pieza SSE microatacada vista a 50X

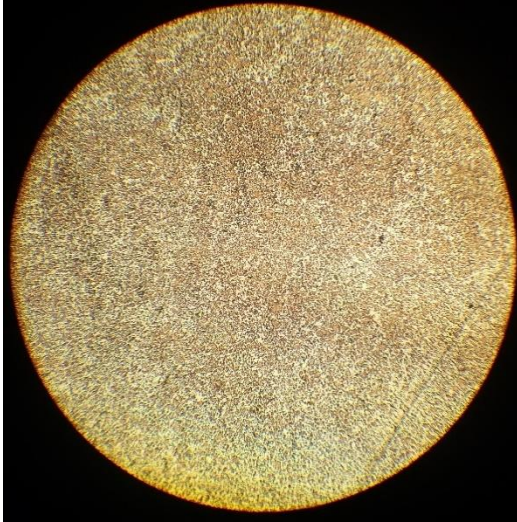


Fig. 4.41 Pieza SSE microatacada vista a 100X.

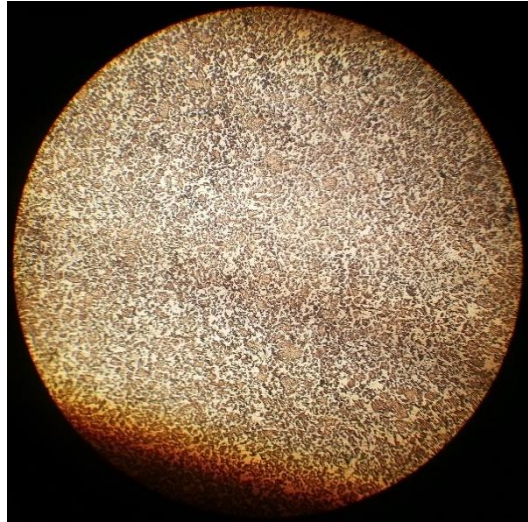


Fig. 4.42 Pieza SSE microatacada vista a 200X

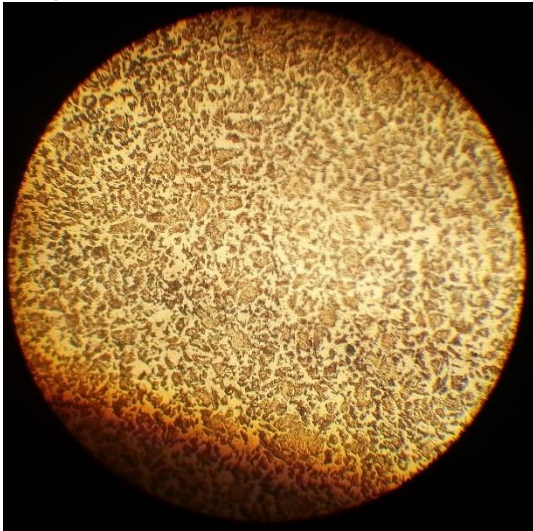
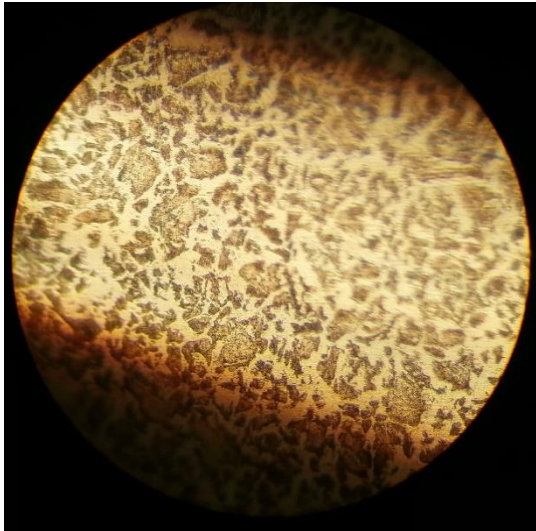


Fig. 4.43 Pieza SSE microatacada vista a 400X.



Cabe mencionar que se realizaron muchas pruebas de microataque debido a que no se tenía conocimiento práctico de éste tipo de procedimientos, así que con cada una de las pruebas, los resultados fueron mejorados. En este trabajo se intentó documentar los procedimientos exitosos, así como los procedimientos erróneos con el fin de dar a conocer cuando la prueba ha fallado.

IV.9 - Microataque a piezas de latón

La siguiente serie de imágenes son fotos de una pieza de latón la cual fue microatacada con dos soluciones de ácido crómico mencionadas en la parte III.7.3 de este trabajo. Es de suma importancia que las piezas que sean destinadas al microataque, estén pulidas de la manera correcta, es decir, que todas las rayas hechas por las lijas de grano grueso desaparezcan con la siguiente lija. De lo contrario, las rayas pueden permanecer ahí aunque no sean perceptibles a simple vista.

En el caso de ésta pieza, las rayas no desaparecieron por completo y se pueden observar en las figuras 4.44, 4.45, 4.46 y 4.47. Este tipo de rayas pueden llegar a ser confundidas con líneas de flujo y/o grietas.

Fig. 4.44 Pieza de latón microatacada vista a 50X.

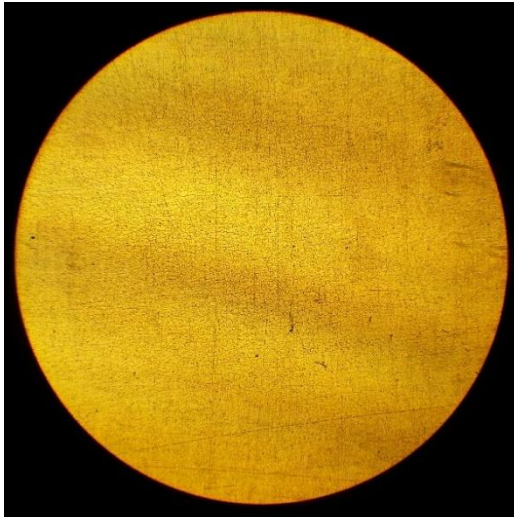


Fig. 4.45 Pieza de latón microatacada vista a 100X.

