

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN



INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



APUNTES DE

PROCESOS DE CONFORMADO DE MATERIALES



Recopiló:

Mtro. Felipe Díaz Del Castillo Rodríguez.

Semestre 2020-2

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	.....5
CAPITULO 1	
OBTENCIÓN DEL ACERO	
1.1 Obtención del mineral de hierro.	6
1.2 Fragmentación de los minerales.	7
1.3 Clasificación y cribado.	8
1.4 Aglomeración.	..11
1.5 Materias primas para la fundición. ...	..... 11
1.6 Proceso de alto horno.	.....13
1.7 Métodos de vaciado.....	.....15
1.7.1 Lingoteras .....	.....15
1.7.2 Colada continua.	17
CAPITULO 2	
FUNDICIÓN	
2.1. Fundición en arena	.....20
2.2. Fundición en molde consumible (poliestireno expandido)	.....22
2.3. Fundición en molde de yeso.	.....24
2.4. Fundición en molde cerámico	.....24
2.5. Fundición por revestimiento	.....26
2.6. Fundición al vacío	.....27
2.7. Fundición en molde permanente	.....28
2.8 Fundición en cáscara o hueco.....	.....30
2.9. Fundición a presión.....	.....31
2.10 Fundición por inyección en matriz o dados	.....32
2.11. Fundición a presión en cámara fría	.....33
2.12. Fundición a presión en cámara caliente	.....36
2.13. Fundición a presión en cámara caliente	.....39
2.14. Tipos de defectos de fundición	.....41

CAPITULO 3**FORJA.**

3.1. Definición de forja	.....	53
3.2. Clasificación	.....	50
3.3. Forjado a dado abierto	.....	54
3.3.1. Fuerza de forjado.	.....	56
3.4. Forja en matriz cerrada	.....	59
3.4.1. Secuencia de forjado	.....	59
3.4.2. Aplicaciones de la forja en matriz cerrada	.....	61
3.5. Forjado de precisión	.....	61
3.6. Características de los procesos de forjado:	.....	63
3.7. Fuerza de forjado (Estampado)	.....	64
3.8. Comparación con otros procesos	.....	64
3.9. Forjabilidad	.....	65
3.10. Metales utilizados para la forja en caliente	.....	66
3.11. Acuñaado	.....	67
3.12. Equipo para forja	.....	68
3.12.1. Máquinas de compresión	.....	68
3.13. Martillos	.....	69
3.14. Prensas	.....	75
3.15. Ventajas y desventajas	.....	81
3.16. Características técnicas	.....	83
3.17. Fundamentos de diseño sobre el producto	.....	84
3.17.1. Línea de partición	.....	84
3.17.2. Ángulo de salida	.....	90
3.17.3. Bordes o salidas negativas	.....	92
3.17.4. Radios en las esquinas	.....	94
3.18. Defectos en forja	.....	102

CAPITULO 4**LAMINADO**

4.1. Introducción	.....	107
4.2. Laminado plano.	.....	109
4.2.1. Fuerza del rodillo y requerimiento de potencia	.....	110
4.2.2. Consideraciones geométricas	.....	112

4.3. Laminado de perfiles.	114
----------------------------	-------	-----

CAPITULO 5 EXTRUSIÓN.

5.1. Análisis de la extrusión	.....	117
5.2 Tipos de extrusión	.....	119
5.2.1 Extrusión directa e indirecta	.....	119
5.2.2 Extrusión en frio y en caliente	.....	124
5.2.3 Extrusión continua y discreta	.....	124
5.2.4 Extrusión por impacto	.....	125
5.2.5 Extrusión hidrostática	.....	125
5.3 Fuerza de extrusión	.....	128
5.4 Flujo del metal en la extrusión	.....	129
5.5 Defectos en las extrusiones	.....	130

CAPITULO 6 SOLDADURA.

6.2. Composición química	.....	133
6.2.1. Tamaño de grano.....	.....	134
6.2.2. Espesor del material	.....	136
6.3. Tipos de soldadura	.....	136
6.3.1. Soldadura por arco eléctrico.....	.....	136
6.3.2. Configuraciones de la soldadura y posiciones del electrodo.....	.....	137
6.3.3. Soldadura por flama, llama o gas	.....	140
6.3.4. Soldadura por Arco Protegido con Gas	.....	142
6.3.5. Soldadura con alambre tubular.	.....	146
6.3.6. Soldadura por arco sumergido.	.....	155
6.3.7. Soldadura Aluminotérmica, de termita o Soldadura de Rieles	.....	159
6.3.8. Soldadura por presión	.....	166
6.3.9. Zona afectada por el calor (ZAC)	.....	167
6.3.10. Ventajas y desventajas de la soldadura.	.....	168

CAPITULO 7
ATORNILLADO Y REMACHADO.

7.1 Introducción. .	....171
7.2 Remachado o roblonado	.....174
7.3. Atornillado	.....176
7.3.1 Tornillos de alta resistencia (AR)	.....177

CAPITULO 8
MANUFACTURA ADITIVA

8.1. Introducción	.....180
8.2. Historia de la impresión 3D	.....184
8.3. Los procesos más comunes de Fabricación Aditiva	.....192
8.3.1. Sinterizado Láser Selectivo (SLS)	.....194
8.3.2. Fotopolimerización (SLA)	.....196
8.3.3. Chorro de pegamento multicolor	.....198
8.3.4. Modelado por deposición fundida (FDM)	.....198
8.3.5. Polyjet	.....200
8.3.6. Sinterizado Directo de Metal Láser (DMLS)	.....201

BIBLIOGRAFÍA	206
--------------	-----

CIBERGRAFÍA	207
-------------	-----

INTRODUCCIÓN

Los procesos de conformado de materiales comprenden un amplio grupo de procesos de manufactura, en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar las formas de las piezas metálicas y otros materiales.

Para formar exitosamente un metal en términos de manufactura, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son generalmente una *baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad*.

Una consideración de importancia es la capacidad de trabajar y de modelar los materiales, es decir la cantidad máxima de deformación que puede resistir un material sin fallar en un proceso específico de formado.

Sin entrar en tantos detalles los procesos de formado se pueden dividir en dos: procesos de deformación volumétrica (como forja, laminado y extrusión) en los cuales las fuerzas aplicadas a la pieza de trabajo son de naturaleza predominantemente compresiva y en contraste están los procesos de formado de lámina (como doblado, estampado, estirado, hidroformado, etc), donde las fuerzas aplicadas son principalmente de tensión.

En las notas que se presentan a continuación se describen de manera general los procesos de conformado más utilizados actualmente dentro de la industria, y como siempre, cualquier comentario o corrección, será bienvenido.

CAPITULO 1

OBTENCIÓN DEL ACERO

1.1 Obtención del mineral de hierro.

El fierro (Fe) o hierro, es uno de los materiales más abundantes en el medio ambiente, constituyendo casi el 5% de la corteza terrestre, y se encuentra en forma de rocas combinado con otros elementos, a las cuales llamamos mineral, que de acuerdo a su composición química se pudiesen clasificar en tres principales grupos: óxidos, carbonatos y sulfuros.

Los minerales que contienen Hierro son los siguientes:

- Hematites roja (Fe_2O_3)
- Hematites parda o limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- Magnetita (Fe_3O_4)
- Espato de hierro o siderita (FeCO_3)
- Pirita (FeS)
- Calcopirita (FeCuS)

Estos materiales se extraen de una mina por el método de tajo abierto, la cual consiste en abrir túneles o tiros haciendo uso de explosivos, maquinaria y trabajo manual. El mineral obtenido de las minas se le conoce como *mena* con alto contenido de mineral capaz de extraérsele metal comercial, por ejemplo, la pirita.

La preparación de los minerales de hierro comienza con su extracción de la mina y continúa con una secuencia de procesos u operaciones, descritos a continuación.



Figura 1.1. Mina a rajo abierto en Colombia. <https://www.maray.cl/wp-content/uploads/2020/01/240712mineria.jpg>

1.2 Fragmentación de los minerales.

El mineral se transporta desde los bancos de minas hasta los equipos quebradores o machacadores de tipo mandíbula y giratorias, donde el material se tritura y separa según sus dimensiones.

El proceso se subdivide en 2 fases:

- Trituración primaria: reduce el mineral a tamaños no inferiores a 50 mm (2 pulgadas). Su relación de reducción varía de 3/1 a 5/1, y se tienen distintos mecanismos para su realización.
- Trituración secundaria: Reduce el mineral a tamaños menores, entre unos 15 y 22 mm, con una relación de reducción que llega hasta 8/1. Este proceso secundario se realiza con trituradoras denominadas Conos Symons, las cuales son maquinas compuestas por un cono que gira excéntricamente en el interior de otro tronco de cono invertido, y entre sus paredes se tritura el material.

El segundo proceso en la fragmentación del mineral es la molienda, proceso posterior a los dos anteriores de trituración. Este también se subdivide en dos fases: molienda devastadora y molienda acabadora. La primera se realiza en molinos de barras, cilindros de eje horizontal con paredes interiores de acero aleado, los cuales machacan al material con una relación de 10/1; el mineral se reduce a tamaños entre los 1.3 y 1.7 mm.

La molienda acabadora se efectúa en molinos de bolas, obteniéndose reducciones de hasta 100/1 con lo que se pueden alcanzar tamaños de hasta 50 micras.

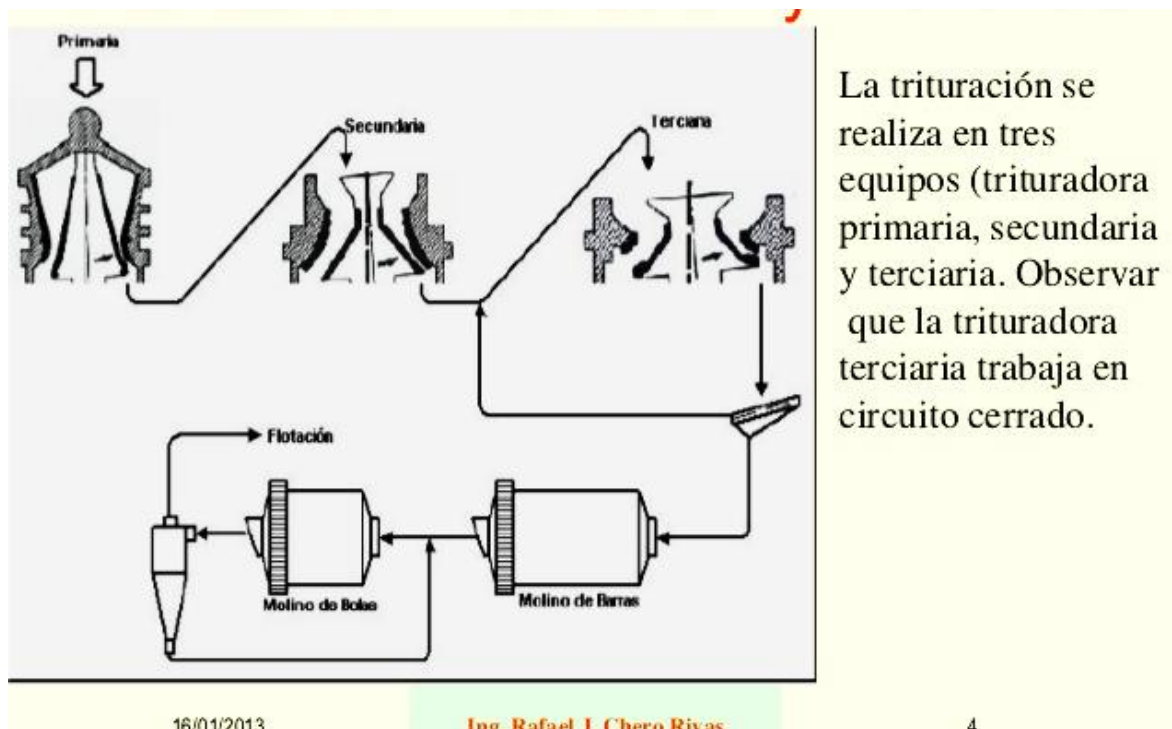


Figura 1.2. Proceso de trituración.

1.3 Clasificación y cribado.

En este punto se clasifican y separan los trozos de mineral, en cuanto al tamaño deseado de los trozos; los cuales para su clasificación pasan por un proceso siguiente:

- Cribas de barras: El material pasa primero por estas cribas de barras, utilizadas para la primera trituración con diámetros de 80 mm.
- Cribas vibratorias: Estas están sujetas a bastidores vibratorios con movimientos oscilantes, utilizados en la primera molienda (desbastadora).

Los clasificadores separan el material por diferencia de peso, y se pueden encontrar dos tipos de clasificadores según su vía, pues existen los clasificadores de vía húmeda (como es el clasificador Atkins) basado en las diferencias de peso de los trozos del material en agua, o también clasificadores de vía seca, el cual lo separa por medio de fuerza centrífuga haciendo salir al material más pesado del ciclón.

Otro método comúnmente utilizado es la gravimetría, el cual es método de concentración basado en la separación de los minerales de acuerdo con sus diferencias en densidades, la cual se realiza en una pulpa muy espesa donde se busca la sedimentación de los materiales menos densos en la superficie de dicha pulpa para fácilmente separarlos del resto de mineral.

La separación por flotación, otro método importante de concentración y separación de los minerales, se basa en la capacidad (o discapacidad) que presentan algunos materiales al ser mojados. Pues la mojabilidad de las superficies de los materiales está determinada por los valores relativos de las energías inter faciales: solido-liquido, solido-aire, agua-aire. Si la energía de la fase solida supera por mucho a la fase liquida se dice que el material es hidrofobico, y el agua no se adherirá a él. Si la energía interfacial solido-aire es mayor, se dice que su superficie es hidrofílica y por lo tanto tendera a ser mojado fácilmente dicho material.

Por tanto, en el proceso de flotación, se sopla aire a través de la pulpa acuosa de mena molida, con lo cual se provoca que los materiales hidrofílicos se mojen más y

se hunda, mientras que los materiales hidrofobicos se unan a las burbujas de aire, suban y sean más fáciles de retirar de la pulpa de mena. Para efectuar este procedimiento es necesario añadir ciertos ingredientes a la pulpa, como los siguientes:

- Espumeantes
- Colectores
- Activadores
- Depresores
- Acondicionadores

Finalmente, se mencionan los dos métodos de separación que hacen uso de las propiedades electromagnéticas de los materiales. Algunos materiales como el hierro, la magnetita y algunas formas de pirrotita son magnéticos; existen materiales paramagnéticos como la hematita, granate y la ilmenita por mencionar algunos, los cuales también son atraídos por un magneto pero débilmente. Y finalmente otros materiales que no son atraídos magnéticamente como el cuarzo y la calcita que son magnéticos.

Esta separación se prefiere para los materiales ferromagnéticos, en particular la magnetita, y se realiza en distintos procesos de la preparación del material previo a la fundición; para materiales de diámetro grueso de entre 6 y 150 mm se prefiere la separación magnética con el material en vía seca. Para materiales con diámetros finos, que van del orden de milímetros a micras, se prefiere la vía húmeda.

La separación electroestática se basa en las diferencias de conductividad eléctrica de los materiales. El método se realiza forzosamente en vía seca. La carga de

material se esparce en una capa delgada (diámetros de entre 1 y 0.1 milímetros) y se aplica una carga eléctrica muy alta a un rodillo que pasa por encima de esta capa de material, la cual ejercerá una fuerza electromagnética sobre las partículas, atrayéndolas del resto del material.

1.4 Aglomeración.

Esta es la operación final del preparamiento del material para obtener las propiedades para su fundición. El material que sale del proceso de concentración se somete a distintos procesos con el fin último de obtener un material de alta ley en hierro (con un contenido superior al 60%), un tamaño adecuado del mineral, con un diámetro entre los 25 y 60 mm., Se logra también una mayor resistencia mecánica para evitar su desintegración por su manipulación. Se logra buena conductividad térmica para mejorar su fundición y lograr un bajo contenido de elementos nocivos como son el azufre y el fósforo.

Los procesos más empleados para este proceso de aglomeración son los siguientes:

- **Peletización:**

Consiste en la formación de pequeñas esferas o pellets con mineral de hierro finamente molido, mezclado con sustancias aglomerante, que al secarse son sometidos a un principio de fusión superior a los 1100°C.

- **Sinterización:**

Es la aglomeración de finos ferríferos o polvillos de hierro, obtenidos en distintos procesos de extracción, pulverización, trituración; así como en los distintos procesos en una planta siderúrgica como el polvillo de los recolectores

de los altos hornos, el polvo de los decantadores de las lavadores de gas del alto horno, la escama de las escorias recuperables, etc.

Estos polvillos finos, combinados con coque y fundentes como la dolomita y la calza se colocan en un horno y se funden en pequeños gránulos gracias a la fusión producida por el combustible.

- **Briqueteado:**

Este proceso se realiza en caliente; calentando los finos polvos del mineral recolectado en los hornos, a una temperatura de 900 a 1100°C, el material se presenta como una pasta, la cual se prensa en moldes en forma de briquetas y después se deja enfriar al aire libre.