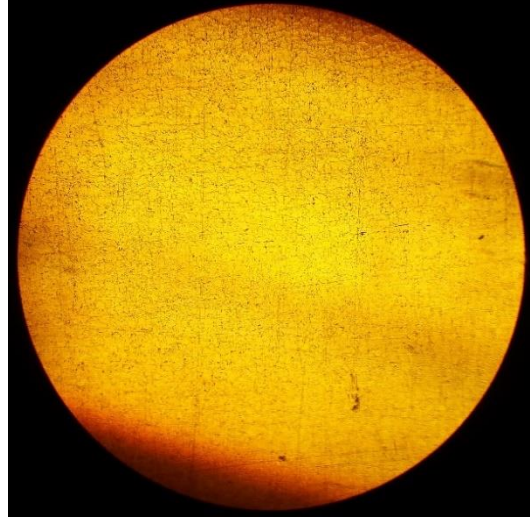


Fig. 4.46 Pieza de latón microatacada vista a 200X.

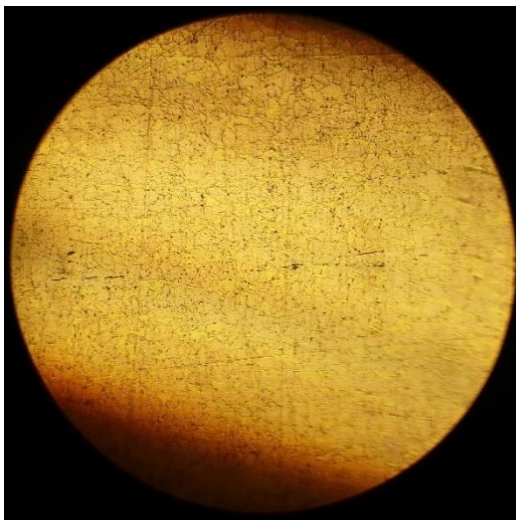
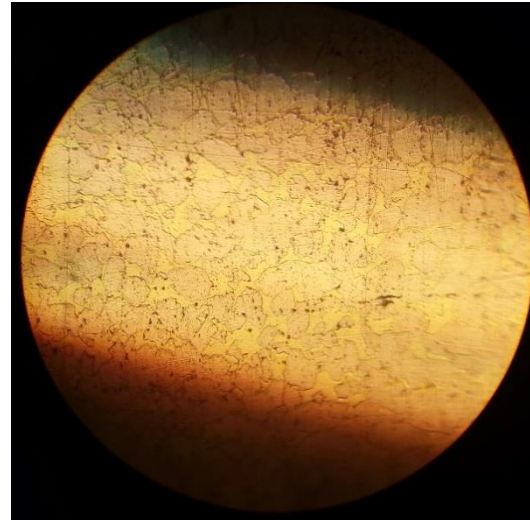


Fig. 4.47 Pieza de latón microatacada vista a 400X.



En estas imágenes se pueden observar las dos fases de latón que conforman la pieza. En la micrografía 4.47 se logra observar la presencia de granos de fase β (fase oscura) inmersos en una matriz formada por latón de fase α (fase clara). También es posible apreciar pequeños puntos negros dispersos por toda el área, ligeramente concentrados en algunas zonas. El plomo es insoluble en el latón, sin embargo, es agregado en porcentajes de hasta 2% en latones forjables. El plomo es agregado para facilitar el maquinado de las piezas. No tiene efecto en la resistencia a la corrosión, pero puede dar lugar al agrietamiento en el trabajo en caliente.

En las fotos metalográficas no es posible ver una orientación de grano.

IV.9.1 - Microataque a piezas de latón (sobre atacadas)

La siguiente serie de imágenes corresponde a una pieza de latón que fue atacada con una solución de ácido crómico por mucho más tiempo del que indica la norma.

En la figura 4.48 se puede ver que el material forma un patrón muy parecido a líneas de flujo. En la figura 4.49 se puede observar con mayor detalle una alineación de granos alargados como agujas que cruzan desde la parte inferior izquierda hasta la parte superior derecha de la imagen.

Fig. 4.48 Pieza de latón microatacada vista a 50X.

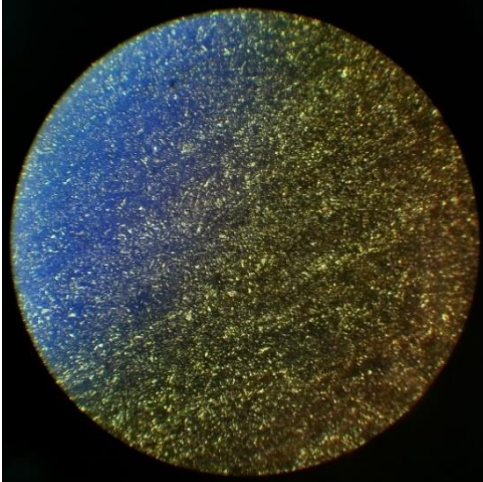


Fig. 4.49 Pieza de latón microatacada vista a 100X.

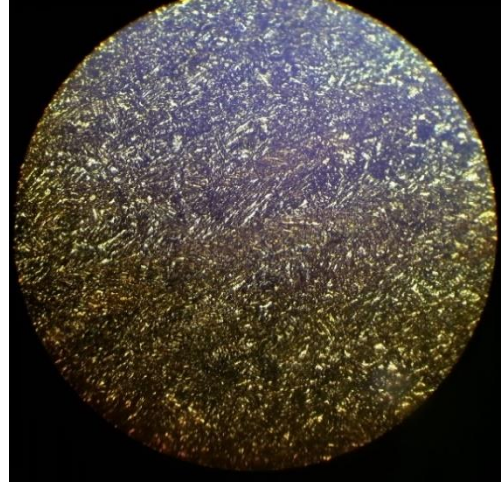


Fig. 4.50 Pieza de latón microatacada vista a 200X

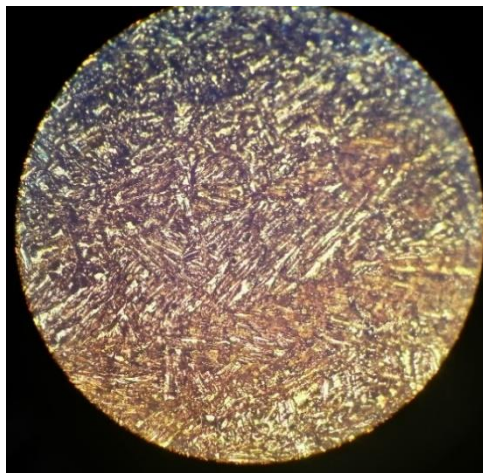


Fig. 4.51 Pieza de latón microatacada vista a 400X.