1.5 Materias primas para la fundición.

- a) Minerales de hierro en formas de Sinter o pellets, que son concentrados de materiales ferrosos (hematita o Magnetita) mezclados con aglutinantes o sometidos a procesos de pre fundición, los cuales son los principales proveedores del elemento Fe ya que representan cerca de un 93.5% de hierro en la fundición.
- b) Coque metalúrgico tiene la función de producir el calor necesario para fundir el hierro y la escoria, además de acelerar los procesos químicos y proporcionar el carbono necesario para desprender el oxígeno contenido en los óxidos de hierro. El coque puede ser carbón mineral o vegetal. Algunos materiales utilizados como coque son la Hulla, que es un combustible fósil proveniente de la descomposición vegetal a través de millones de años, y el Coque que proviene de la destilación destructiva de la hulla en ausencia de

oxígeno, por lo cual está libre de materiales volátiles y alto contenido en carbono fijo

- c) Aire es necesario para que ardan los materiales combustibles, tales como el carbón, el gas natural o petróleo. El oxígeno del aire es el elemento principal para las reacciones químicas, unas deseables y otras perjudicables en este proceso.
- d) Fundentes son empleados para formar la escoria, es decir el conjunto de minerales y elementos indeseables en el hierro fundido. Se usan principalmente la piedra caliza (carbonato de calcio) y la dólmita (carbonato de magnesio y calcio). Estos forman junto con las cenizas del coque y la ganga o desechos de la carga de mineral la llamada escoria fluida, la cual es más ligera y menos densa que el metal fundido y por tanto fácil de extraer. La escoria es el resultado de la reacción química entre el fundente y la ganga y demás impurezas en el proceso de extracción de la mena.

1.6 Proceso de alto horno.

Todas estas materias primas, mineral extraído, coque y fundentes, son llevadas a la parte superior del alto horno y son introducidas. Esta mezcla de carga se funde en una reacción a 1650°C , con aire precalentado aproximadamente a los 1100°C y soplado a través de toberas. Aunque ocurren muchas reacciones químicas dentro del alto horno, la principal de ellas es la reacción del Oxígeno con el Carbono; se produce monóxido de carbono que reacciona con el óxido de hierro y lo reduce a Hierro. El aire precalentado es fundamental para lograr la temperatura idónea para llevar a cabo estas reacciones.

El metal fundido se acumula en la parte inferior del alto horno, en tanto que la escoria flota a la parte superior y son extraídas. A intervalos de 4 o 5 horas, el horno se va vaciando a cubas o carros torpedo, con capacidades de hasta 160 toneladas de hierro fundido.

El metal en esta etapa se conoce como arrabio o hierro de primera fusión (pig iron); con una composición de aproximadamente 4% de Carbono, 1.5% de silicio, 1% de Magnesio, 0.04% de Azufre y 0.4% de Fósforo y el resto de hierro (aprox. 93.06%).

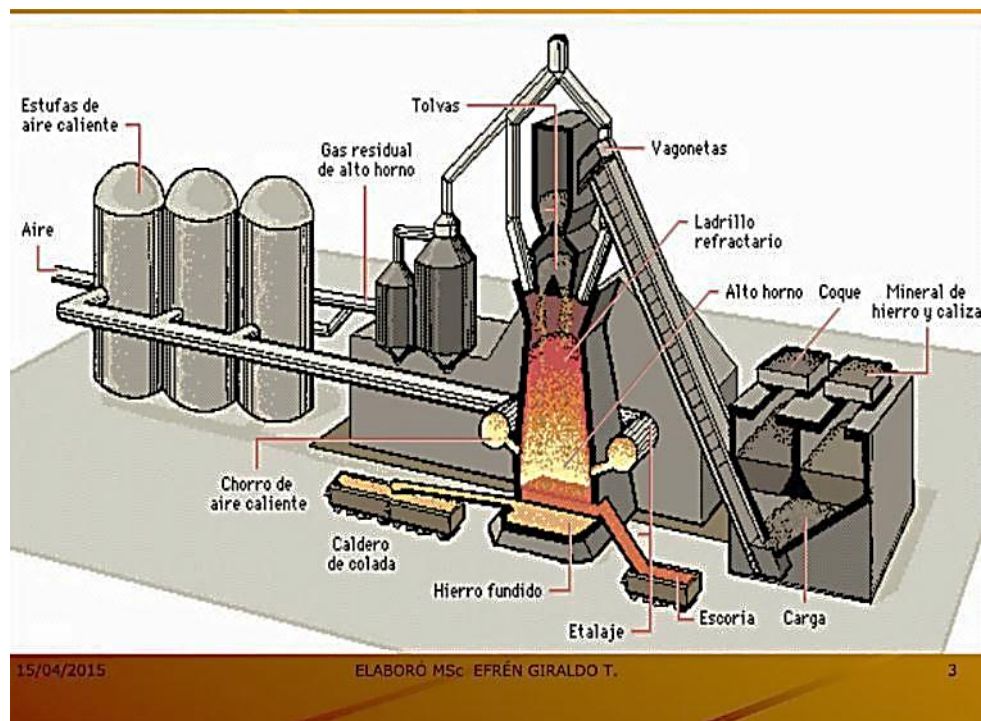


Figura 1.3. Ilustración esquemática de un alto horno. Fuente: AISI.

La operación de un alto horno comprende los siguientes pasos:

1. Puesta en marcha
2. Encendido
3. Carga

4. Colada o sangría
5. Escoriado o colada de escoria
6. Taponado
7. Embarcamiento, formación de bóveda y de lodos
8. Campaña de alto horno o tiempo de operación
9. Parada temporal o definitiva de alto horno
10. Apagado del horno
11. Dinamitado del horno para quitar obstrucciones
12. Formación de salamandras
13. Revestido y reparación del horno.

1.7 Métodos de vaciado.

1.7.1 Lingoteras

En la última fase vista, el acero fundido no pasa directamente del horno a las lingoteras, sino que cierta parte de tiempo donde se enfría un poco poder ser vaciado a las lingoteras. El acero en la cuchara u olla de colado puede ser utilizado en tres procesos diferentes:

1. Fabricación de lingotes
2. Colada continua
3. Fundición de piezas de acero moldeado (Hierros fundidos)

Las lingoteras están fabricadas de hierro de cubilote o hierro de alto horno, con 3.5% en contenido de carbono. Los lingotes enfriados son extraídos de los moldes y bajan a pozos de recalentamiento, donde son calentados uniformemente a 1200°C para su procesamiento subsecuente (laminado).

Flujo de Proceso del BOF

Process flow of BOF

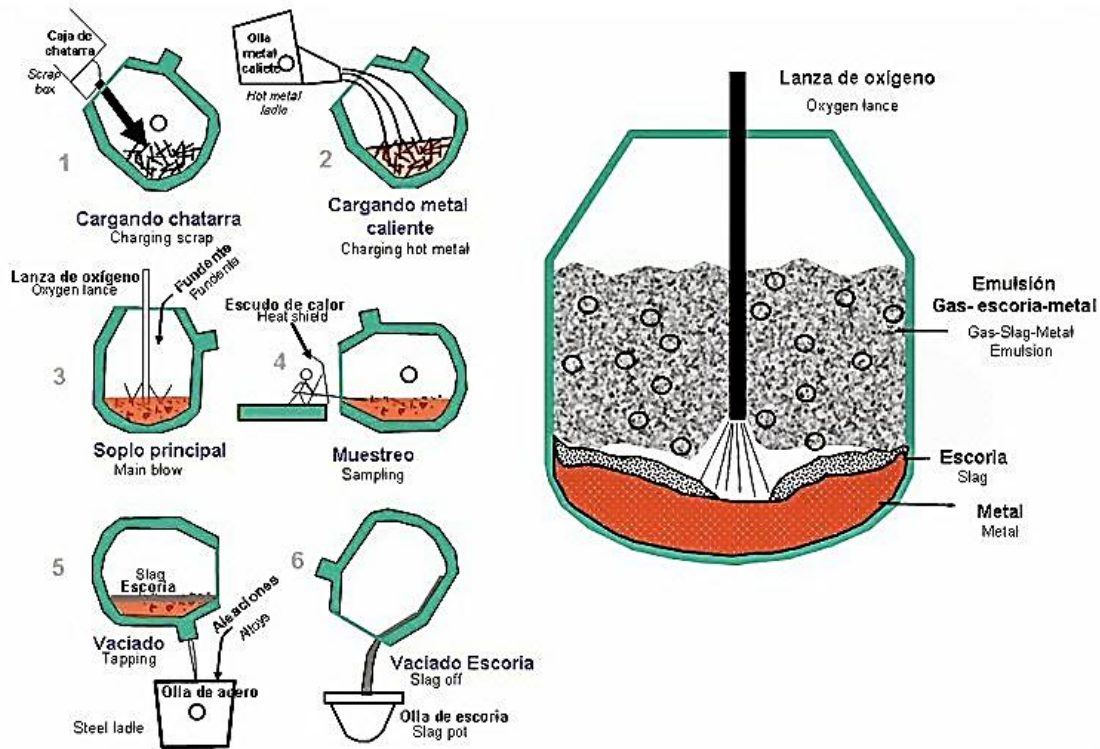


Figura 1.4. Flujo en el proceso de Horno al oxígeno básico

Durante la solidificación de los lingotes ocurren distintas reacciones, de las cuales depende la calidad del acero producido. Por ejemplo: durante la fabricación del acero se pueden disolver cantidades significativas de oxígeno y otros gases en el metal fundido. Estos materiales son rechazados por la solidificación del metal, dado que el límite de solubilidad de los gases en el metal se reduce de manera importante conforme baja su temperatura, por lo que el oxígeno rechazado se combina con el carbono formando monóxido de carbono y finalmente produciendo porosidad en el lingote solidificado.

De acuerdo con la calidad de los aceros obtenidos por el proceso de lingoteo se clasifican en los siguientes grupos:

- Aceros muertos o calmados
- Aceros semimuertos o semicalmados y
- Aceros efervescentes.

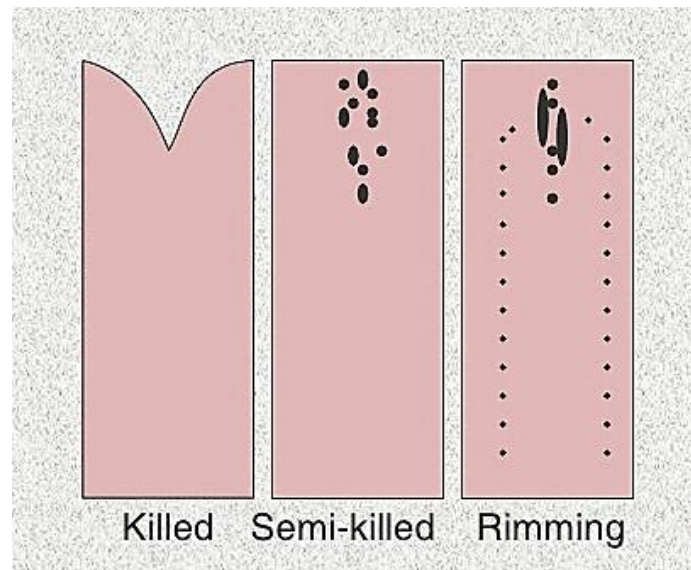


Figura 1.5. Aceros calmados, semicalmados y efervescentes.

1.7.2 Colada continua.

En el método tradicional de colado de lingotes, el proceso es por lotes, es decir cada lingote debe ser vaciado, solidificado y retirado de su lingotera de manera individual, lo cual puede ser un proceso tardado; además de que están presentes en todos estos los rechupes, variaciones estructurales y químicas. Estos problemas se pueden reducir cambiando el método de vaciado, por el llamado *colada continua*, que produce aceros de mayor calidad y con un costo relativamente reducido.

Después de la fundición, el metal es vertido en un recipiente de vaciado intermedio, recubierto de refractario, donde son retiradas las impurezas superficiales. El metal

fundido se mueve hacia abajo a través de moldes de cobre enfriados por agua y empieza a solidificarse en una trayectoria soportada por rodillos de arrastre.

Antes de iniciar el proceso de colado, se inserta una barra ficticia o de inicio, en la parte inferior del molde. Cuando el metal fundido se vacía por primera vez, solidifica sobre la barra ficticia. La barra es retirada a la misma velocidad a la cual se va vaciando el metal. La velocidad de enfriamiento es tal que el metal desarrolla una costra solidificada como para soportarse a sí mismo durante su recorrido hacia abajo.

El espesor de la costra en el extremo de salida del molde es de 12 a 18 mm. Se proporciona un enfriamiento adicional mediante rociados de agua a lo largo de la trayectoria del recorrido del metal.

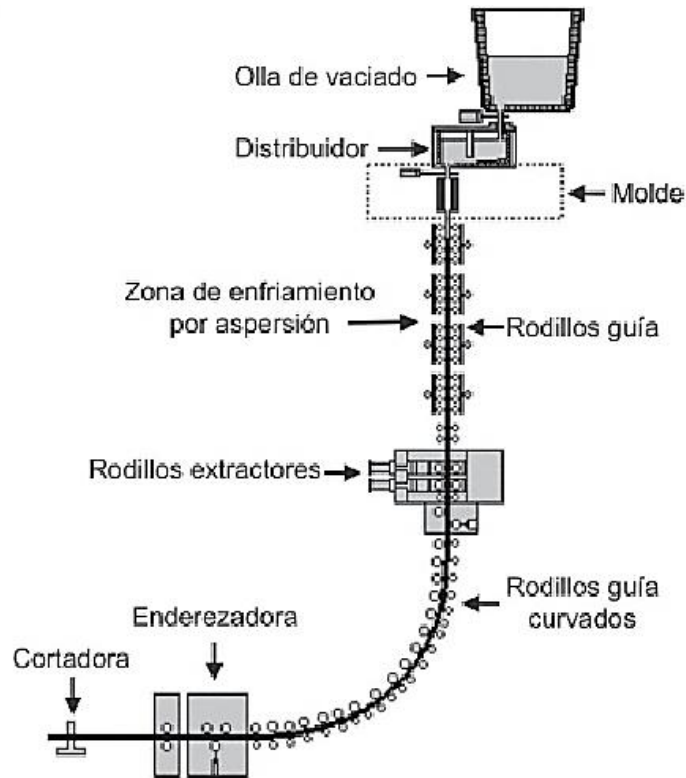


Figura 1.6. Proceso de colada continua en el acero. Fuente: Metal Caster's Reference and Guide American Foundry-men's Society.

El material colado se puede cortar a tramos deseados mediante el uso de guillotinas o corte por soplete controlado por computadora. El material obtenido de este vaciado o colado continuo tiene un espesor de 250mm y con nuevos arroyos lo reducen hasta 25 mm. Seguido por un tren de laminado donde se realizan procesos adicionales como la limpieza del material y su tratamiento químico, así mismo como tratamientos térmicos como el recocido y tratamientos posteriores como el galvanizado o aluminizado para obtener productos semiterminados.

CAPITULO 2

FUNDICIÓN

Uno de los procesos de manufactura más empleados en la industria es la fundición. Esta se encarga de llevar a los metales hasta el punto de fusión, para que el metal adopte la forma deseada a través de un molde, el conocimiento de este proceso permitirá tomar decisiones técnicas a la hora de diseñar productos o dirigir operaciones que involucren los procesos de fundición.

Las primeras fundiciones se hicieron durante el periodo 4000-3000 a.C utilizando moldes de piedra y metal para el colado del cobre. Con el transcurrir del tiempo se fueron desarrollando varios procesos de colado, cada uno de ellos con sus propias características y aplicaciones, a fin de llenar requerimientos específicos de ingeniería y de servicio.

2.1. Fundición en arena

Es el método tradicional de vaciado de metales es en el molde de arena y ha sido usado por miles de años. La fundición en arena consiste en a) colocar un modelo de la forma de la pieza deseada en arena para crear una impresión, b) incorporar un sistema de alimentación, c) llenar la cavidad resultante de metal fundido, d) deja que el metal se enfrié hasta que se solidifique, e) romper el molde de arena y f) retirar la fundición (figura 2.1). Los pasos de producción correspondiente a una operación típica de fundición en arena aparecen en la figura (figura 2.2):

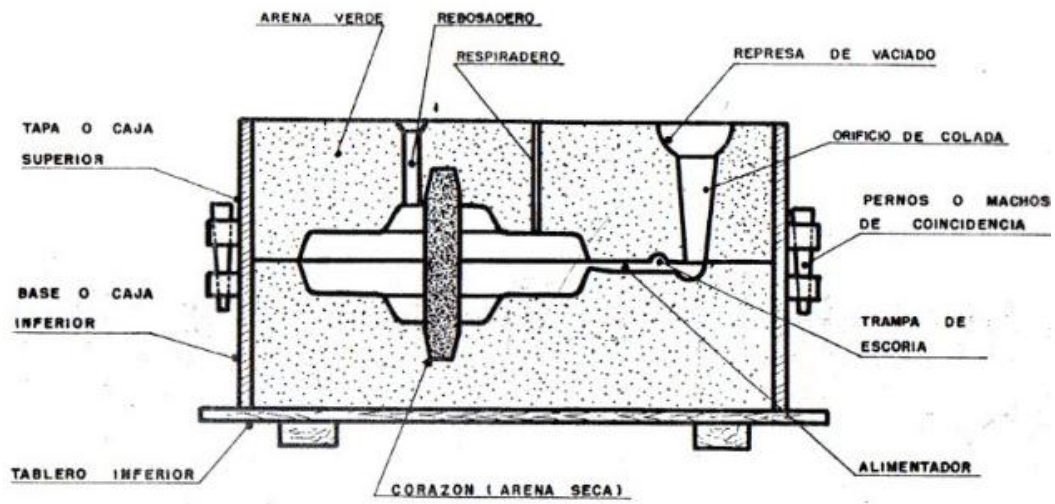


Figura 2.1. Ilustración esquemática de un molde de arena, mostrando varias características. (Kalpakjian, 2002)

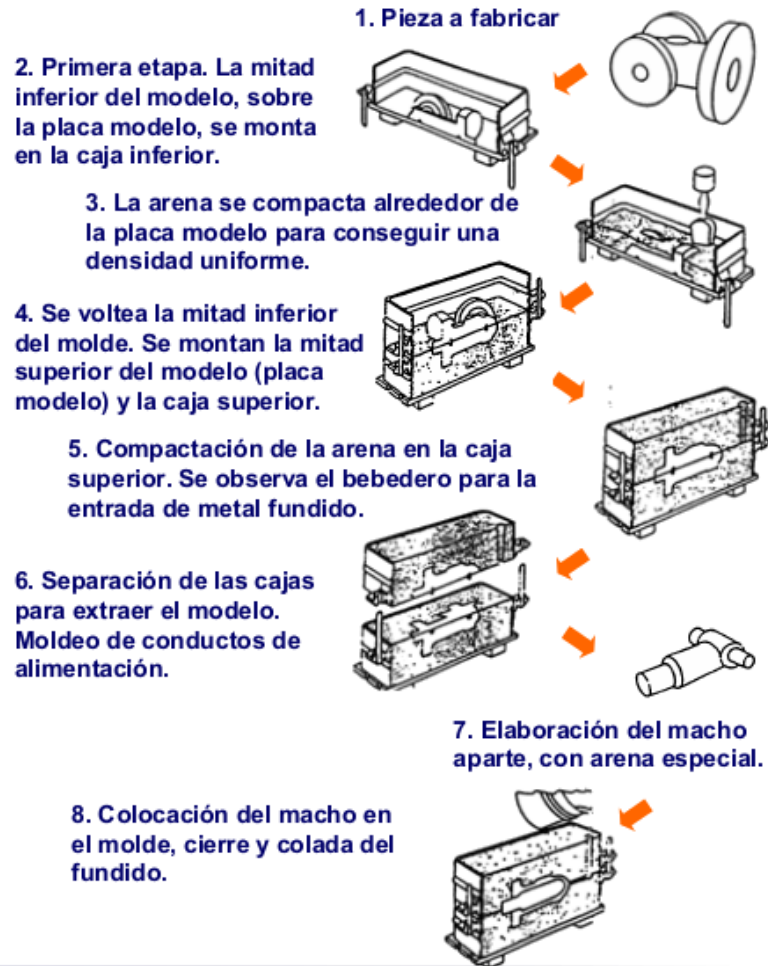


Figura 2.2. Pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.

https://1.bp.blogspot.com/-u7voGUZ0xPo/WKGPt_hKY8I/AAAAAAAAAGo/qACq19-Qe-4KU JyOCor_s96i1sT+Nc-ACEw/s1600/389_ca.png

La mayor parte de las operaciones de fundición en arena de sílice (SiO_2), que es el producto de la desintegración de las rocas a lo largo de muchos años. La arena es económica y adecuada como material de molde, debido a su alta resistencia a altas temperaturas.

2.2. Fundición en molde consumible (poliestireno expandido)

El proceso de fundición en el modelo consumible utiliza un modelo de poliestireno, mismo que se evapora en contacto con el metal fundido para formar una cavidad para

la fundición, el proceso también se le conoce como fundición de modelo evaporado o modelo perdido y se ha convertido en uno de los procesos de fundición más importantes para metales ferrosos y no ferrosos, en particular para la industria automotriz.

En este proceso, se colocan perlas de poliestireno crudo desechables (EPS), conteniendo de 5% a 8% de pentano (un hidrocarburo volátil), en un dado precalentado que por lo general está hecho de aluminio. El poliestireno se expande y toma la forma de la cavidad del dado; se aplica más calor a fin de fundir y unir las perlas entre sí. El modelo se recubre con un barro refractario base agua, se seca y se coloca en una caja de moldeo. La caja se llena de arena suelta y fina, que rodea y soporta el modelo (figura 2.3) y puede secarse o mezclarse con agentes aglutinantes para darle resistencia adicional. La arena es compactada de manera periódica utilizando diversos medios. Entonces, sin retirar el patrón de poliestireno, se vacía el metal fundido en el molde.

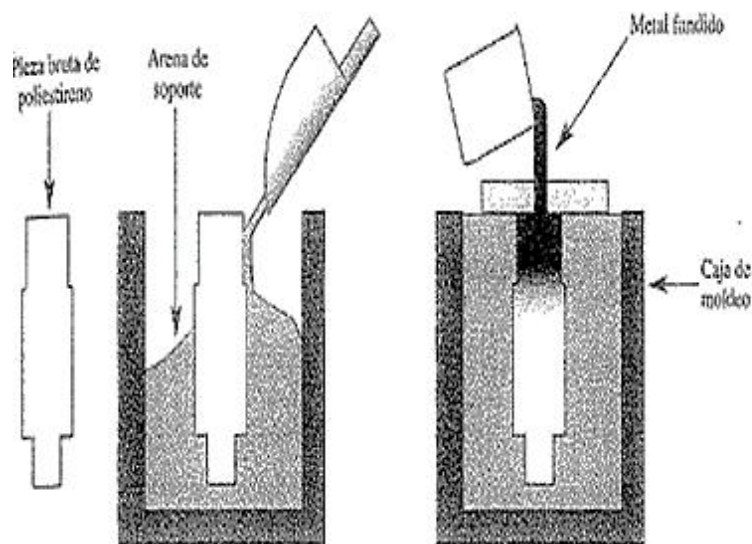


Figura 2.3. Ilustración esquemática del proceso de fundición con modelos consumibles, también conocida como espuma perdida o colado evaporativo. (Kalpakjian, 2002)

Esta acción de inmediato vaporiza al modelo y llena la cavidad del molde, reemplazando completamente el espacio antes de ocupado por el molde de poliestireno. El calor degrada al poliestireno y los productos de la degradación se ventilan hacia la arena circulante.

2.3. Fundición en molde de yeso.

En el proceso de la fundición en molde de yeso, el molde se hace de yeso (sulfato de calcio), con la adición de talco y harina de sílice para mejorar la resistencia y controlar el tiempo requerido para el curado de yeso. Estos componentes se mezclan con el agua, y el barro resultante es vaciado sobre el modelo.

Una vez curado el yeso, por lo general después de 15 minutos, se retira el patrón y se deja secar el molde a 120 °C - 260°C para eliminar la humedad. Pueden utilizarse temperaturas de secado más elevadas dependiendo del tipo de yeso. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad del mismo y se precalientan hasta aproximadamente 120°C. El metal fundido es vaciado entonces en el molde.

Las piezas fundidas tienen detalles finos con un buen acabado superficial. Dado que los moldes de yeso tienen menor conductividad térmica en comparación con otros, las fundiciones se enfrían lentamente, y se obtiene una estructura de grano más uniforme, con menos deformación. El espesor de las paredes de las piezas puede ser de 1mm-2.5mm. Se conocen como fundiciones de precisión, en razón a la elevada precisión dimensional y el buen acabado superficial obtenido.

2.4. Fundición en molde cerámico

El proceso de fundición el molde cerámico, es similar al proceso de molde de yeso, con la excepción que utiliza materiales refractarios para el molde adecuado para aplicaciones de altas temperaturas. El barro mezcla de zirconio de grano fino

($ZrSiO_4$), óxido de aluminio y sílice fundido, que se mezclan con agentes aglutinantes y se vacían sobre el molde misma que han sido colocadas en una caja de moldeo (figura 2.4 (a, b, c)).

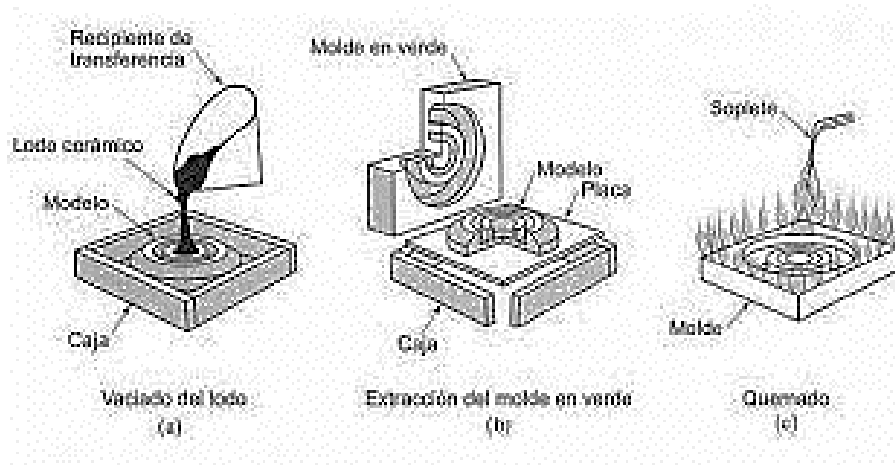


Figura 2.4(a, b, c) Secuencia de operaciones en la elaboración de un molde de cerámica. (Kalpakjian, 2002)

El molde está hecho de madera o de metal. Después del endurecimiento, los moldes se retiran, se secan, se queman para eliminar toda materia volátil y se hornean. Los moldes se fijan firmemente y se utilizan como moldes totalmente de cerámica.

La resistencia a las altas temperaturas de los materiales refractarios moldeados usados permite que estos moldes se utilicen en el colado de aleaciones ferrosas y otras de alta temperatura de fusión, de aceros inoxidables y de aceros para herramientas. Las piezas obtenidas tienen buena precisión dimensional y buen acabado superficial en una amplia variedad de tamaños y formas complejas, pero el proceso es costoso. Las piezas que comúnmente se fabrican son impulsores, cortadores para operaciones de maquinado, dados para trabajo en metal y moldes para la fabricación de componentes de plástico o de hule.

2.5. Fundición por revestimiento

El proceso de fundición por revestimiento, también llamado a la cera perdida, se utilizó por primera vez durante el periodo de 4000-3000 a.C. el modelo se hace en cera o en plástico utilizando técnicas de moldeo o de prototipo rápido. Las secuencias involucradas en la fundición por revestimiento, se fabrica el modelo inyectando cera o plástico fundidos en un dado metálico con la forma del molde, este después se sumerge en un material refractario, figura 2.5

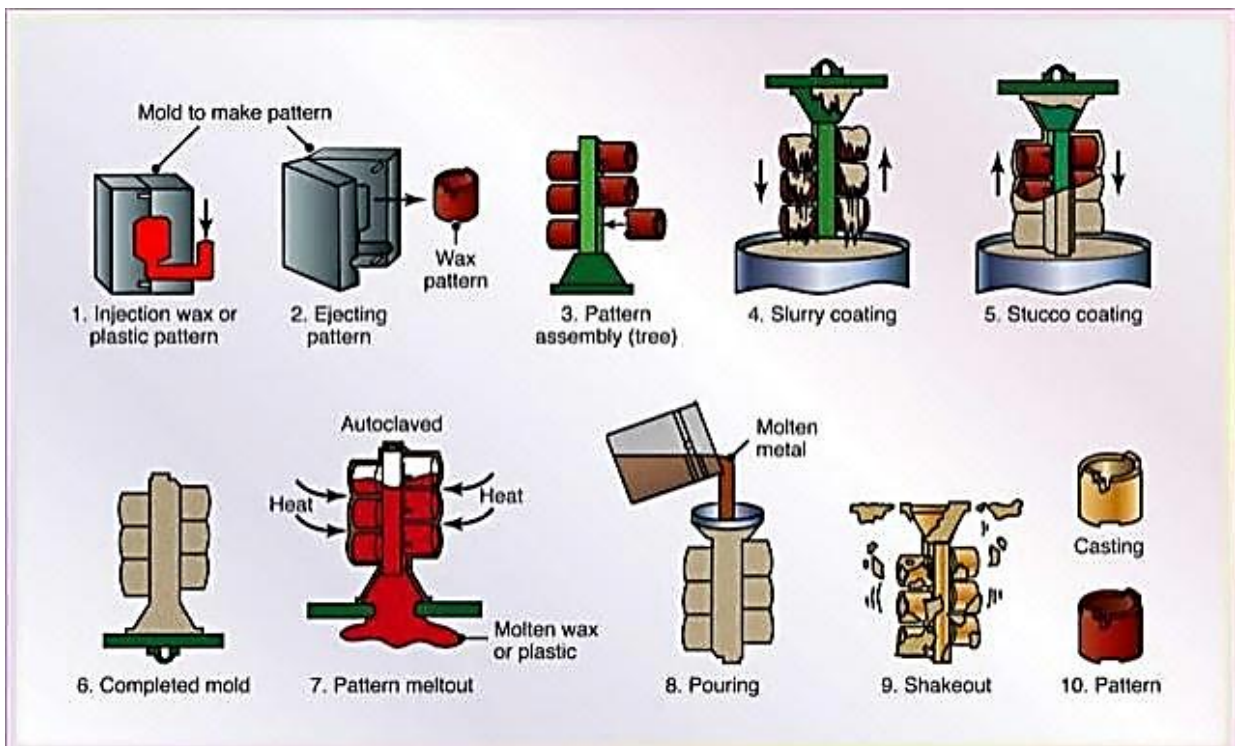


Figura 2.5. Proceso de fundición por revestimiento o a la cera perdida. Los productos obtenidos con detalles muy finos y con diversos metales.

El término revestimiento proviene del hecho de que el modelo es revestido con el material refractario. Los modelos de cera requieren de un manejo cuidadoso, porque no son suficientemente resistentes para soportar las fuerzas involucradas durante la manufactura del molde.

Este proceso es capaz de producir formas complejas, con piezas que pesan desde 1 g hasta 35 kg, de una diversidad de metales ferrosos y no ferrosos y sus respectivas aleaciones. Las piezas típicas que se fabrican son componentes para equipos de oficina así como de componentes mecánicos como engranes, levas, válvulas y trinquetes.

2.6. Fundición al vacío

En la figura 2.6 se muestra una ilustración esquemática del proceso de fundición al vacío, o proceso de baja presión contra gravedad. Se moldea una mezcla de arena fina y de uretano sobre dados de metal que se cura con vapores de amina. El molde es sujeto después con un brazo robótico y se sumerge parcialmente en el metal fundido que se encuentra en un horno de inducción.

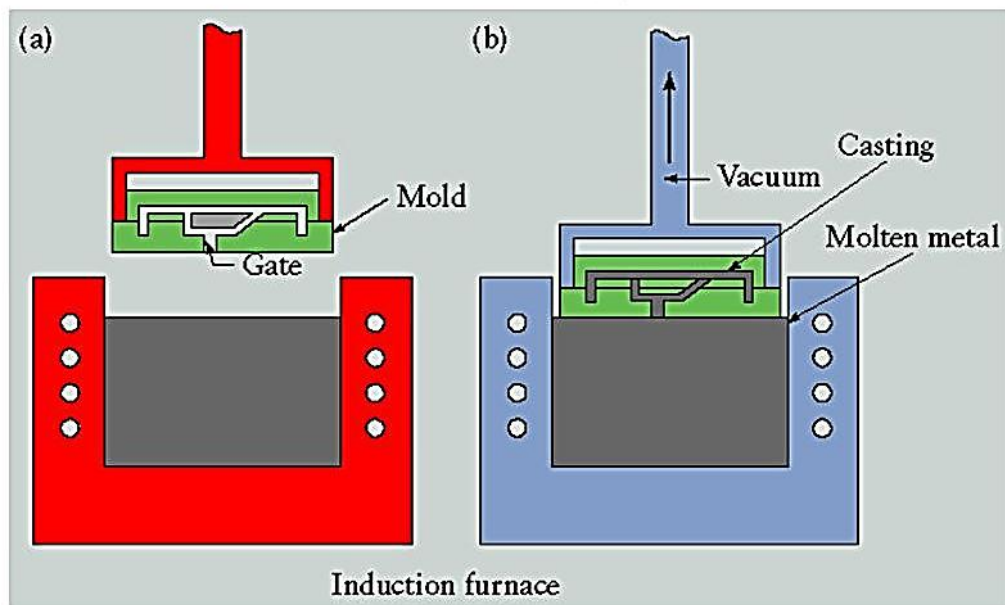


Figura 2.6. Esquema del proceso de fundición al vacío

El metal se puede fundir al aire (proceso CLA) o en vacío (proceso CLV). El vacío reduce la presión del aire en el interior del molde a aproximadamente dos terceras partes de la presión atmosférica, succionando por tanto el metal fundido en las cavidades del molde a través de un canal de alimentación en la parte inferior del molde. El metal fundido en el fondo en el horno está a una temperatura por lo general por encima de la temperatura liquidus; en consecuencia, empieza a solidificarse dentro de una fracción de segundo. Una vez lleno el molde se retira del metal fundido.

Las piezas CLA se fabrican fácilmente en elevados volúmenes y a un costo relativamente bajo. Las piezas CLV usualmente involucran metales reactivos, como aluminio, titanio, zirconio y hafnio. Estas piezas, que a menudo se encuentra en forma de súper aleaciones para turbinas de gas, pueden tener paredes de un espesor de hasta 0.5mm (0.02 pulgadas). El proceso puede ser automatizado y los costos de producción son similares a los de la fundición en arena verde.

2.7. Fundición en molde permanente

En el proceso de fundición en molde permanente, también conocido como fundición en molde duro, se fabrican dos mitades de un molde de materiales como hierro colado, el acero, el bronce, el grafito o las aleaciones de metal refractario. La cavidad del molde y el sistema de canales de alimentación se maquinan en el molde y por lo tanto forman parte integral del mismo. Para reproducir piezas con cavidades internas, se colocan corazones hechos de metal o de agregados de arena en el molde antes de la fundición, figura 2.7.