En las siguientes dos figuras, 4.50 y 4.51, se observan zonas en las que el material parece no tener un orden y otras zonas más en donde los granos alargados forman una franja de granos que se han desplazado, como si hubiesen sido arrastrados. Esto puede ser indicio del trabajo en caliente.

IV.10 - Análisis químico de piezas de acero

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis químico que se realizó a las piezas de acero. Este análisis químico fue realizado con espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente o ICP-AES por sus siglas en inglés. Debido al elevado costo del análisis químico con éste tipo de procedimiento, fue necesario seleccionar únicamente una pieza al azar de cada uno de los proveedores (DW, PTT, SSE). La composición química de cada pieza debe coincidir con las exigencias de la norma ASTM A 105 - 05, por lo que se procedió a la comparación de los resultados obtenidos y las cantidades indicadas por la norma.

Tabla 4.1 Comparación de resultados de análisis químico contra valores indicados por la norma ASTM A 105 – 05.

Porcentajes establecidos por la norma ASTM A 105M – 05.																
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Co	Nb	Pb	Ti	Fe
(%) en peso	0.35 Máx.	0.6 – 1.05	0.035 Máx.	0.040 Máx.	0.1 – 0.35	0.40 Máx. ^A	0.40 Máx. ^A	0.30 Máx. ^{A,B}	0.12 Máx. ^A	0.8 Máx. ^A	--	--	--	--	--	Restante.
Resultados de análisis químico para acero DW																
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Co	Nb	Pb	Ti	Fe
(%) en peso	0.2407	0.654	0.0285	0.0089	0.2123	0.0334	0.0271	0.057	0.0326	--	0.0205	0.0066	--	0.0056	0.0039	98.2
Resultados de análisis químico para acero PTT																
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Co	Nb	Pb	Ti	Fe
(%) en peso	0.2049	0.999	0.011	0.0048	0.2788	0.1665	0.00614	0.0475	0.0432	--	0.0119	0.0087	--	0.0053	0.0029	98.2
Resultados de análisis químico para acero SSE																
Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Co	Nb	Pb	Ti	Fe
(%) en peso	0.211	0.776	0.0158	0.0054	0.1867	0.0079	0.024	0.046	0.0314	--	0.0173	0.0079	--	0.0054	0.0054	98.6
^A La suma de cobre, níquel, cromo, molibdeno y vanadio no debe exceder el 1%.																
^B La suma de cromo y molibdeno no debe exceder el 0.32%.																

En la tabla 4.1 se muestra en la parte superior los elementos químicos y porcentajes en peso que debe contener cada una de las piezas según lo establece la norma ASTM A105-05. En los siguientes tres grupos de filas se muestran los elementos químicos y los porcentajes en peso de cada una de las piezas analizadas correspondientes a cada uno de los proveedores.

Al comparar los resultados obtenidos con los de la norma, se observa que las tres piezas analizadas contienen los elementos químicos establecidos por la norma y el porcentaje de cada uno de ellos se encuentra dentro de los límites establecidos por la misma.

IV.11 - Análisis químico a piezas de latón.

Las piezas de latón, por otro lado, fueron analizadas de forma diferente. Se realizó una selección al azar de para elegir una pieza de cada forma, fueron cortadas en dos o tres partes y les fue realizado el análisis químico con una pistola de fluorescencia de rayos X (XRF).

Debido a que las piezas de latón deben resistir altas presiones una vez que el tanque de gas se encuentra a su máxima capacidad, es necesario obtener la máxima resistencia de las piezas, y para lograrlo es necesario que éstas cumplan con dos requisitos importantes. El primero; que la composición química de cada pieza corresponda a la del “Latón forjable” o lo que es lo mismo, C37700, y el segundo; que dentro de los procesos de fabricación de la pieza se encuentre la forja. Ya que la forja incrementa de manera significativa las propiedades mecánicas de los metales.

La tabla 4.2 fue tomada de la norma ASTM B 124M-00. Esta norma indica los elementos químicos y los porcentajes en peso que componen las distintas aleaciones de cobre, así como el número de asignación UNS para cada una de ellas. En la norma ASTM B 283-04 aparece una lista de las distintas aleaciones de cobre y su número de asignación UNS (ver fig.4.21).

Fig. 4.52 Lista de aleaciones de cobre y su N° de asignación UNS.

Copper or Copper Alloy UNS No.	Name
C11000	copper
C14500	copper-tellurium
C14700	copper-sulfur
C36500	leaded Muntz metal
C37000	free-cutting Muntz metal
C37700	forging brass
C46400	naval brass
C48200	medium leaded naval brass
C48500	leaded naval brass
C61900	aluminum bronze
C62300	aluminum bronze, 9 %
C63000	aluminum-nickel bronze
C63200	aluminum-nickel bronze
C64200	aluminum-silicon bronze
C64210	aluminum-silicon bronze, 6.7 %
C65500	high-silicon bronze (A)
C67500	manganese bronze (A)
C67600	...
C70620	copper-nickel 90-10
C71520	copper-nickel 70-30
C77400	nickel silver, 45-10

En las tablas de resultados, se han resaltado de color verde los resultados que se encuentran dentro de los porcentajes indicados por las normas **ASTM B 283-04** y **ASTM B 124M-00**, de color naranja los resultados con los porcentajes por debajo de lo indicado, y de color azul los resultados con porcentajes arriba de lo indicado.

Tabla 4.2 Requerimientos químicos para las aleaciones de cobre.