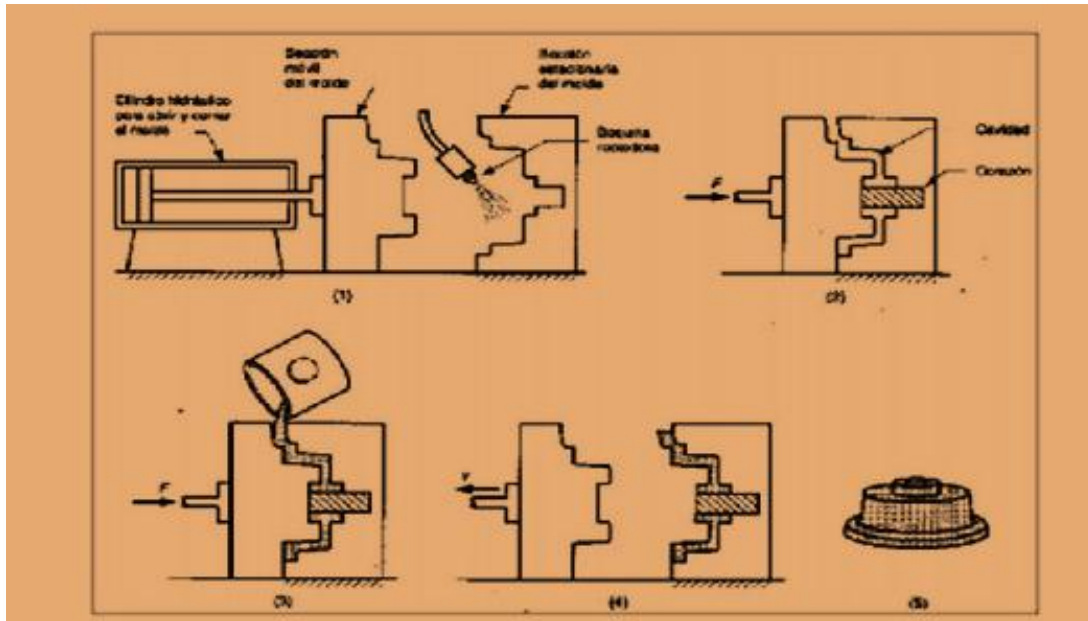


Figura 2.7. Fundición en molde permanente por gravedad.

Aunque la operación de fundición del molde permanente se puede llevar a cabo manualmente, el proceso se puede automatizar para grandes lotes de producción. Este proceso se utiliza principalmente para aleaciones de aluminio, magnesio, cobre y hierro gris, debido a sus puntos de fusión por lo general inferiores. También se pueden fundir los aceros utilizados moldes de grafito o de metal resistentes al calor.

Este proceso produce, a tasas elevadas de producción, fundiciones con un buen acabado superficial, buenas tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas uniformes y buenas. Piezas típicas que se fabrican incluyen los pistones automotrices, las cabezas de cilindro, las bielas, los discos en bruto para engranes de enseres domésticos, los utensilios de cocina. Las piezas que se pueden fabricar económicamente en general pesan menos de 25 kg, aunque se han hecho fundiciones especiales que pesan unos cientos de kilogramos utilizados este proceso.

A pesar de que los costos por equipo pueden ser altos debido a los costos de los dados, los costos por mano de obra pueden mantenerse reducidos mecanizando el

proceso. La fundición en molde permanente no es económica para pequeños lotes de producción, y debido a la dificultad de extraer la fundición del molde, no es posible fundir formas complejas utilizando este proceso. Sin embargo, se pueden utilizar corazones de arena fácilmente colapsarles y extraíbles de las fundiciones para dejar cavidades internas complejas. El proceso se conoce entonces como fundición en molde semipermeable.

2.8 Fundición en cáscara o hueco

Se puede fabricar fundiciones huecas con paredes delgadas mediante la fundición en molde permanente utilizando este principio, un proceso conocido como fundición de cascara, figura 2.8. El metal fundido se vacía en el molde de metal; una vez obtenido el espesor deseado de película solidificada se vierte en el molde y el metal líquido restante se extrae. Se abre las mitades del molde y se retira la fundición.

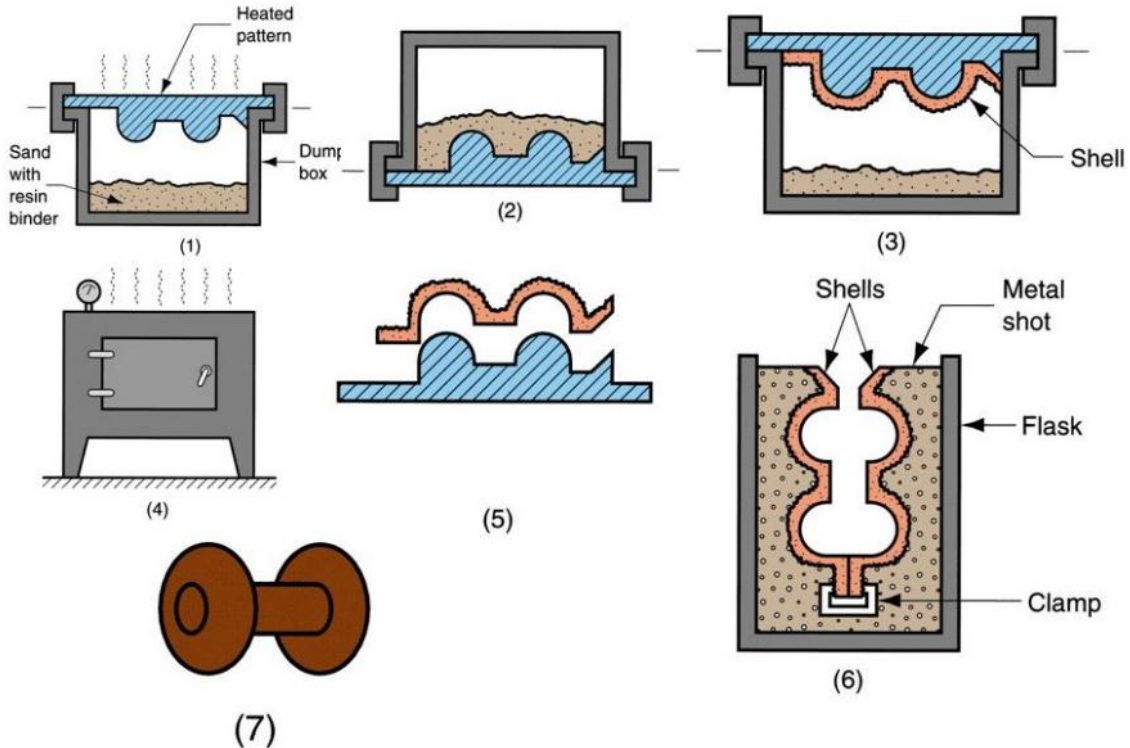


Figura 2.8. Proceso de fundición en cáscara o hueco.

La fundición en cáscara es adecuada para pequeñas corridas de producción y en general se utiliza para la elaboración de objetos de ornato y decorativos y juguetes partiendo de metales de bajo punto de fusión como las aleaciones de zinc, estaño y plomo.

2.9. Fundición a presión

En los dos procesos de molde permanente arriba descritos, el metal fundido fluye hacia el interior de la cavidad del molde por gravedad. En el proceso de fundición a presión, también llamado fundición por vaciado a presión o de baja presión figura: 2.9, el metal fundido es obligado a fluir hacia arriba por presión de gas en un molde de grafito o metal. La presión se mantiene hasta que el metal se haya solidificado totalmente dentro del molde. El metal fundido también es obligado a fluir hacia arriba mediante un vacío, que también elimina los gases disueltos y produce una fundición con menor porosidad.

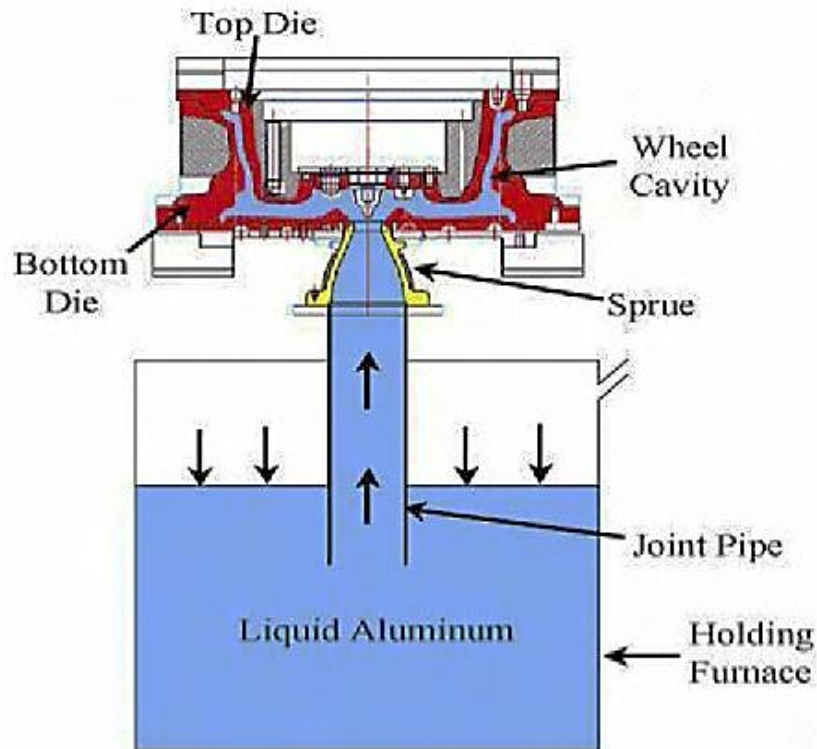


Figura 2.9 Fundición a baja presión en la producción de un rin de automóvil.

Las fundiciones a presión por lo general se utilizan para fundiciones de alta calidad, por ejemplo ruedas de aceros para carros de ferrocarriles. Estas ruedas también se pueden ser fundidas en moldes de arena o en moldes semipermeables hechos de grafito y de arena.

2.10 Fundición por inyección en matriz o dados

Desarrollado a principios de los años de 1900, es un ejemplo adicional de la fundición en molde permanente. El metal fundido es forzado dentro de la cavidad de la matriz o dado a presiones que van de 0.7 MPa - 700MPa. El término europeo de la fundición en matriz a presión o simplemente fundición en matriz, que se describe en esta sección no debe confundirse con el término de fundición a presión.

Las piezas típicas que se fabrican mediante la inyección en matriz son componentes para motores, máquinas para oficinas y enseres domésticos, herramientas de mano y juguetes. El peso de la mayor parte de las piezas fundidas va desde menos 90 g a aproximadamente 25 kg. Existen dos tipos básicos de máquinas de inyección en matriz: las de cámara caliente y las de cámara fría.

2.11. Fundición a presión en cámara fría

La fundición a presión en cámara fría es ideal para metales tales como el aluminio, que tienen un punto de fusión alto. Durante este proceso, el metal se funde en un horno a temperaturas extremadamente altas y luego se dosifica en una cámara fría para ser inyectado en el molde.

Los componentes básicos de la máquina de fundición a presión en cámara fría

Durante la fundición a presión en cámara fría, la carga fundida, que consta de más material del que se requiere para llenar la pieza de fundición, se dosifica desde el crisol en una cámara de inyección donde el pistón de accionamiento hidráulico empuja el metal hacia el molde. El material adicional se utiliza para forzar el metal adicional hacia la cavidad del molde para compensar la contracción, que tiene lugar durante la solidificación.

Los principales componentes de una máquina de fundición a presión en cámara fría se muestran a continuación. Se puede obtener una presión de inyección de más de 10,000 psi o 70,000 kPa con este tipo de máquina.

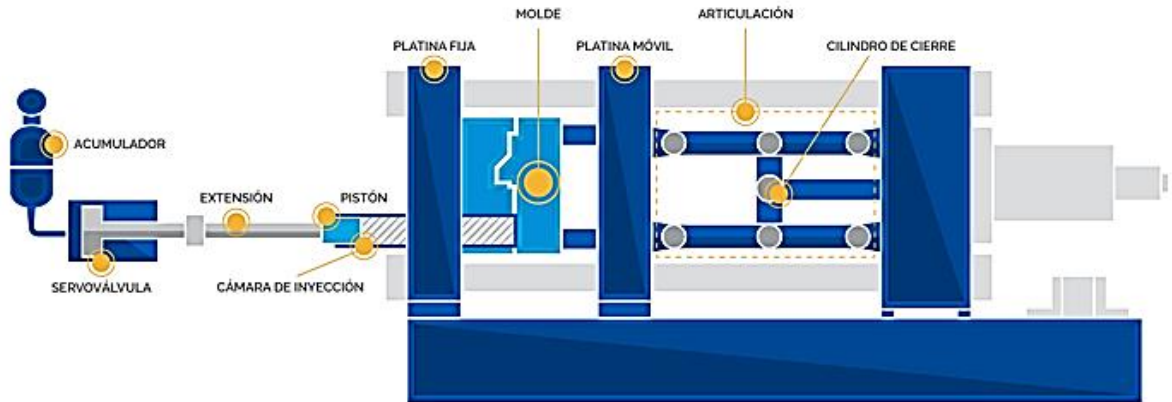


Figura 2.10. componentes de una máquina de fundición a presión en cámara fría

Secuencia de funcionamiento del proceso de fundición a presión en cámara fría
 A continuación, se describe el proceso de fundición a presión en cámara fría:

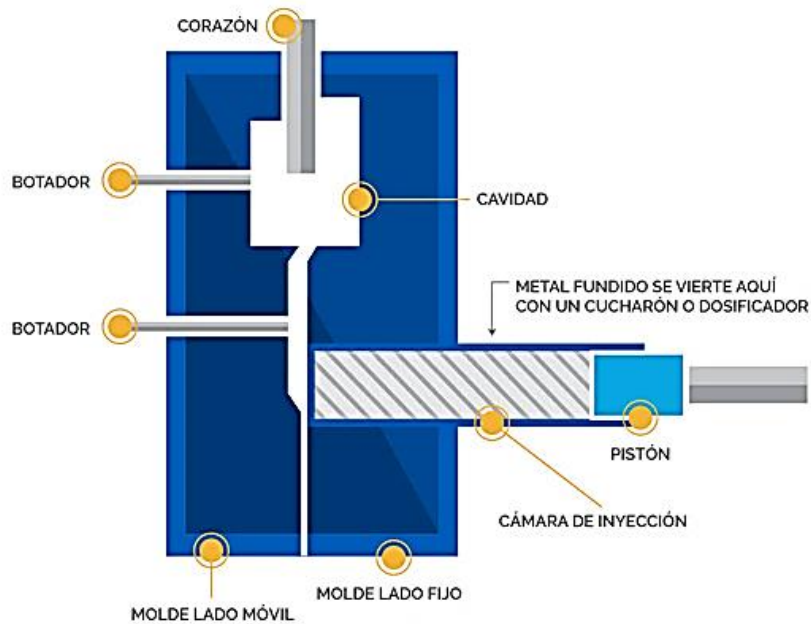


Figura 2.11. El molde se cierra y el metal fundido se dosifica en la cámara de inyección de la cámara fría.

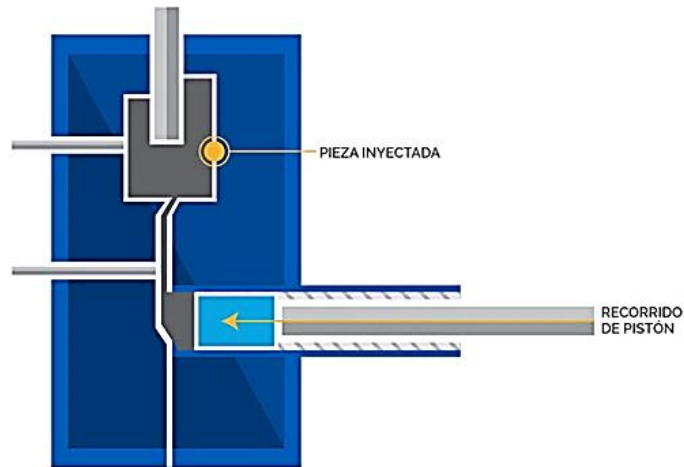


Figura 2.12. El pistón empuja el metal fundido en la cavidad de la inyección donde se mantiene bajo presión hasta que se solidifica.