Copper or Copper Alloy UNS No.	Composition, %													Copper Plus Elements with Specific Limits Present, min
	Copper	Lead	Tin	Iron	Nickel (incl Co)	Aluminum	Silicon	Manganese	Zinc	Sulfur	Tellurium	Phos- phorus	Arsenic	
C11000	99.90 min ^A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
C14500 ^B	99.90 min ^C	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.40–0.7	0.004– 0.012	...	...
C14700 ^B	99.90 min ^D	...	...	...	...	...	...	...	...	0.20–0.50	...	0.002– 0.005	...	...
C36500	58.0–61.0	0.25–0.7	0.25 max	0.15 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.6
C37000	59.0–62.0	0.8–1.5	...	0.15 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.6
C37700	58.0–61.0	1.5–2.5	...	0.30 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.5
C46400	59.0–62.0	0.20 max	0.50–1.0	0.10 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.6
C48200	59.0–62.0	0.40–1.0	0.50–1.0	0.10 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.6
C48500	59.0–62.0	1.3–2.2	0.50–1.0	0.10 max	...	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.6
C61900	remainder	0.02 max	0.6 max	3.0–4.5	...	8.5–10.0	...	...	0.8 max	...	...	...	...	99.5
C62300	remainder	...	0.6 max	2.0–4.0	1.0 max	8.5–10.0	0.25 max	0.50 max	...	...	...	...	...	99.5
C63000	remainder	...	0.20 max	2.0–4.0	4.0–5.5	9.0–11.0	0.25 max	1.5 max	0.30 max	...	...	...	...	99.5
C63200	remainder	0.02 max	...	3.5–4.3 ^E	4.0–4.8 ^E	8.7–9.5	0.10 max	1.2–2.0	...	...	...	...	...	99.5
C64200	remainder	0.05 max	0.20 max	0.30 max	0.25 max	6.3–7.6	1.5–2.2	0.10 max	0.50 max	...	...	...	0.15 max	99.5
C64210	remainder	0.05 max	0.20 max	0.30 max	0.25 max	6.3–7.0	1.5–2.0	0.10 max	0.50 max	...	...	...	0.15 max	99.5
C65500	remainder	0.05 max	...	0.8 max	0.6 max	...	2.8–3.8	0.50–1.3	1.5 max	...	...	...	...	99.5
C67500	57.0–60.0 ^A	0.20 max	0.50–1.5	0.8–2.0	...	0.25 max	...	0.05–0.50	remainder	...	...	...	...	99.5
C67600	57.0–60.0 ^A	0.50–1.0	0.50–1.5	0.40–1.3	...	...	...	0.05–0.50	remainder	...	...	...	...	99.5
C70620 ^F	86.5 min ^A	0.02 max	...	1.0–1.8	9.0–11.0	...	...	1.0 max	0.50 max	0.02 max	...	0.02 max	...	99.5
C71520 ^F	65.0 min ^A	0.02 max	...	0.40–1.0	29.0–33.0	...	...	1.0 max	0.50 max	0.02 max	...	0.02 max	...	99.5
C77400	43.0–47.0 ^A	0.20 max	...	...	9.0–11.0	...	...	...	remainder	...	...	...	...	99.5

^ASilver counts as copper.

^BIncludes oxygen-free or deoxidized grades with deoxidizers (such as phosphorus, boron, lithium, or others) in amount agreed upon.

^CThis includes copper + silver + tellurium.

^DThis includes copper + silver + sulfur + phosphorus.

^EIron content shall not exceed nickel content.

^FCarbon shall be 0.05 %.

La siguiente serie de tablas muestra los resultados obtenidos después de haber realizado el análisis químico de cada una de las piezas de latón seleccionadas. En dichas tablas se muestran los elementos químicos que indica la norma ASTM B 283-04, los rangos de porcentaje en peso permitidos para cada uno de ellos, los porcentajes en peso encontrados en cada pieza y una breve evaluación para cada uno de los resultados.

La pieza nombrada Hexagonal 1 ¼” NPT fue cortada en varias partes y se le realizó el análisis químico en tres zonas diferentes con la finalidad de observar homogeneidad dentro de la pieza. En las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran los resultados del análisis a la zona 1, zona 2 y zona 3 respectivamente.

Tabla 4.3 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1 ¼” NPT en zona 1.

Hexagonal 1¼” NPT análisis zona 1			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.56	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.173	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.272	Dentro del Rango
Ni	--	0.015	No establecido
Al	--	0.0	No establecido
Si	--	0.395	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.168	Dentro del Rango
S	--	0.138	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.070	No establecido

Tabla 4.4 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1 ¼” NPT en zona 2.

Hexagonal 1¼” NPT análisis zona 2			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.72	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.253	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.274	Dentro del Rango
Ni	--	0.020	No establecido
Al	--	0.043	No establecido
Si	--	0.294	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.027	Dentro del Rango
S	--	0.076	No establecido
P	--	0.007	No establecido
As	--	0.119	No establecido

Tabla 4.5 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1 ¼” NPT en zona 3.

Hexagonal 1 ¼” NPT análisis zona 3			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.728	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.264	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.281	Dentro del Rango
Ni	--	0.022	No establecido
Al	--	0.082	No establecido
Si	--	0.254	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.109	Dentro del Rango
S	--	0.052	No establecido
P	--	0.007	No establecido
As	--	0.059	No establecido

A pesar de haber encontrado diferencias en los porcentajes que componen las diferentes zonas de la pieza Hexagonal 1 ¼” NPT, dichas diferencias son mínimas y se puede considerar que es una pieza de composición homogénea. También es visible que todos los porcentajes encontrados dentro de cada zona, se encuentran dentro del rango establecido por las normas.

La pieza nombrada Hexagonal 1” NPT fue cortada en varias partes y se le realizó el análisis químico en tres zonas diferentes con la finalidad de observar homogeneidad dentro de la pieza. En las tablas 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los resultados del análisis a la zona 1, zona 2 y zona 3 respectivamente.

Tabla 4.6 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1” NPT en zona 1.

Hexagonal 1” NPT análisis zona 1			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.794	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	1.974	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.318	Sobre el Rango
Ni	--	0.006	No establecido
Al	--	0.079	No establecido
Si	--	0.297	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.208	Dentro del Rango
S	--	0.042	No establecido
P	--	0.007	No establecido
As	--	0.036	No establecido

En la tabla 4.6 se observa que el porcentaje de hierro dentro de la aleación que conforma esta zona, se encuentra por encima del rango establecido por las normas.

Tabla 4.7 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1” NPT en zona 2.

Hexagonal 1” NPT análisis zona 2			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	57.395	Debajo del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.142	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.291	Dentro del Rango
Ni	--	0.085	No establecido
Al	--	0.071	No establecido
Si	--	0.314	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	39.424	Dentro del Rango
S	--	0.037	No establecido
P	--	0.007	No establecido
As	--	0.038	No establecido

En la tabla 4.7 se observa que el porcentaje de cobre establecido para la aleación, se encuentra por debajo de lo indicado por las normas.

En la tabla 4.8 se observa que el porcentaje de cobre establecido para la aleación, se encuentra por debajo de lo indicado por las normas.

Tabla 4.8 Resultados de análisis químico a Hexagonal 1” NPT en zona 3.

Hexagonal 1” NPT análisis zona 3			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	57.766	Debajo del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.088	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.237	Dentro del Rango
Ni	--	0.075	No establecido
Al	--	0.014	No establecido
Si	--	0.300	No establecido
Mn	--	0.00	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	39.268	Dentro del Rango
S	--	0.048	No establecido
P	--	0.007	No establecido
As	--	0.061	No establecido

Se observa que a pesar de que los tres análisis fueron realizados a la misma pieza, es posible encontrar diferentes porcentajes de elementos químicos en las diferentes zonas de la pieza. Esto indica que la composición química de la pieza puede no ser homogénea en toda la pieza.

A dos piezas nombradas Snap on 1" NPT se les realizó análisis químico con el fin de observar la variación de porcentajes de una pieza a otra; a la pieza 1 se realizó el análisis únicamente en una zona, mientras que a la pieza 2, se realizó análisis en dos zonas diferentes.

La tabla 4.9 Muestra los resultados obtenidos del análisis químico de la pieza 1 de Snap on 1" NPT. Es visible que el porcentaje de Cobre contenido en la pieza se encuentra apenas por debajo de lo establecido por las normas, así mismo, se observa que la cantidad de Plomo y Hierro se encuentran por encima de lo indicado. También se ha resaltado que la cantidad de Silicio dentro de la aleación es del 0.8%, algo elevado en comparación con los demás resultados. El único elemento que se encuentra dentro del rango establecido por las normas es el Zinc.

Tabla 4.9 Resultados de análisis químico a Snap on 1" NPT pieza 1.

Snap on 1" NPT pieza 1			
Elementos indicados por normas	Porcentaje indicado por normas.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	57.966	Debajo del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.559	Sobre el Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.359	Sobre el Rango
Ni	--	0.017	No establecido
Al	--	0.333	No establecido
Si	--	0.802	No establecido
Mn	--	0.015	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	37.389	Dentro del Rango
S	--	0.168	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.157	No establecido

Las tablas 4.10 y 4.11 muestran los resultados del análisis químico que se realizó a la pieza 2 de Snap on 1" NPT en la zona 1 y zona 2 respectivamente.

Tabla 4.10 Resultados de análisis químico a pieza 2 Snap on 1" NPT en zona 1.

Snap on 1" NPT análisis a pieza 2 zona 1.			
Elementos indicados por normas	Porcentaje indicado por normas.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.544	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.359	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.289	Dentro del Rango
Ni	--	0.031	No establecido
Al	--	0.022	No establecido
Si	--	0.268	No establecido
Mn	--	0.014	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.069	Dentro del Rango
S	--	0.058	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.076	No establecido

Los resultados obtenidos del análisis en la zona 1 muestra que todos los elementos químicos y los porcentajes de cada uno de ellos, se encuentran dentro de lo establecido por las normas.

Tabla 4.11 Resultados de análisis químico a pieza 2 Snap on 1” NPT en zona 2.

Snap on 1” NPT análisis a pieza 2 zona 2.			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.676	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.415	Dentro del Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.282	Dentro del Rango
Ni	--	0.028	No establecido
Al	--	0.000	No establecido
Si	--	0.219	No establecido
Mn	--	0.017	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.118	Dentro del Rango
S	--	0.056	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.020	No establecido

Los elementos químicos y los porcentajes de cada uno de ellos en la zona 2 de la pieza 2 Snap on 1”NPT, se encuentran dentro de lo establecido por las normas.

Los resultados del análisis químico realizado a las dos zonas de la pieza llamada Cabeza senior, están mostrados en las tablas 4.12 y 4.13.

Tabla 4.12 Resultados de análisis químico a Cabeza senior en zona 1.

Cabeza senior análisis zona 1			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.182	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.644	Sobre el Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.228	Dentro del Rango
Ni	--	0.015	No establecido
Al	--	0.080	No establecido
Si	--	0.322	No establecido
Mn	--	0.000	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.242	Dentro del Rango
S	--	0.070	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.079	No establecido

En la tabla de resultados 4.12 se muestran los elementos químicos y los porcentajes encontrados en la zona 1 de la pieza Cabeza senior. Estos resultados indican que todos los elementos y los porcentajes se encuentran dentro de los rangos correspondientes, a excepción del Plomo, éste se encuentra por encima de lo establecido por las normas.

Tabla 4.13 Resultados de análisis químico a Cabeza senior en zona 2.

Cabeza senior análisis zona 2			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.252	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.538	Sobre el Rango
Ti	--	0.00	No establecido
Fe	0.30 Máx.	0.203	Dentro del Rango
Ni	--	0.015	No establecido
Al	--	0.039	No establecido
Si	--	0.317	No establecido
Mn	--	0.000	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.315	Dentro del Rango
S	--	0.074	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.141	No establecido

En la tabla 4.13 se muestran los resultados de la zona 2 de la pieza Cabeza senior. Es visible que al igual que en la zona 1, el porcentaje de Plomo encontrado en esta zona, sobrepasa al indicado por las normas. Los demás elementos se encuentran dentro de lo establecido.

La pieza llamada Cabeza junior fue analizada en dos zonas diferentes. En las tablas 4.14 y 4.15 se muestran los resultados del análisis químico en la zona 1 y zona 2 respectivamente.

Tabla 4.14 Resultados de análisis químico a Cabeza junior en zona 1.

Cabeza junior análisis zona 1			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.601	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.321	Dentro del Rango
Fe	0.30 Máx.	0.294	Dentro del Rango
Ni	--	0.033	No establecido
Al	--	0.000	No establecido
Si	--	0.221	No establecido
Mn	--	0.000	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.250	Dentro del Rango
S	--	0.063	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.046	No establecido

Los elementos y los porcentajes de la zona 1 se encuentran dentro de lo indicado por las normas.

En la zona 2 de la pieza Cabeza junior los elementos y porcentajes encontrados están dentro de los rangos establecidos por las normas.

Tabla 4.15 Resultados de análisis químico a Cabeza junior en zona 2.

Cabeza junior análisis 2			
ASTM B 124M.	Porcentaje indicado.	Porcentaje encontrado.	Evaluación.
Cu	58.0 – 61.0	58.466	Dentro del Rango
Pb	1.5 – 2.5	2.360	Dentro del Rango
Fe	0.30 Máx.	0.244	Dentro del Rango
Ni	--	0.030	No establecido
Al	--	0.056	No establecido
Si	--	0.275	No establecido
Mn	--	0.000	No establecido
Zn	Restante; 36.5 – 40.5	38.245	Dentro del Rango
S	--	0.075	No establecido
P	--	0.006	No establecido
As	--	0.051	No establecido

Es importante destacar que la composición química de las piezas, no es la misma a todo lo largo y ancho de ésta, es decir que no son homogéneas.