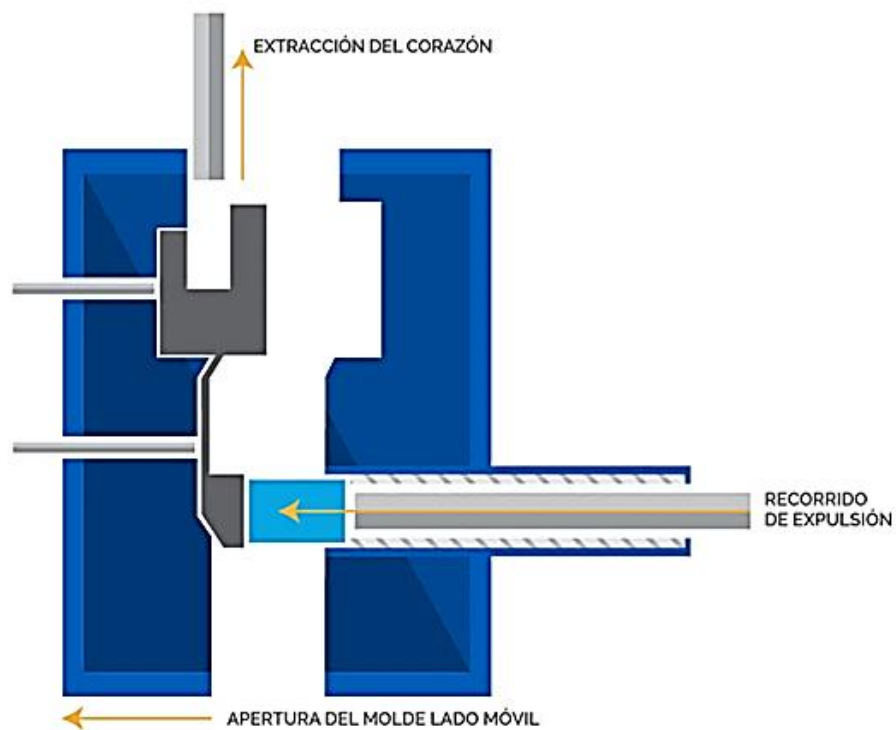


Figura 2.13. El molde se abre y el pistón avanza, para asegurar que la pieza de fundición permanezca en el molde de expulsión. Los corazones, si los hay, se retraen.

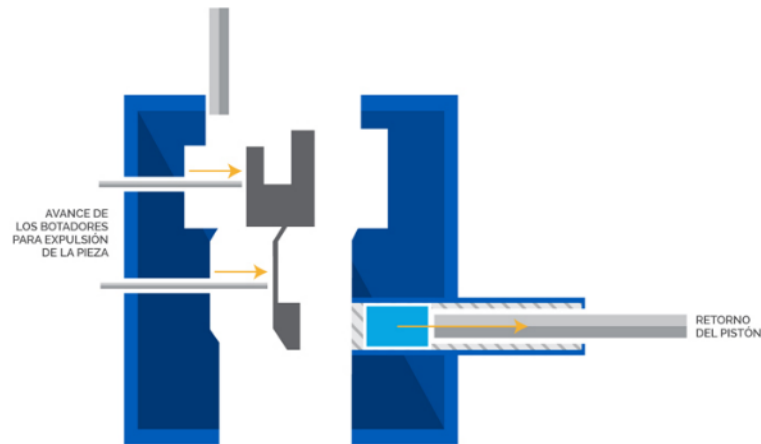


Figura 2.14. Los botadores empujan la pieza fundida fuera de la mitad del molde y el pistón regresa a su posición original.

2.12. Fundición a presión en cámara caliente

La fundición a presión en cámara caliente se puede utilizar con zinc, magnesio y otras aleaciones de bajo punto de fusión. El proceso en cámara caliente es ideal para los metales que no atacan ni erosionan fácilmente ollas de metal, cilindros y émbolos.

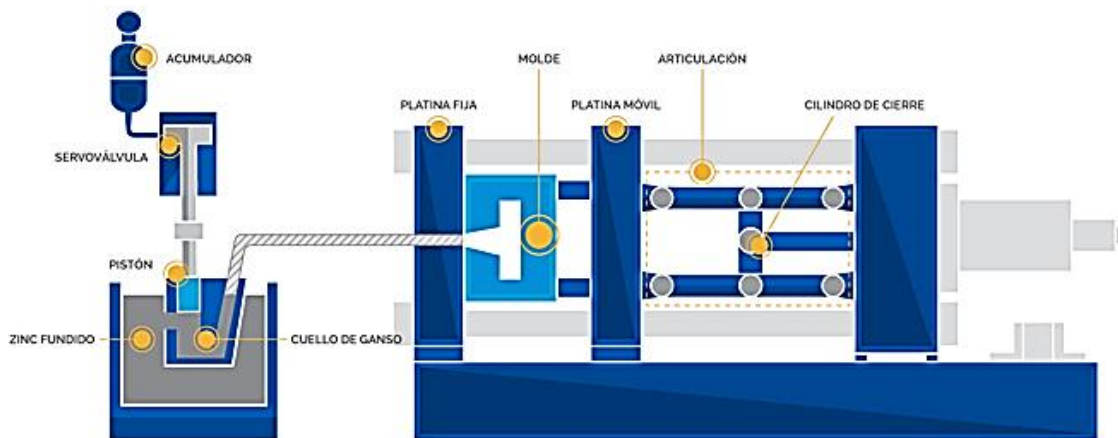


Figura 2.15. componentes de una máquina de fundición a presión en cámara fría

Secuencia de funcionamiento del proceso de fundición a presión en cámara caliente estándar

A continuación se describe el proceso de fundición a presión en cámara caliente estándar:

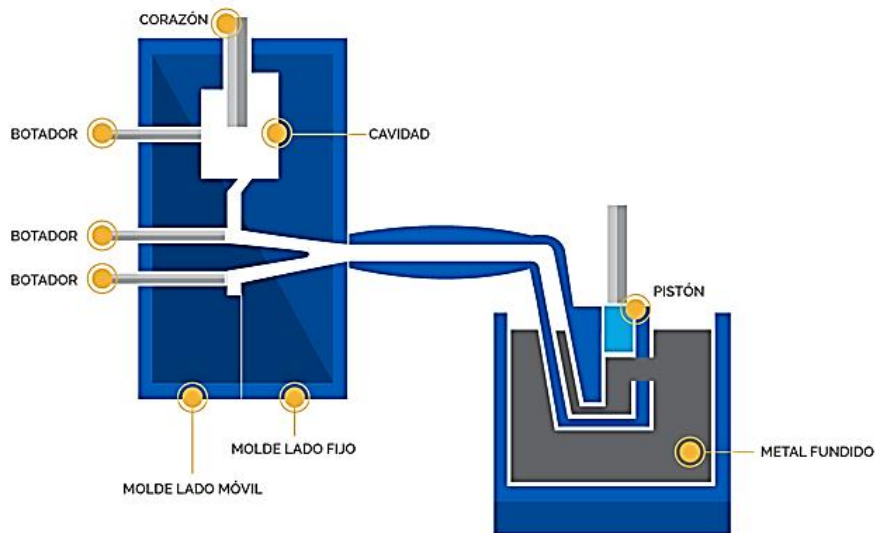


Figura 2.16. EL molde se cierra y el pistón se eleva, abriendo el puerto, lo que permite que el metal fundido llene el cilindro.

A continuación, el pistón sella el puerto, empuja el metal fundido a través del cuello de ganso y la boquilla hacia la cavidad de la inyección donde se mantiene bajo presión hasta que se solidifica, figura 2.17.

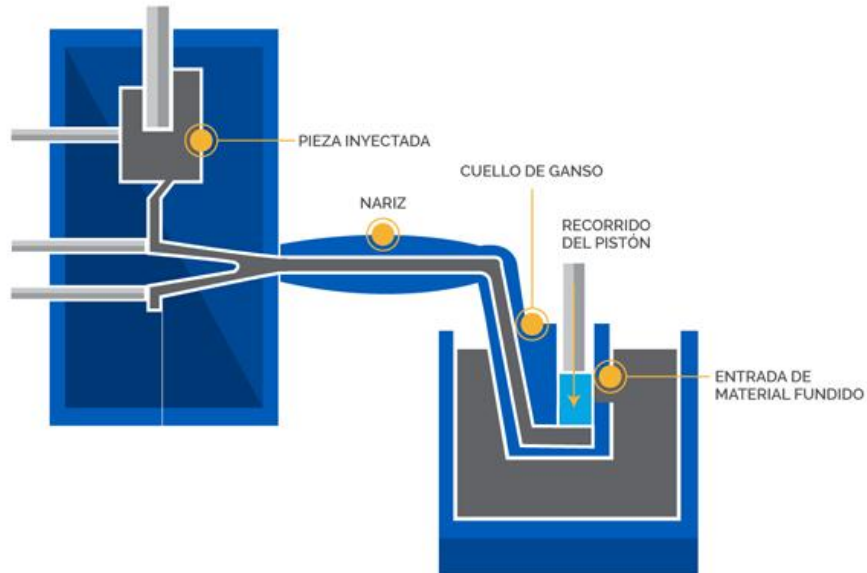


Figura 2.17.

El molde se abre y los corazones, si los hay, se retraen. La pieza fundida se mantiene en una sola mitad del molde, en el lado de expulsión. El pistón vuelve, permitiendo que el metal fundido residual fluya de nuevo a través de la boquilla y el cuello de ganso, figura 2.18.

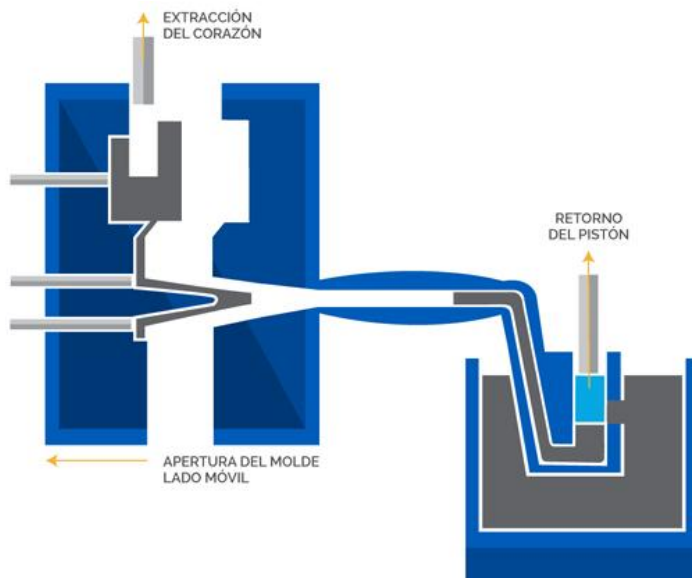


Figura 2.18.

Los botadores empujan la pieza fundida fuera del molde. A medida que el pistón descubre el orificio de llenado, el metal fundido fluye a través de la entrada para rellenar el cuello de ganso, figura 2.19.

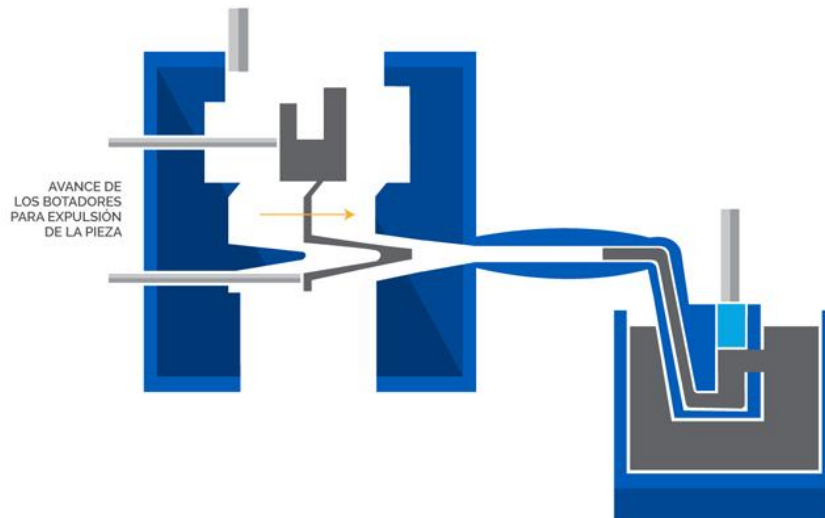


Figura 2.19.

2.13. Fundición centrífuga

Como su nombre lo dice, la fundición centrífuga utiliza la fuerza de la inercia causada por la rotación para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde. Este método fue sugerido por primera vez a principios de los años 1800. Existen tres tipos de fundición centrífuga: la fundición centrífuga verdadera, la fundición semicentrífuga y el centrifugado.

a) Fundición centrífuga verdadera. En la fundición centrífuga verdadera, se produce piezas cilíndricas, como tuberías, cañones de armas, y postes telefónicos, mediante las técnicas que se muestran en la figura 2.20, en donde el metal fundido es vaciando en un molde rotativo. El eje de la rotación es por lo general el horizontal, pero puede ser vertical para piezas cortas. Los moldes están hechos de acero, hierro

o grafito y pueden estar recubiertos con una capa refractaria para incrementar la vida del molde.

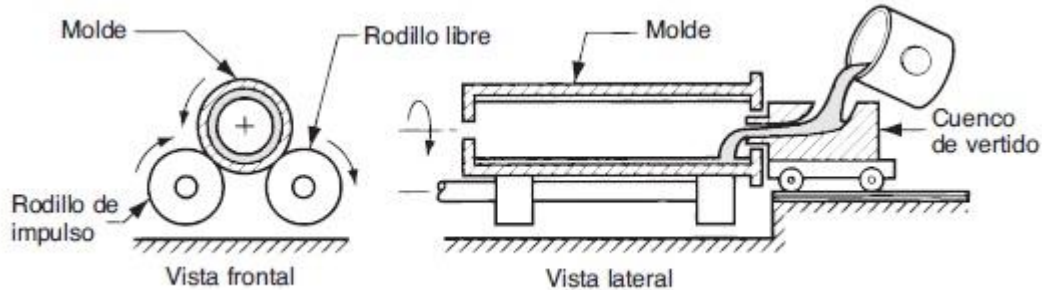


Figura 2.20. *Proceso de fundición centrífuga. Las tuberías, las camisas de cilindro y piezas de forma similar se pueden fundir mediante este proceso. (Kalpakjian, 2002)*

Las superficies del molde se pueden modificar de tal manera que se puedan fundir tuberías con formas exteriores diversas, incluyendo cuadradas y poligonales. La superficie interna de la colada se conserva cilíndricamente por que el metal fundido es distribuido de manera uniforme por las fuerzas centrifugas. Sin embargo, debido a diferencias de densidad, los elementos más ligeros como la escoria, impurezas y partes del revestimiento refractario tienden a acumularse en la superficie interna de la pieza fundida.

b) Fundición semicentrífuga: un ejemplo de la fundición semicentrífuga se muestra en la figura 2.21a. Este método se utiliza para colocar piezas con simetría rotacional como por ejemplo una rueda con sus rayos.

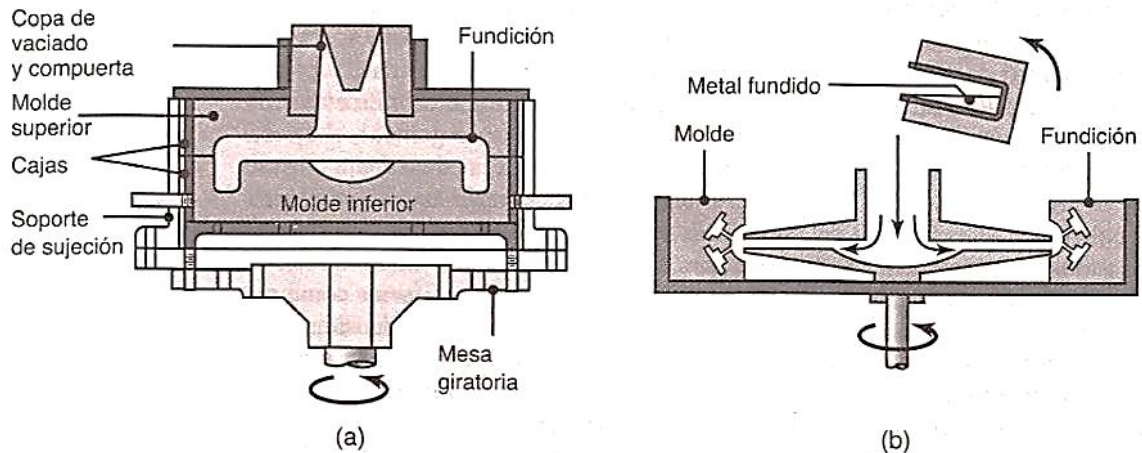


Figura 2.21. a) ilustración esquemática del proceso de fundición semicentrífuga. Con este proceso se pueden fundir ruedas con rayos. b) ilustración esquemática del colado por centrifugado. Los moldes se colocan en la periferia de máquina, y se obliga al metal fundido a entrar en los moldes por la fuerza centrífuga. (Kalpakjian, 2002)

2.14. Tipos de defectos de fundición

La fundición de arena es un proceso eficiente y económico para producir componentes y formas geométricamente complejos utilizando moldes no reutilizables. Es un método eficiente y rentable que a menudo está plagado de defectos cuando se hace incorrectamente, al igual que con cualquier otro proceso de fabricación. Sus defectos se llaman defectos de fundición.

Los defectos de fundición son características que crean una imperfección o deficiencia a la especificación de calidad establecida por el requisito de servicio y el diseño. Por lo general, son causadas por imperfecciones en el proceso de fundición de arena y arena utilizada para la preparación de moho.

A continuación, se presentan algunos de los defectos de fundición comunes en el proceso de fundición de arena.

Los defectos de fundición son numerosos, y puesto que cada uno puede ser provocado por muchas causas, se comprende lo difícil que puede ser establecer una clasificación satisfactoria. Se distinguen, ante todo, entre los defectos advertibles desde el exterior de la pieza y los defectos sólo advertibles por el examen del interior de la misma.

Los defectos manifiestos de la pieza pueden afectar:

- 1.- A la forma; como deformaciones, aplastamientos, hundimientos, empujes, rebabas y movimientos de las cajas.
- 2.- A la superficie; como aspecto basto, hinchazones, abombamientos, penetraciones, exfoliaciones, inclusiones de arena y dardas.
- 3.- Al conjunto de la pieza; como soldaduras e intermitencias, piezas no llenas y discontinuidades, arranques de partes del molde, escapes de metal, falta de metal, hendiduras, grietas y roturas.