IV.12 - Pruebas de dureza a piezas de acero DW

Tabla 4.16 Resultados de pruebas de dureza a piezas DW.

Pruebas de dureza a piezas DW con equipo Rockwell B			
Nombre y foto de pieza.	Prueba N° 1	Prueba N°2	ASTM A105M – 05
<p>Brida Junior</p> 	HRB 73.9	HRB 78.3	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople ¾" NPT Cuadrado tanque estacionario</p> 	HRB 73.6	HRB 70.5	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople NPT 1" Tanque estacionario</p> 	HRB 70.5	HRB 67.6	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople 1 ¼" NPT Tanque estacionario</p> 	HRB 67.5	HRB 73.6	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople ¾" NPT cilindro</p> 	HRB 71.1	HRB 67.6	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4

IV.13 - Pruebas de dureza a piezas de acero PTT

Tabla 4.17 Resultados de pruebas de dureza a piezas PTT.

Pruebas de dureza a piezas PTT con equipo Rockwell B			
Nombre y foto de pieza.	Prueba N° 1	Prueba N° 2	Norma ASTM A105M – 05 ^[1]
Cople ¾" cuadrado tanque estacionario 	HRB 79.7	HRB 80.7	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
Cople 1" NPT Tanque estacionario 	HRB 87.2	HRB 81.6	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
Cople ¾" NPT Tanque estacionario 	HRB 82.9	HRB 82	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
Cople 1 ¼" NPT Tanque estacionario 	HRB 88.1	HRB 81.1	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
Cople ¾" NPT Cilindro 	HRB 77.4	HRB 78.2	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4

IV.14 - Pruebas de dureza a piezas de acero SSE

Tabla 4.18 resultados de pruebas de dureza a piezas SSE.

Pruebas de dureza a piezas SSE con equipo Rockwell B			
Nombre y foto de pieza.	Prueba N° 1	Prueba N° 2	Norma ASTM A105M – 05 ^[1]
<p>Brida junior</p> 	HRB 67.7	HRB 76.7	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople 3/4" NPT tanque estacionario</p> 	HRB 74	HRB 75.3	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4
<p>Cople 3/4" NPT Cilindro</p> 	HRB 70.9	HRB 75.9	HB 137 a HB 187 Máx. ^[1] ≈ HRB 75 a HRB 90.4

La norma ASTM A 105M – 05 en su apartado 7.3.4 menciona un rango de dureza para piezas pequeñas forjadas que va desde 137 HB hasta 187 HB.

A pesar de que todas las piezas de acero coinciden en la composición química con la norma, y que todas mostraron indicios de haber sido forjadas, algunas piezas muestran una dureza inferior a la que indica la misma norma.

IV.15 - Pruebas de dureza a piezas de latón

Tabla 4.19 Resultados de pruebas dureza a piezas de latón.

Pruebas de dureza con equipo Rockwell B			
Nombre y foto de pieza.	Prueba N° 1	Prueba N°2	Norma ASTM B283 – 04
Hexagonal 1 ¼” NPT. 	HRB 51.1	HRB 51.3	HRB 45
Hexagonal 1” NPT. 	HRB 39.5	HRB 41	HRB 45
Snap on 1” NPT. 	HRB 49.5	HRB 50.1	HRB 45
Cabeza senior 	HRB 45	HRB 42	HRB 45
Cabeza Junior 	HRB 51.4	HRB 52.6	HRB 45

Los resultados obtenidos por ésta prueba muestran que en general la dureza de las piezas se encuentra dentro del rango establecido por la norma, e incluso en algunos casos es mayor.

Conclusiones

Es posible considerar que los resultados fueron los esperados ya que se logró proponer varios procedimientos para ser aplicados en el control de calidad de la empresa.

Se desarrollaron varios métodos que ayudarán al departamento de control de calidad de la empresa para el análisis de las piezas forjadas.

Se entregaron varios reportes a la empresa con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas y que llevaron a que se cumpliera el cometido de la vinculación.

Así mismo, se entregó a la empresa una manual que indica paso a paso los procedimientos, equipos, y reactivos necesarios para la realización de las pruebas.

A continuación se hace una pequeña comparativa sobre los costos económicos, ecológicos y el tiempo que se deben invertir para cada proceso. Mediante este análisis, se busca proponer el proceso más viable para llevar a cabo.

En la siguiente tabla se muestra una lista de precios de los reactivos que fueron utilizados para las pruebas metalográficas realizadas.

Tabla 4.20 Precio consultado el día 8/jun/2016 de los reactivos utilizados en los ataques químicos.

Reactivo	Precio*	Presentación
Ácido clorhídrico	\$197.50 MX por litro	Líquido 36% al 38%
Ácido crómico	\$512.55 MX por Kg	Sólido
Ácido nítrico	\$143.65 MX por litro	Líquido concentrado
Ácido pícrico	\$190.00 MX por 500ml al 1%	Sólido**
Agua destilada	\$81.60 MX por 20 litros	Líquido
Alcohol etílico	\$233.75 MX por 3.5 litros	Líquido al 96%
Nitrato de plata	\$3,883.65 MX por 100g	Sólido
Sulfato de sodio	\$1,037.00 MX por 450g	Sólido

*El precio puede variar dependiendo del proveedor y la cantidad que se adquiera.
**Debido a la inestabilidad de las sales que puede formar, no es posible conseguirlo de manera fácil en su forma sólida. Sin embargo, la norma ASTM E407-99 lo requiere en forma sólida.

Es recomendable consultar las hojas de seguridad antes de comenzar a trabajar con algún reactivo químico. Las hojas de seguridad pueden ser provistas junto con el reactivo al momento de comprarlo, y/o también es muy fácil encontrarlas en internet.

Ácido clorhídrico

También conocido como ácido muriático, es una disolución acuosa de cloruro de hidrógeno. Comúnmente es provisto en una concentración de hasta 38% de HCL. Reacciona con la mayoría de los metales desprendiendo hidrógeno.

Se debe tener especial precaución con agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, ácido selénico y pentóxido de vanadio ya que la mezcla puede formar cloro el cual es sumamente tóxico.

La inhalación prolongada puede causar daño a las mucosas nasales. Puede irritar los ojos si se está en contacto prolongado. Nunca se debe usar lentes de contacto mientras se trabaja con éste ácido.

Para su manipulación, nunca se deben usar guantes de PVA o polietileno. Es recomendable usar guantes de neopreno o hule botulínico.