Los defectos ocultos se manifiestan por:

- 1.- Soluciones internas de continuidad; como porosidades, pequeños agujeros, burbujas, sopladuras, rechupes, contracciones, meniscos, tensiones y grietas.
- 2.- Composición y estructura inadecuada; como temple difuso, temple localizado, temple inverso, estructura abierta o gruesa y segregaciones de grafito.
- 3.- Inclusiones de materias heterogéneas; como gotas frías, escoria, arena y negro.

En esta clasificación no se han mencionado algunos defectos, como los debidos a un proyecto equivocado de la pieza, o a errores de la construcción del modelo o de confección del molde. No se trata en estos casos de defectos de fundición verdaderos y propios, más bien de errores de ejecución, los cuales se deben obviar con la colaboración más estrecha entre el proyectista, el modelista y el fundidor, y con una bien estudiada serie de controles y verificaciones.

De los defectos catalogados, algunos son definidos por su misma denominación, otros requieren alguna aclaración más detallada.

Defectos del exterior de la pieza.

Las deformaciones de los alabeos manifiestan tensiones internas y pueden alcanzar valores capaces de provocar también hendiduras, roturas espontáneas o por solicitaciones externas e inclusiones de pequeño valor (fig. 9.1). Las deformaciones y alabeos se presentan de modo particular en las piezas extendidas en longitud o en superficie. Tales defectos de obstáculos encontrados por la contracción, de enfriamiento anisotérmico después de la solidificación, por causas intrínsecas en la pieza (figuras 2.22 y 2.23) o por causas externas (fig. 9.3).

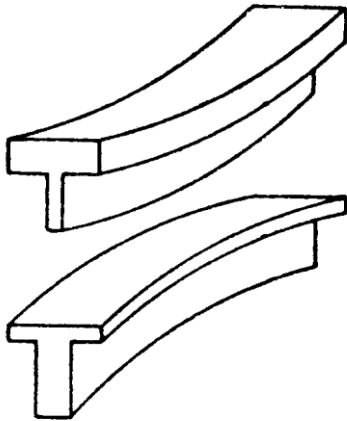


Figura 2.22. Deformación (encorvamiento) de los ejes de una pieza, causada por la heterogeneidad de los espesores, las piezas presentan la concavidad en la parte de mayor espesor.

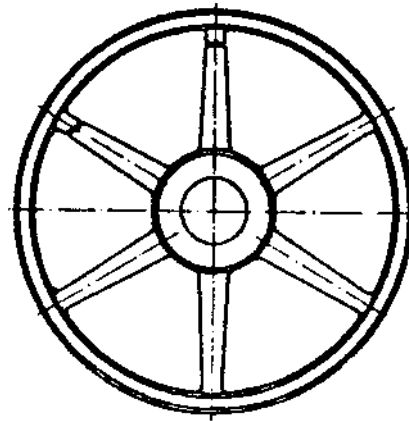
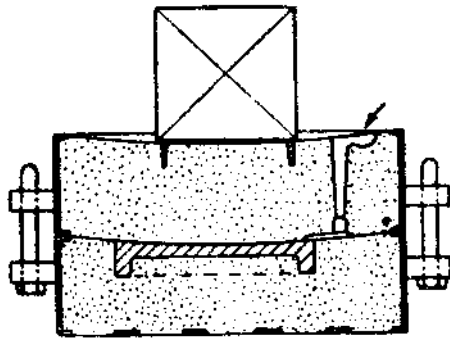


Figura 2.23. Agrietamiento y rotura de los radios de un volante causados por la excesiva diferencia de espesores entre cubo, corona y radios, y por la disposición radial en número par de estos

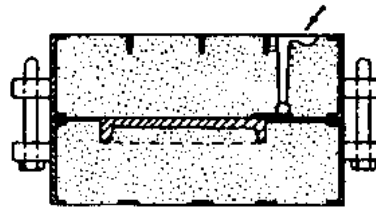
Los aplastamientos y los hundimientos consisten en la reducción del espesor de las piezas a causa del hundimiento de una parte del molde o del alma, o por la inflexión de la media caja superior por carga excesiva, etc. (figura. 2.24).

Los empujes y las rebarbas dependen del cierre imperfecto de las cajas en el acto de la colada (figura 2.25).



Reducción del espesor de una pieza, causada por hundimiento de la media caja superior, demasiado cargada.

Figura 2.24.

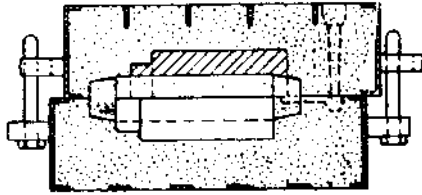


Aumento de espesor de una pieza y rebaba ocasionadas por el empuje metalostático no contrarrestado por una carga suficiente.

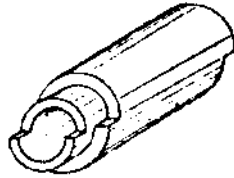
Figura 2.25

Los movimientos de la caja pueden ser motivados por varias causas. Si una pieza ocupa dos medias cajas, y éstas tienen los pernos o bulones de registro y sus respectivos agujeros deteriorados por el uso, puede ocurrir que la pieza resulte desviada, como indica la figura 2.26.

Son causas también de falta de registro los machos que tienen las entregas demasiado pequeñas en comparación con las portadas de moldeo o que no han sido fijados, según las reglas



Movimiento de la caja causado por el excesivo juego entre los pernos de registro y los agujeros de las orejas de la caja.



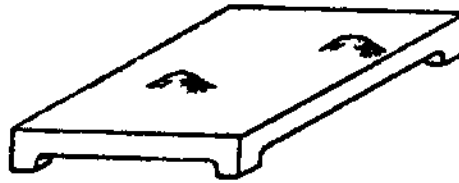
Desigualdad de espesor de un tubo a causa de la desviación del macho debido al empuje metalostático.

Figura 2.26.

Figura 2.27

El aspecto basto de la pieza se revela en su superficie que presenta un grado de tosquedad y de rugosidad mayores que el propio de un trabajo cuidadoso. Este defecto en las piezas en seco resulta de que la arena es poco refractaria, su grano es demasiado grueso, ha sido incompletamente secada, el grano es malo o de otras causas parecidas; en las piezas en verde deriva de la arena mal trabajada y de que el negro mineral no es adecuado. Otra causa es una temperatura de colada demasiado elevada. Puede haber una auténtica sinterización.

Las hinchazones son unos abultamientos locales redondeados que se forman cuando, por efecto de la presión metalostática, las paredes del molde no bien atacadas ceden en un punto cualquiera (figura 2.28). Los abombamientos son parecidos, menos levantados pero más extendidos.

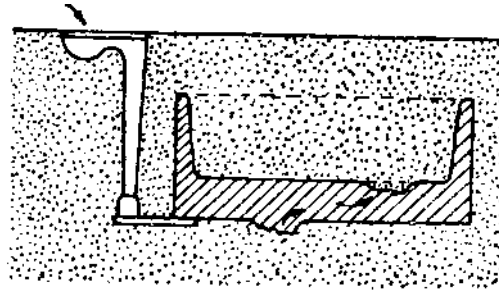


Hinchazones en un plano de fundición debidas a hundimiento de la arena de moldeo, mal atacada en la caja.

Figura 2.28.

Las penetraciones son causadas por un metal muy fluido que va a llenar los intersticios entre los gránulos de la arena de moldeo sin separarlos. Para evitar este defecto es preciso revisar el diseño de la pieza, el modelo, el molde, los elementos de colada, etc., a fin de evitar concentraciones de calor sobre las partes delgadas del molde y del macho, y asegurar un atacado uniforme y adecuado de la arena en todo punto del molde. En general, es suficiente reducir la temperatura de colada.

En las aleaciones de cobre, el defecto toma el nombre de embrozamiento. Para evitarlo, las arenas para fundición de bronce deben ser de grano más fino que el usado para hierro colado. Las exfoliaciones se forman, en general, en las proximidades de un terrón de arena atacada y por eso poco permeable. En el acto de la colada, los gases que se acumulan en la masa del molde provocan el desmoronamiento del terrón, el cual, si el metal está aún fluido, flota y va a posarse contra las paredes superiores del molde (figura 2.29). La pieza presenta después, por debajo, una protuberancia, y, por arriba, una inclusión de arena desprendida que no sale a la parte superior, sino que queda aprisionada en la pieza. A menudo la exfoliación está acompañada de sopladuras o burbujas.



Exfoliación: Un terrón de arena se desprende de la parte inferior (a causa de la escasa permeabilidad) y va a flotar contra la superficie superior del molde. La pieza presenta después abajo una protuberancia, y encima una cavidad con inclusiones de arena.

Figura 2.29.

Lágrimas calientes. Se trata de grietas con bordes irregulares causadas por tensiones de tracción desarrolladas durante la solidificación del material fundido colocado en el molde. Además, también puede ser causada por la discontinuidad en la fundición de metal, una ocurrencia trazada a una contracción obstaculizada que ocurre justo después de la solidificación de los metales.

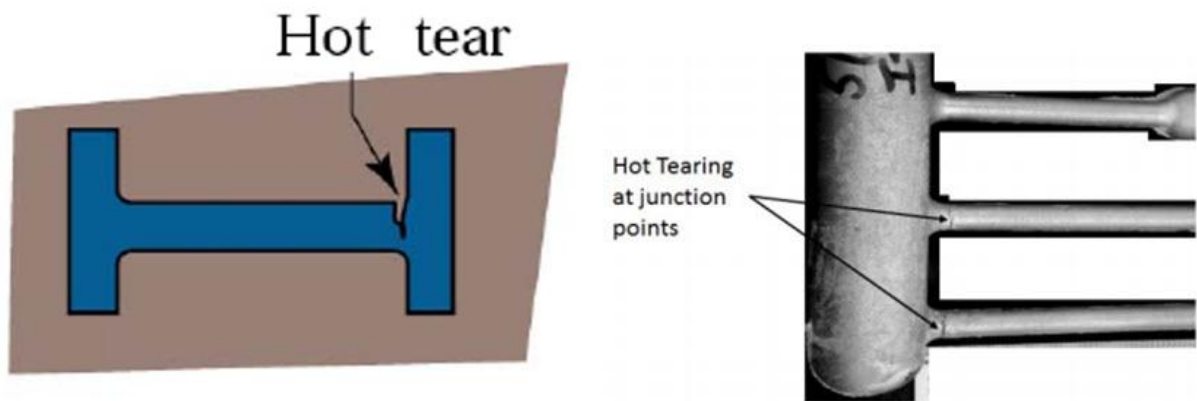


Figura 2.30. Defecto de fundición de lágrima caliente (hot tears)

En algunos casos, se ha identificado como posibles causas el exceso de dureza del molde causado por la embestida, controles metalúrgicos y de temperatura de

vertido inadecuados, suministro de filetes o soportes insuficientes en las uniones de secciones y alta resistencia al seco y caliente.

La darta es una batidura delgada de metal en la parte separada de la pieza y unida con el resto de la misma por una lengua de metal llamada grapa. Es causada por la escasa permeabilidad; los gases levantan una costra de arena, pero sin separarla, de la costra misma (figura 2.31). Hay una dilatación del techo del molde que, si es muy duro, puede quedar impedida y se resquebraja.



Figura 2.31. Darta en una pieza fundida

Cierre en frío

Este defecto aparece como una línea de unión recta en la superficie del material fundido cuando el hierro fundido se vierte en el molde desde dos puertas, y ambas corrientes de metal fundido se encuentran en un punto con bajas temperaturas. No se fusionan y por lo tanto crean un cierre frío en este cruce. Es este cierre frío que aparece como una grieta con un borde redondo en la superficie del yeso.

defecto de fundición de cierre frío

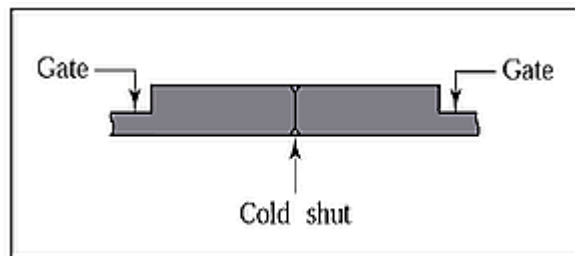


Figura 2.32. Cierre en frío

El cierre en frío es causado por temperaturas de fusión poco profundas, un sistema de medición deficiente y una menor fluidez en el hierro fundido.

Para eliminar estos defectos, se debe adoptar la temperatura óptima de vertido y un sistema de medición adecuado.

Defectos en el interior de la pieza.

Los defectos que sólo pueden descubrirse penetrando bajo la superficie de la pieza son los más dañinos, porque, no pudiendo, en general, ser reconocidos desde el exterior por los medios normales, no salen a la luz hasta que se procede al mecanizado, al someter la pieza a la prueba de presión, o bien, aún peor, cuando, ya aplicada a su trabajo, cede a las sollicitaciones externas y se rompe.

Sopladuras.

Este defecto es una cavidad de gas en forma de pelota causada por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la fundición o cerca ella. La baja permeabilidad, pobre ventilación y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas generales.

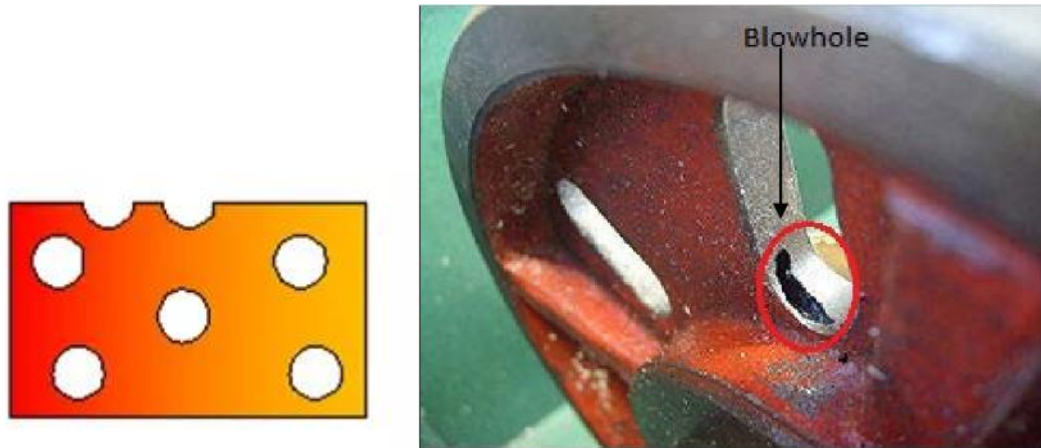


Figura 2.33. Orificios de soplado.

Puntos de alfiler.

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

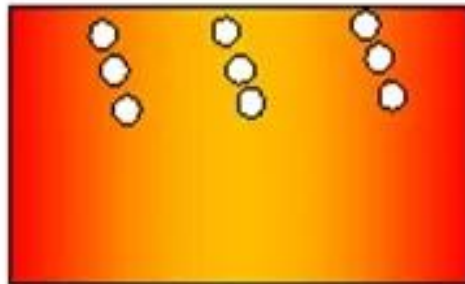
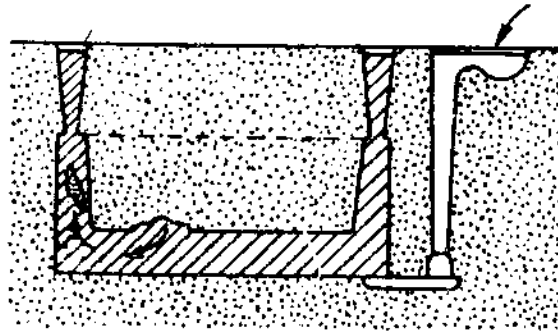


Figura 2.34. Puntas de alfiler

Las inclusiones de arena, que se desprende de la superficie superior del molde y va a caer abajo, de donde luego puede ser arrastrada a puntos más altos del molde. El inconveniente sobreviene antes de la colada, también para hechos mecánicos externos, o en el momento de fundir, mientras el metal entra en el molde (figura 2.35).



Otro defecto análogo a los precedentes: el terrón se desprende de una pared superior y, arrastrado por el metal, permanece aprisionado en una nervadura.

Figura 2.35.

Inclusiones de escorias. Este defecto es causado cuando el metal fundido contiene partículas de escoria y se cuela en el molde, quedando atrapadas en el metal solidificado.



Figura 2.36. Escorias atrapadas en la pieza

CAPITULO 3

FORJA.

La forja o el forjado es probablemente el método más antiguo de formado de materiales, se practica cuando menos desde 4000 a.C. y quizá desde 8000 a.C. Se uso primero para fabricar joyas, monedas y distintos implementos de trabajo; martillando el metal con herramientas de piedra.

Es también uno de los primeros, y más importantes procesos de compresión indirecta. Es un proceso en el que la pieza se conforma mediante la aplicación sucesiva de esfuerzos de compresión que exceden la resistencia a la fluencia del metal, aplicados a través de dados o matrices y herramientas.

Se pueden hacer operaciones sencillas de forja con un marro de mano, o maceta, y un yunque, como lo siguen haciendo los herreros de forma tradicional. Sin embargo, la mayor parte de las forjas requieren un conjunto de matrices y equipos como prensas o martinets. A diferencia de las operaciones de laminado que producen placas y perfiles, la forja produce productos o piezas .



Figura 3.1 Forja manual, es la forja tradicional que se hace desde la antigüedad, donde se usa la fuerza manual, el mazo y el yunque para lograr la deformación de materiales metálicos calientes.

Entre los productos característicos del forjado están los tornillos y remaches, bielas, ejes de turbinas, engranajes, herramientas de mano y piezas estructurales de maquinaria para aviones, ferrocarriles y demás equipos de transporte.

3.1. Definición de forja

Es un método de manufactura de piezas metálicas, que consiste en la deformación plástica de un metal, ocasionada por esfuerzos impuestos sobre él, mediante martillos o prensas. En el proceso, el metal fluye en la dirección de menor resistencia, así que generalmente ocurrirá un alargamiento lateral a menos que se le contenga.

3.2. Clasificación

La forja se lleva a cabo de diversas maneras. Algunas formas de clasificar las operaciones de forja es de acuerdo a:

- *La temperatura de trabajo.*
- *La forma en que se aplica la presión.*
- *La restricción de las matrices al flujo del metal.*

Temperatura de trabajo

Las operaciones de forja se pueden realizar en caliente o en frío. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, la forja en frío también es muy común para ciertos productos. La ventaja de la forja en frío es la mayor resistencia del componente que resulta del endurecimiento por deformación.

Forma en que se aplica la presión

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

Restricción de las matrices al flujo del metal

Quizá es la clasificación más importante que se puede hacer para las operaciones de forja. Atendiendo a esta clasificación se pueden distinguir dos amplios grupos para las operaciones de forja:

- a) Forja en matriz abierta.
- b) Forja en matriz cerrada.

En la forja en matriz abierta el trabajo se comprime entre dos dados planos(o casi planos), permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies del dado. En la forja en matriz cerrada, las superficies del dado contienen una forma o impresión que se imparte al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo del metal. En este tipo de operación el metal fluye más allá del dado impresor formando una rebaba. La rebaba es un exceso de metal que debe recortarse más tarde.

3.3. Forjado a dado abierto

Es el proceso más sencillo de esta clase. Las piezas forjadas por este tipo de proceso pesan ente 15 a 500 kg, aunque se han forjado piezas de hasta 300 toneladas. Los tamaños pueden variar desde unos tantos centímetros hasta piezas de 23 metros como son los ejes de las hélices de un barco. El material se comprime entre dos

planos permitiendo que el material fluya sin restricción en sus caras laterales. Este proceso se conoce como recalado o forjado con dado plano. La superficie de la cara del dado plano puede tener cavidades para producir forjas sencillas.

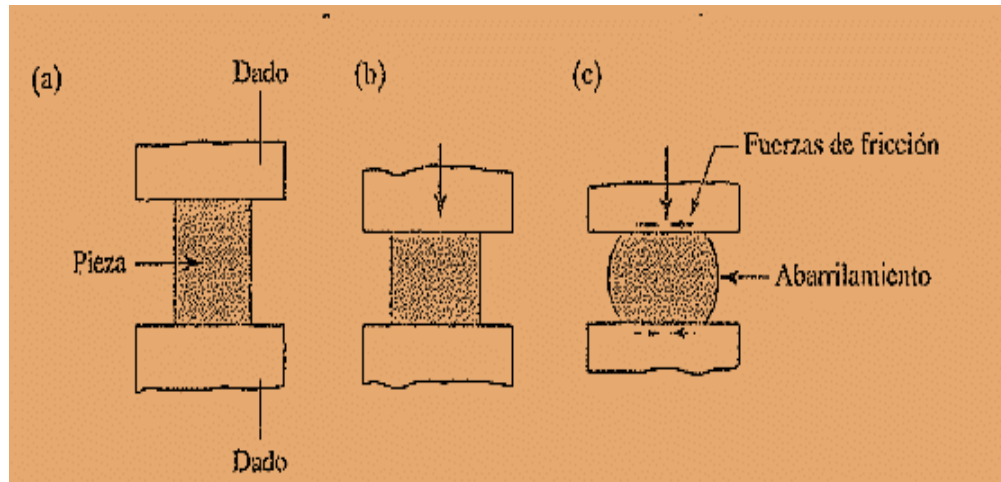


Figura 3.2. (a) Cilindro comprimido entre dos dados planos. (b) Deformación uniforme del material sin fricción. (c) Deformación con fricción. Obsérvese el abarilamiento del cilindro causado por las fuerza de fricción en las interfaces de la preforma y la matriz.

El desbaste (doing out) es principalmente una operación de forjado en dado abierto en la que se reduce el espesor de una barra en pasos sucesivos de forjado en intervalos específicos. Como el área de impacto por golpes es pequeña, se puede reducir el espesor de una pieza larga de una barra sin necesidad de grandes fuerzas ni gran maquinaria. Los herreros hacen estas operaciones don mazo y yunque, con piezas calientes de metal.

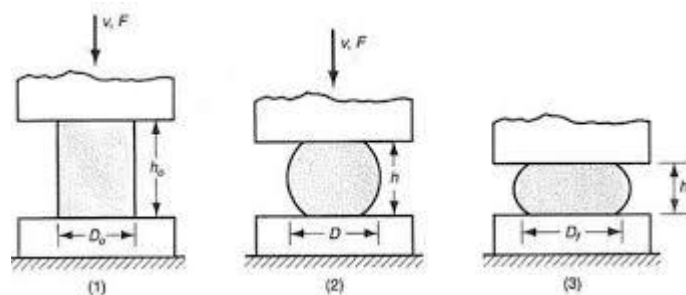


Figura 3.3. Dos vistas de la operación de desbaste de una barra rectangular. Los herreros usan este proceso para reducir el espesor de una barra, martillando la pieza sobre un yunque. Obsérvese el abarilamiento de la pieza.

3.3.1. Fuerza de forjado.

La fuerza de forjado que se aplica sobre una barra cilíndrica se puede expresar con la ecuación siguiente:

$$F = \sigma_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3h} \right) \dots \dots (3.1)$$

Dónde:

- σ_f es el esfuerzo de fluencia del material,
- μ es el coeficiente de fricción,
- r y h son el radio y la altura de la pieza, respectivamente.

Ejemplo:

Una preforma maciza de acero inoxidable 304 tiene 150 mm de diámetro y 100 mm de alto. Su altura se reduce a 50% a temperatura ambiente, mediante forjado con matrices planas y abiertas. Suponiendo que el coeficiente de fricción es de 0.2, calcule la fuerza de forjado final.

$$(\pi)(r)^2(h) = \pi * r * 50$$

En consecuencia, $r=106\text{mm}$.

La cantidad ϵ_f es el valor absoluto de la deformación unitaria que ha sufrido la pieza:

$$\epsilon = \ln \frac{100}{50} = 0.69$$

Sustituyendo los valores en la ecuación para el cálculo de la fuerza de forja, tenemos:

$$F = (1000)(10^6)(\pi)(0.106)^2 + \frac{(2)(0.2)(0.106)}{(3)(0.050)}$$

$$F = 4.5 \times 10^7 N = 45MN$$

Aplicaciones de la forja en matriz abierta

La forja en matriz abierta es un proceso industrial importante. Las formas generadas por operaciones en matriz abierta son simples, como flechas, discos y anillos. Los dados en algunas aplicaciones tienen superficies con ligeros contornos que ayudan a formar el material de trabajo. Éste, además, debe manipularse frecuentemente (girándolo en cada paso, por ejemplo) para efectuar los cambios de forma requeridos. La habilidad del operador es un factor importante para el éxito de estas operaciones. Un ejemplo de forjado en dado abierto en la industria del acero es el formado de grandes lingotes cuadrados para convertirlos en secciones redondas. Las operaciones de forja en dado abierto producen formas rudimentarias que necesitan operaciones posteriores para refinar las partes a sus dimensiones y geometría final. Una contribución importante de la forja en caliente en dado abierto es la creación de un flujo de granos y de una estructura metalúrgica favorables en el metal.

Las operaciones clasificadas en la categoría de dado abierto son operaciones relacionadas y pueden realizarse con dados convexos, con dados cóncavos y por secciones, como se ilustran en la figura 3.4.

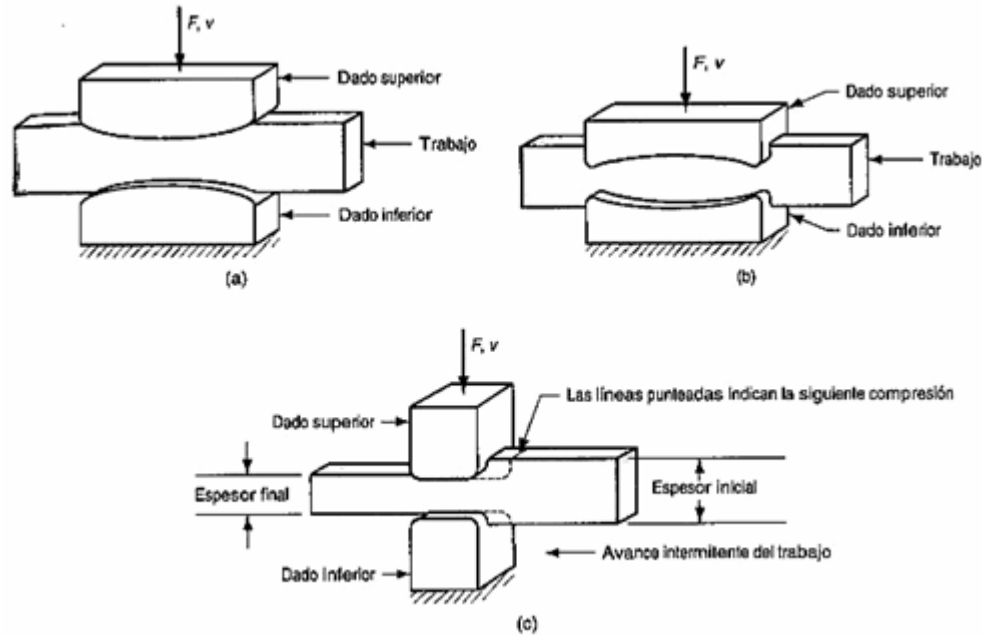


Figura 3.4. *Varias operaciones de forjado en dado abierto: (a) con dados convexos, (b) con dados cóncavos y (c) por secciones.*

La forja con dados convexos es una operación que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una parte de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. Se realiza con dados de superficies convexas. Las cavidades del dado para forjado con dados convexos se diseñan frecuentemente con múltiples cavidades de impresión de manera que la barra inicial pueda formarse toscamente antes del formado final. La forja con dados cóncavos es similar al anterior, excepto que los dados tienen superficies cóncavas.

Una operación de forjado por secciones consiste en una secuencia de compresiones forjadas a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la industria siderúrgica para producir lupias y planchas a partir de lingotes fundidos, en la operación se utilizan dados abiertos con

superficies planas o con un contorno ligero. Con frecuencia se usa el término forja incremental para este proceso.

3.4. Forja en matriz cerrada

En una variante del proceso la forma se obtiene llenando la cavidad definida por las mitades superior e inferior de la matriz. Se permite que el exceso de material escape en forma de rebaba; como la matriz no está por completo cerrada, se llama adecuadamente matriz de impresión. No obstante, también se aplica el término matriz cerrada.

3.4.1. Secuencia de forjado

La pieza de trabajo inicial se muestra como una parte cilíndrica similar a las de las operaciones en dado abierto. Al cerrarse el dado y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del dado y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas del dado, como se ilustra en la figura 3.5.

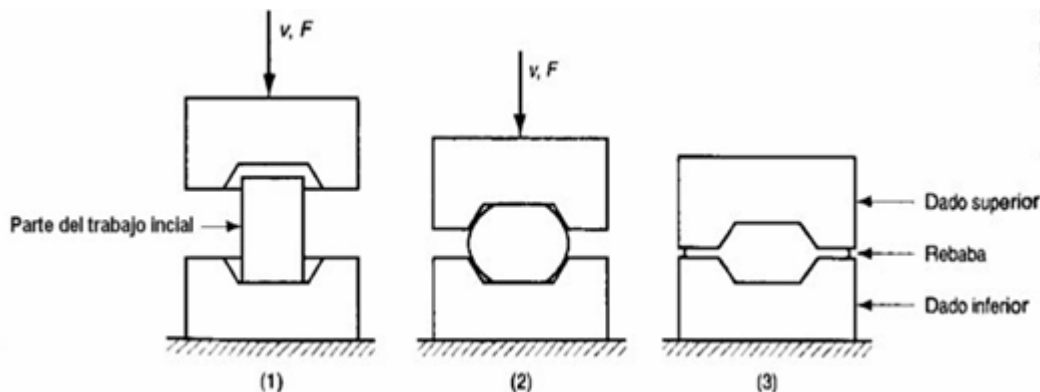


Figura 3.5. Secuencia en el forjado con matriz cerrada: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, (2) compresión parcial y (3) cerradura final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del dado.

Aunque la rebaba se recorta posteriormente, tiene realmente una función importante en la forja con dado cerrado, ya que cuando ésta empieza a formarse, la

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

Con frecuencia se requieren varios pasos de formado en el forjado con dado cerrado para transformar el material de inicio en la forma final deseada. Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la parte de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida en las etapas siguientes. Los últimos pasos le dan el acabado a la pieza final. En la figura 3.6 se muestra un dado con varios pasos de formado y la pieza producida mediante el mismo.

La pieza se prepara para forjarse con los procesos siguientes:

- a) Corte o recorte de una barra extruida o estirada.
- b) Operaciones de pre conformado (Metalurgia de polvos)
- c) Fundido
- d) Forjado previo

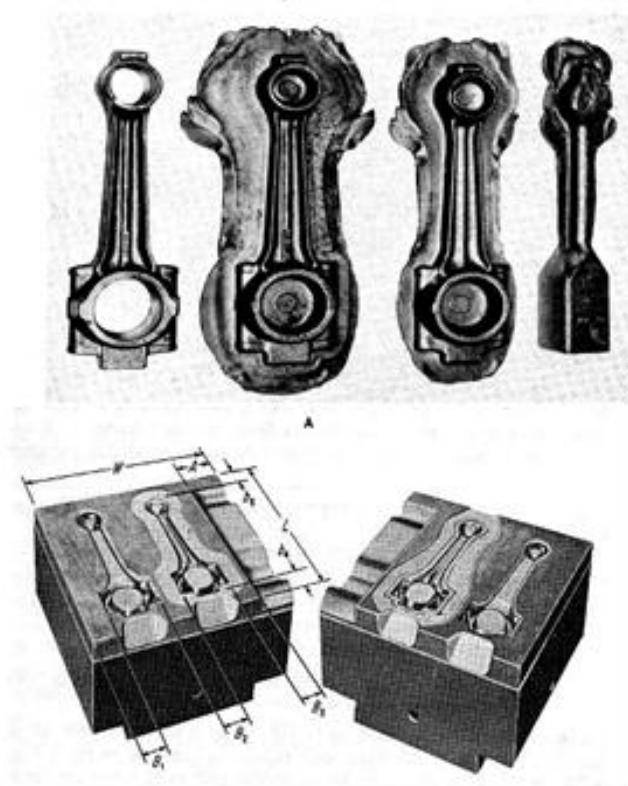


Figura 3.6. (a) Etapas de forjado de una biela para motor de combustión interna. Obsérvese la cantidad de rebaba para asegurar el buen llenado de dado,

3.4.2. Aplicaciones de la forja en matriz cerrada

Los mejoramientos de la tecnología de la forja con dado cerrado han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de aguzamiento en los dados, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de concesiones al maquinado, en la figura 6.6 se muestra la diversidad de piezas que se pueden producir mediante forja con dado cerrado.

3.5. Forjado de precisión

Con el fin de ahorrar materiales y costos, se han innovado los métodos de forja, por lo cual se intentan eliminar los procesos de preformado, pero con el defecto de que

la maquinaria se vuelve más precisa. Las operaciones de preformado en que la pieza se obtiene con las dimensiones casi iguales a la de la forja terminal, se conocen como operaciones de forja casi neta o de forja neta.

En el forjado de precisión se usan dados especiales que producen piezas con mayores precisiones por lo que requieren mayores fuerzas, pero si el forjado no precisa de detalles minuciosos este es uno de los mejores procedimientos pues la temperatura a la que se realiza este proceso es a temperatura ambiente.

Regularmente se forjan piezas de aluminio y acero tales como engranes, bielas, cajas de velocidades y alabes de turbinas.

En el forjado de precisión se requieren dados especiales y más complicados, pues se requieren establecer las medidas específicas y ultimas del producto a forjar. Cabe resaltar que el material se aprovecha al máximo con este proceso, ya que el maquinado posterior a la forja es casi mínimo.



Figura 3.7. Aplicaciones de la forja en matriz cerrada.

3.6. Características de los procesos de forjado:

A continuación, se mencionan algunas características del proceso de forja:

Proceso	Ventajas	Limitaciones
<i>Dado abierto</i>	<i>Dados sencillos y poco costosos; útil para pequeñas cantidades de material; amplia gama de tamaños disponibles; buenas características de resistencia</i>	<i>Limitado a formas sencillas; difícil mantener tolerancias estrechas; necesario el maquinado de la forma final; poca capacidad de producción; utilización mala del material (rebaba); requiere destreza del operador.</i>
<i>Dado cerrado</i>	<i>Utilización relativamente buena del material, en general mayores propiedades; buena precisión dimensional; gran capacidad de productividad; buena reproductividad</i>	<i>Gran costo de los dados; maquinado necesario para el producto final.</i>
<i>Bloqueador</i>	<i>Bajos costos de dado; grandes capacidades de producción</i>	<i>Necesario maquinar para llegar a la forma final, son necesarias bridas y almas grandes.</i>
<i>Tipo convencional</i>	<i>Requiere mucho menos maquinado en comparación con el bloqueador; grandes capacidades de producción; buena utilización del material</i>	<i>Costos mayores de las matrices.</i>
<i>De precisión</i>	<i>Tolerancias cerradas; es menos frecuente el uso de maquinado; excelente utilización del material; es factible son almas y bridas delgadas</i>	<i>Requiere grandes fuerzas; dados intrincados; necesita de medios para separar la forja de los dados.</i>

3.7. Fuerza de forjado (Estampado)

La fuerza necesaria para producir una forja en el proceso de estampado se puede calcular mediante la fórmula:

$$F = k\sigma A \quad \dots\dots(3.2)$$

Donde k es el factor multiplicativo, obtenido de la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Intervalos de la constante k.