Para desecharlo se debe diluir con agua cuidadosamente, neutralizar con carbonato de calcio o cal. La disolución resultante puede verterse al drenaje, con abundante agua.

Ácido crómico

Se le conoce también como Trióxido de cromo. Es un agente oxidante, tóxico y corrosivo. Es soluble en agua 65% a 20°C. Puede causar fuego en contacto con materiales combustibles. Se debe evitar el contacto con materiales orgánicos. Es corrosivo para los metales.

Puede causar quemaduras en la piel, al contacto con los ojos causa quemaduras severas que puede derivar en la pérdida de la vista. El contacto del ácido crómico con la mucosa nasofaríngea puede producir irritación, ulceración, rinitis, faringitis, hipertrofia de cornetes, alteración del olfato y en casos severos perforación del tabique nasal. Puede producir además laringitis, bronquitis crónica, fibrosis pulmonar, disminución olfativa (anosmia) y problemas del hígado. Está considerado como cancerígeno.

En caso de derrames de material sólido, este se deberá recoger de inmediato ya que el ácido crómico es un contaminante para el suelo y el agua, el material que no se pueda levantar se deberá tratar con una solución acidulada de bisulfito de sodio y neutralizar con carbonato de sodio.

Ácido nítrico

El ácido nítrico se descompone con cierta facilidad, generando óxidos de nitrógeno. Ataca a la mayoría de los metales a excepción del platino y el oro.

Puede generar óxidos de nitrógeno, muy tóxicos, cuando se calienta. Por ser un fuerte oxidante, su contacto con materiales combustibles hace que se incremente el riesgo de fuego o incluso explosión. Es no combustible, pero es peligrosamente reactivo con muchos materiales. Reacciona explosivamente con polvos metálicos, carburos, sulfuro de hidrógeno, alcohol y carbón. Incrementa la inflamabilidad de combustibles orgánicos y materiales oxidados, pudiendo causar su ignición. Con agua y vapor, genera calor y humos corrosivos y venenosos. Con agentes reductores poderosos, explota. En general, evite humedad, calor y el contacto con los compuestos mencionados en las propiedades químicas.

Este producto es principalmente irritante y causa quemaduras y ulceración de todos los tejidos con los que está en contacto.

Reacciona explosivamente con polvos metálicos, carburos, sulfuro de hidrógeno, alcohol y carbón. Incrementa la inflamabilidad de combustibles orgánicos y materiales oxidados, pudiendo causar su ignición. Con agua y vapor, genera calor y humos corrosivos y venenosos. Con agentes reductores poderosos, explota. En general, evite humedad, calor y el contacto con los compuestos mencionados en las propiedades químicas.

Para ser desechado: Con cuidado (se genera calor y vapores) diluya con agua-hielo y ajuste el pH a neutro con bicarbonato de sodio o hidróxido de calcio. El residuo neutro puede tirarse al drenaje con agua en abundancia.

Ácido pícrico

Es un material altamente explosivo, se debe evitar chispas y llamas cuando se trabaja con él. Se debe evitar la fricción o choque del material. No se debe permitir que el material se disperse en el ambiente. La sustancia es nociva para los organismos acuáticos. Para su transporte se recomienda diluir en agua al menos en un 30% del peso, transportarse con un menor porcentaje se considera altamente peligroso. Se debe evitar al máximo ser sacudido ya que la estática puede provocar su explosión.

Nitrato de plata

También conocido en algunas partes como Piedra infernal. Es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores.

La inhalación del polvo puede producir irritación al tracto gastrointestinal y al tracto respiratorio, caracterizada por ardor, estornudos y tos. La exposición severa puede producir daños al pulmón, asfixia, pérdida de consciencia y muerte.

Es corrosivo para los ojos. El contacto con los ojos puede resultar en daños a la córnea y en ceguera. Extremadamente peligroso en el caso del contacto con la piel (irritante), El contacto con la piel puede causar inflamación, caracterizada por picazón, escamas, enrojecimiento u ocasionalmente formación de ampollas.

Es muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar efectos negativos en el medio ambiente acuático a largo plazo. Favorece la formación de incendios por desprendimiento de oxígeno. Posibilidad de formación de vapores peligrosos por incendio en el entorno. En caso de incendio pueden producirse óxidos de nitrógeno.

Sulfato de sodio

Este producto puede causar leve irritación al ser inhalado, ingerido, y por contacto con la piel y ojos. Su principal efecto es diarreico, cuando es ingerido. La sustancia se descompone por sobrecalentamiento formando gas tóxico (Dióxido de Azufre). No se espera que sea peligroso para la salud. No se espera que este producto químico cause el agotamiento del oxígeno en sistemas acuáticos. Tiene un potencial bajo de afectar organismos acuáticos y se espera que tenga un potencial bajo de afectar microorganismos secundarios del tratamiento inútil. Ambiental: El sulfato de sodio puede persistir indefinidamente en el ambiente, pero no es probable demostrar efectos de la bioacumulación o de la contaminación de la cadena de alimento. Si está diluido con agua, no se espera que este producto químico lanzado directamente o indirectamente en el ambiente tenga un impacto significativo.

Macroataques

En el capítulo 3 se mencionó el tiempo de cada uno de los procesos de ataque químico. En el caso del macroataque para las piezas de acero, el tiempo de ataque es el mismo para ambos procesos y la diferencia de precios entre el ácido nítrico y el ácido clorhídrico es apenas de \$54.00 MX por litro, siendo el ácido nítrico más viable económicamente hablando, sin embargo, los riesgos a la salud y al ambiente son mayores. Personalmente recomendaría el uso de ácido clorhídrico ya que los riesgos al ambiente son prácticamente nulos cuando es diluido con abundante agua. Se puede realizar el ataque a varias piezas simultáneamente siempre y cuando la cara de las piezas no esté en contacto con otra pieza dentro del recipiente donde se lleva a cabo el ataque.

También se hace mención de los tiempos de macroataque del latón. Estos varían dependiendo de la opción de ataque que se haya elegido. Los tiempos van desde 20 minutos (opción 1) hasta unos cuantos segundos (opción 4). En el capítulo 3 ya se ha hecho mención que las opciones de macroataque 3 y 4 son poco viables ya que la velocidad de ataque es muy alta. Esto aunado a la alta toxicidad del nitrato de plata, así como su elevado costo, y la alta concentración del ácido nítrico, que puede causar reacciones violentas en contacto con algunos materiales y/o sustancias. Por estas razones es que se consideran opciones prácticamente descartables.

La opción 1 que tiene una duración promedio de 20 minutos a partir de que comienza el ataque y se lleva a cabo con una solución de ácido crómico y sulfato de sodio, de los cuales no se tiene información sobre riesgos ambientales que puedan producir, pero si bien los riesgos no son

ambientales, los riesgos a la salud por el contacto con el ácido crómico son verdaderamente altos. El sulfato de sodio, por otro lado, es una sustancia que si bien puede causar irritación en la piel, no es lo suficientemente agresiva como para considerarse peligrosa, de igual manera, no es considerada un riesgo para el medio ambiente.

Se puede realizar ataque simultáneo a varias piezas con la condición de que las caras de las piezas no estén en contacto con otra pieza.

La opción 2 es realizada con una solución que contiene 25ml de ácido nítrico, 5g de nitrato de plata y 75ml de agua destilada. La concentración de ácido nítrico es baja en comparación con las opciones 3 y 4, sin embargo, no deja de ser una solución peligrosa. Contiene nitrato de plata del cual se ha hablado ya de su alta toxicidad, el impacto ambiental y su elevado costo. A pesar de esto, se ha considerado viable, ya que los resultados obtenidos con este macroataque han sido satisfactorios, y el tiempo que tarda el ataque químico es apenas de unos 10 segundos. Se puede realizar ataque a varias piezas con la misma solución.

En resumen, para el macroataque para las piezas de acero es recomendable usar ácido clorhídrico.

Y para realizar el macroataque a las piezas de latón es mejor usar, por razones ambientales y económicas, la opción 1. Pero si lo que se busca es un macroataque casi instantáneo y sin importar el costo, se puede optar por la opción 2.

Microataques

Para los microataques a las piezas de acero fueron propuestas dos opciones que dieron resultados satisfactorios. Para la opción 1 se empleó una solución de ácido nítrico (5ml) y alcohol etílico o metílico (95ml). La concentración del ácido nítrico es muy baja y en realidad sólo se ocupan 10 o 15ml de la solución. El tiempo de ataque es de unos 3 a 5 segundos y se pueden realizar varios ataques con la misma solución. Es sin duda una opción muy costeable.

Para la opción 2 se emplea una solución saturada de ácido pícrico, ácido clorhídrico y alcohol etílico o metílico. Primeramente se debe recordar que el ácido pícrico es una sustancia sumamente explosiva y por ende peligrosa. También es necesario saber que es una sustancia que no es muy sencillo conseguir en su forma sólida. De manera comercial sólo se puede conseguir en solución al 1% y se debe tener bastantes consideraciones para su almacenaje. Cabe mencionar que en la tapa de los contenedores de ácido pícrico se pueden formar sales pícricas que son sumamente inestables y pueden provocar fuertes explosiones. Desafortunadamente no fue posible cotizarlo en su forma sólida ya que no se encontró un proveedor que lo distribuya en esa forma. El microataque se pudo llevar a cabo gracias a que se tenía una pequeña cantidad almacenada. Está de más decir que es una opción poco viable.

El microataque para las piezas de latón fue una sola opción debido a que es económico y dio resultados satisfactorios desde el primer intento. Se realiza con dos soluciones de ácido crómico con la diferencia de que a una contiene sulfato de sodio como ingrediente extra. El tiempo de ataque es de aproximadamente 1 minuto y se pueden realizar varios ataques con la misma solución.

Bibliografía

- Aldama D. (2015). Reporte de visita a planta de NACOBRE en Celaya. México D.F.
- Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. International Thomson Editores.
- ASTM standard A 105-05.
- ASTM standard B 124M-00.
- ASTM standard B 283-04.
- ASTM standard E 18-03.
- ASTM standard E 340-00.
- ASTM standard E 407-99.
- Avner, S. H., & Aracama, L. L. (1966). Introducción a la metalurgia física. F. A. Bartolomé (Ed.). McGraw-Hill.
- Avallone, E., & Baumeister, T. (1996). Mark's standard handbook for mechanical engineers. McGraw-Hill.
- Baker, H., & Okamoto, H. (1992). ASM handbook (vol. 3): alloy phase diagram. ASM International.
- CIMSA – Cupropedia – Cobre-Níquel. (Octubre 2017). Recuperado de:
http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/aleaciones_1/serie_1/serie_1.jsp
- Diagramas de equilibrio. (Septiembre 2017). Recuperado de:
http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/5_diagramas_de_equilibrio.html
- Dieter, G. E. (1988). Mechanical metallurgy, London, UK. McGraw-Hill.
- Handbook, A. M. (1993). Vol. 14 Forming and Forging. ASM International.
- Johnson, H. (1981). Technical metals. Peoria, Ill.: Bennett.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación.
- Leyensetter, A. (1987). Tecnología de los oficios metalúrgicos. Reverte.
- Merino Casals, M. (2012). Diagramas y transformaciones de fase. REDUCA.
- Nogués Boada, E. (2008). Caracterización de latones obtenidos por colada continua.
- NOM-001-SESH-2014, Plantas de distribución de Gas L.P. Diseño, construcción y condiciones seguras en su operación.

NOM-007-SESH-2010, Vehículos para el transporte y distribución de Gas L.P.- Condiciones de seguridad, operación y mantenimiento.

NOM-008-SESH/SCFI-2010, Recipientes transportables para contener Gas L.P. Especificaciones de fabricación, materiales y métodos de prueba.

NOM-009-SESH-2011, Recipientes para contener Gas L.P., tipo no transportable. Especificaciones y métodos de prueba.

PEMEX Gas y Petroquímica Básica. (2007) Hoja de datos de seguridad Gas Licuado de Petróleo.pdf. Recuperado de: http://www.gas.pemex.com/NR/rdonlyres/D3D851A9-FDE6-4F68-8FD1-3CC6E50163E4/0/HojaSeguridadGasLP_v2007.pdf

Procesos de conformado en caliente. (Octubre 2017). Recuperado de: http://148.204.211.134/polilibros/portal/Polilibros/P_terminados/procmanuf-p-admon-Malpica/32.htm

Robert, T. (2008). Procesos de conformado mecánico. México D.F.

Scharer S, U. (2003). Procesos industriales. México D.F.: UNAM.

Stefanescu, D. M. (1988). Casting (Vol. 15). ASM International.

Universidad de Buenos Aires. (2009), *Clase12Siderurgia.CContinua.pdf*. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Antiguo/2010-1C/Clase12Siderurgia.CContinua.pdf>