Intervalos de valores de k para la ecuación de fuerza de forjado.	
Formas sencillas, sin rebaba	3-5
Formas sencillas, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

σ_f es la resistencia a la fluencia a la temperatura de forjado, y

A es el área proyectada de la forja incluyendo la rebaba.

En operaciones de forjado en caliente la presión real del forjado para la mayor parte de los metales va de los 550MPa a los 1000MPa.

3.8. Comparación con otros procesos

Las ventajas de la forja sobre la fundición son:

- La deformación plástica elimina defectos internos.
- Mejor respuesta al tratamiento térmico.
- Adaptable a la demanda.
- Mayor resistencia

Las ventajas sobre la soldadura son:

- Producción más económica.
- Mayor resistencia y propiedades metalúrgicas.
- Producción simplificada.
- Ahorro de material.

Las desventajas con respecto a todos estos procesos son:

- Debe precalentarse el material.
- El diseño de los dados o estampas debe realizarse con cuidado.
- No es económico para la producción en cantidades pequeñas.
- La maquinaria es costosa.



Figura 3.8. Comparación esquemática de la disposición de la estructura granular en función del proceso

3.9. Forjabilidad

Se define forjabilidad como la capacidad de un material de sobrellevar una deformación sin romperse. Para cuantificarla se han desarrollado varias pruebas, aunque ninguna ha sido aceptada de forma universal. Una prueba es comprimir un espécimen cilíndrico sólido y observar el agrietamiento en las superficies embarriladas, mientras mayor sea la deformación antes del agrietamiento mejor será la forjabilidad.

Se pueden hacer distintas pruebas a temperaturas y velocidades de compresión distintas. Si la sensibilidad de un material a la muesca es grande, los defectos superficiales afectaran la prueba, al causar agrietamiento prematuro. Un defecto característico en estos procesos es la fisura de forja (sean), que puede ser una hilera de inclusiones, una rayadura longitudinal o pliegues introducidos en el material durante su fundición.

En la prueba de torcimiento en caliente, una probeta redonda se tuerce en forma continua y en la misma dirección, hasta que falla. La prueba se hace en varias probetas a distintas temperaturas, y se observa la cantidad de vueltas que soporta sin fallas. A continuación, se escoge la temperatura óptima de forjado. Esta es una prueba de utilidad en la selección de los aceros.

3.10. Metales utilizados para la forja en caliente

El trabajo en caliente de los metales, se efectúa arriba de la zona de recristalización. Para el acero, la recristalización comienza entre los 500 a los 700 °C; sin embargo se le trabaja a temperaturas superiores a esta zona. Algunos metales como el plomo y el estaño, tienen una zona baja de recristalización y se les puede trabajar en caliente o a la temperatura ambiente. Los metales que comúnmente se emplean en este proceso se muestran en la tabla 6.1 con su gama de temperaturas aproximadas de trabajo.

Tabla 3.2. Metales empleados en la forja en caliente

<i>MATERIAL</i>	<i>TEMPERATURA APROXIMADA EN °C</i>	<i>FACILIDAD DE FORJADO</i>
<i>Acero</i>	<i>1100 - 1260</i>	<i>1 a 2</i>
<i>Cobre y sus aleaciones</i>	<i>760 - 930</i>	<i>3</i>
<i>Magnesio y sus aleaciones</i>	<i>316</i>	<i>4</i>
<i>Aluminio y sus aleaciones</i>	<i>370 - 454</i>	<i>5</i>

La facilidad de forjado se refiere a la resistencia a la deformación del material y va del 1 (mayor facilidad) al 5 (menor facilidad).

3.11. Acuñado

El acuñado o acuñación es esencialmente un proceso de forja a dado cerrado, que se usa específicamente para producir monedas, medallones y joyería. La preforma se ubica en una cavidad completamente cerrada del dado. Para producir los detalles finos, las presiones necesarias pueden ser de 5 o 6 veces la resistencia del material. Este proceso también se usa en forjas y otros productos, para mejorar el acabado superficial impartir la precisión dimensional deseada. A este proceso, llamado dimensionamiento requiere de grandes presiones, haciendo que la forma de la pieza cambie poco a poco. El marcado de piezas con números y letras es un proceso parecido al de acuñado.

3.12. Equipo para forja

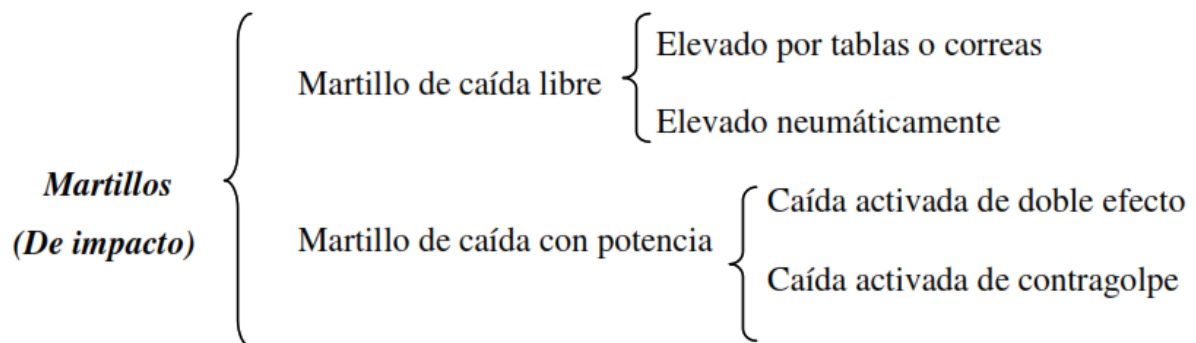
El equipo que se usa en el proceso de forjado consiste en máquinas de forja, que se clasifican en:

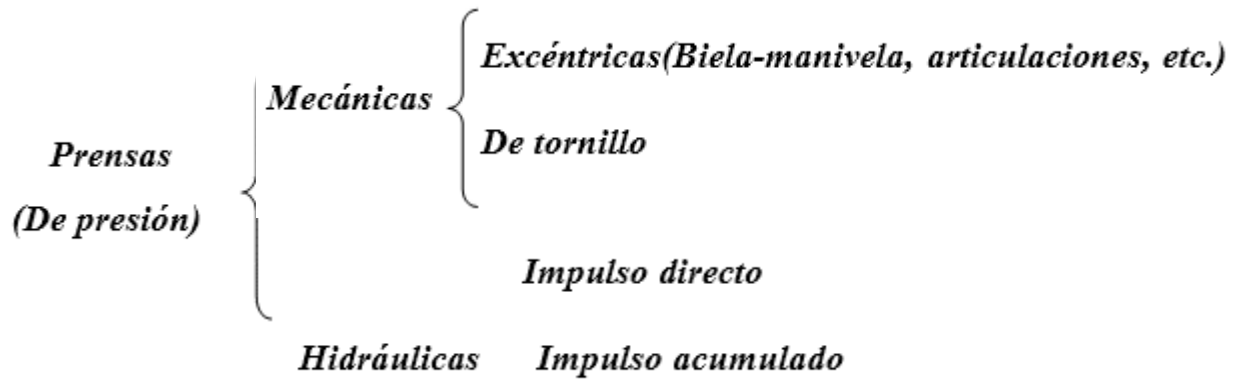
- *Martinetes* } Máquinas de
- *Prensas* } compresión
- *Dados de forjado*
- *Herramientas especiales (Hornos, dispositivos mecánicos, estaciones de recorte)*

3.12.1. Máquinas de compresión

Las máquinas de compresión utilizadas para la forja se pueden dividir en dos grupos: las que trabajan por impacto(martinetes) y las que trabajan por presión(prensas), en la tabla 6.2 se muestra una clasificación más amplia.

- *Martinetes* } Máquinas de
- *Prensas* } compresión
- *Dados de forjado*
- *Herramientas especiales (Hornos, dispositivos mecánicos, estaciones de recorte)*





3.13. Martillos

Su función es conformar el metal en caliente por medio de golpes sucesivos, producidos por la caída de un ariete, es decir, forma el material por medio de impactos, y se clasifican en la forma siguiente:

Martillo de caída libre elevado por tablas o correas.

En el primer caso consta de una tabla unida al ariete y colocada entre dos rodillos, uno de los cuales está girando impulsado por un motor, como se ve en la figura 3.9.

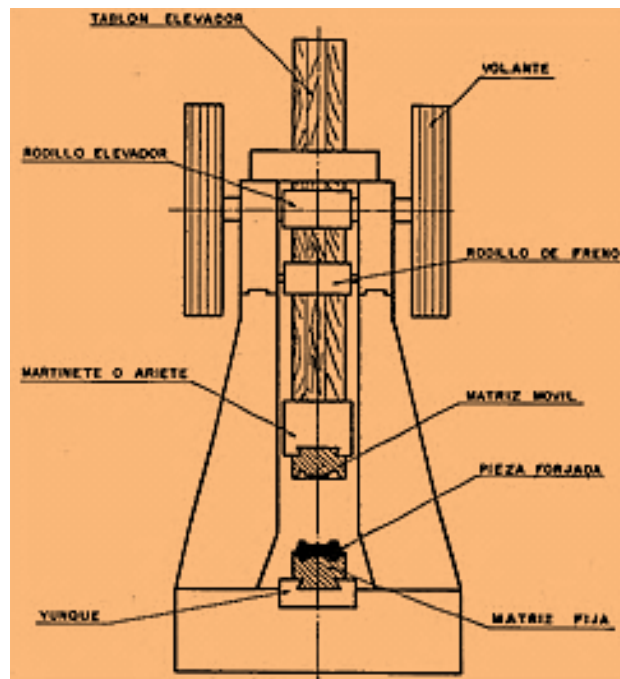


Figura 3.9. Martillo de caída libre elevado por tablas

Cuando el ariete llega hasta el punto más bajo de su carrera, el rodillo inmóvil prensa la tabla contra el móvil que por fricción eleva la tabla hasta una posición superior. Al llegar a esta posición, los rodillos se abren y una grapa se cierra, deteniendo la tabla hasta que se acciona un pedal y la deja caer de nuevo. La fuerza del impacto depende completamente del peso del ariete; los pesos más utilizados van de 227 a 2720 kg.

Los martillos elevados por correas son similares a los elevados por tablas, la diferencia básica es que en lugar de éstas, el ariete se eleva mediante correas que se enrollan por un motor situado en la parte superior.

Estos martillos tienen un peso de caída de 200 a 5000 kg; las medidas estándar fluctúan entre 500 y 2500 kg, en incrementos de 250 y 500 kg. La altura de caída del ariete varía con la medida del martillo, cambiando de 870 mm para un martillo de 200 kg hasta cerca de 1900 mm para uno de 3750 kg. La altura de caída y, por consiguiente, la fuerza de golpe del martillo, es aproximadamente constante para cierto trabajo y no puede alterarse sin parar la máquina y ajustar la longitud de caída.

Martillo de caída libre elevado neumáticamente. -

Es un martillo que deriva su fuerza de impacto de un martinete de caída libre. Sin embargo, se eleva mediante un cilindro de aire como se ve en la figura 3.10. Esto hace posible que la carrera sea rápida, sólo necesita mantenimiento en algunas de sus partes y permite seleccionar la longitud de la carrera. Los martillos neumáticos pueden realizar de 50 a 75 carreras por minuto, dependiendo de su tamaño.

Ofrecen la ventaja de una velocidad mayor, fácil manejo y, por tanto, un mayor rendimiento. También pueden estar provistos de un mecanismo automático por medio del cual, se obtiene la automatización en la subida y bajada del ariete.

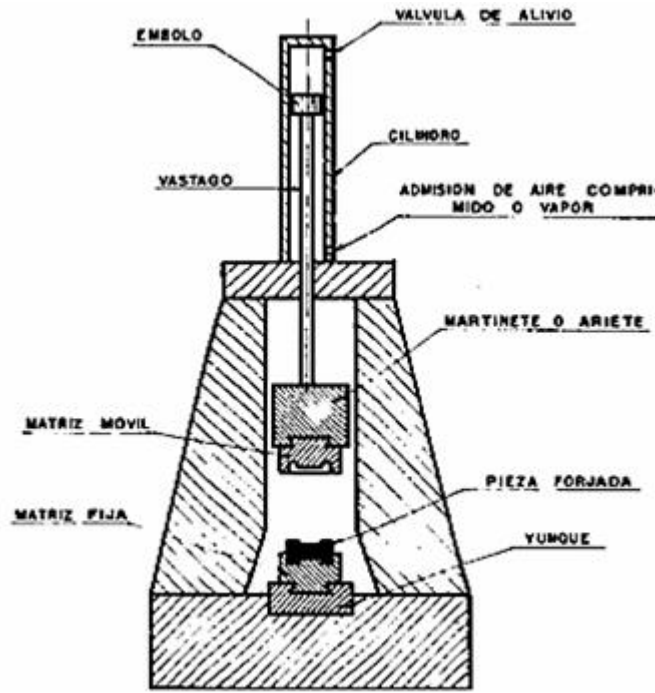


Figura 3.10. Martinete neumático (impacto por gravedad)

Martillos de caída con potencia.

En estos martillos la energía de golpe es la suma de la energía proporcionada por el peso del ariete o pilón, más la energía que se imprime a éste por algún medio. Se clasifican en martillos de doble efecto y de contragolpe.

Martillos de caída activada de doble efecto. Son el tipo de máquina de uso general para la producción de forja en matriz cerrada por impacto. Consiste de una base pesada que soporta los dos miembros del bastidor o armazón que guían con precisión el movimiento del ariete; el armazón soporta también un cilindro de aire que a través de un pistón y un vástago activa el ariete, en la figura 3.11. se muestra un martillo de este tipo. En la cara inferior del ariete va situado el dado superior. El dado inferior, está sujeto a la base o yunque que se encuentra firmemente

acuñado a la misma. El movimiento del pistón se controla mediante una válvula que admite aire a la parte superior o inferior del pistón. Esta válvula se controla con un pedal o una palanca de mano.

Los pesos para estos martillos son comunes entre los 300 y 1600 kg, y ocasionalmente llegan hasta los 25 000 kg. La gran masa de este tipo de martillos no está a la vista, ya que está bajo el piso. Un martillo de 25000 kg posee una base acero cuyo peso alcanza el medio millón de kilogramos. El ariete, el pistón y su vástago tendrán un peso agregado de 20000 kg aproximadamente. La velocidad del pistón durante la bajada sobrepasa en ocasiones los 7.5 m/s.

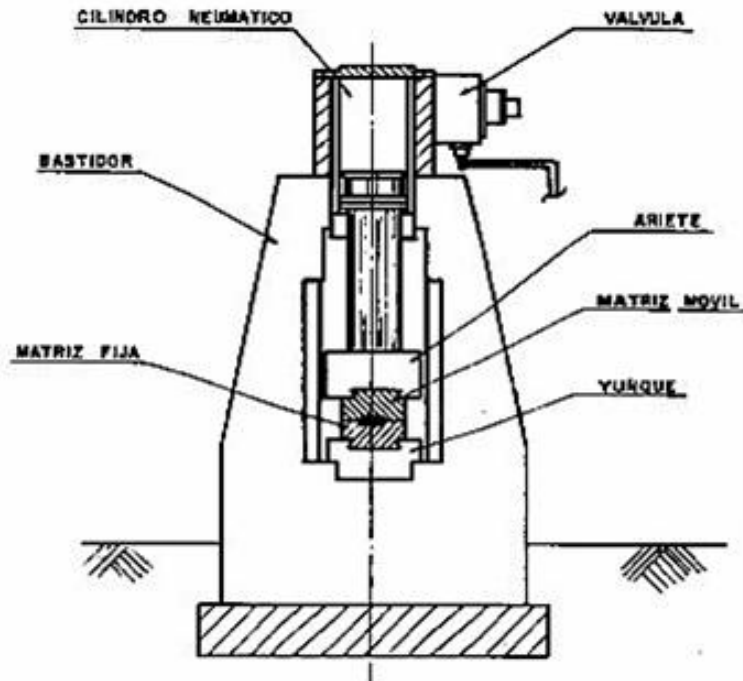


Figura 3.11. Martillo de caída activada de doble efecto

Aunque estos martillos son muy útiles, disipan en la base y los cimientos de un 15 a un 25% de la energía cinética desarrollada en el ariete. La energía transmitida impone un gran esfuerzo a la base, pudiendo romperla o causar daños en las instalaciones vecinas.

Martillo de caída activada de contragolpe.- Desarrollan la fuerza de golpe por el movimiento de dos arietes que simultáneamente se encuentran en direcciones opuestas y se encuentran en el centro. Estos martillos admiten vapor en un cilindro superior que acciona hacia abajo el ariete, al mismo tiempo los pistones conectados al ariete superior actúan a través de un sistema hidráulico para que el ariete inferior suba, en la figura 3.12. se muestra el martillo de contragolpe.

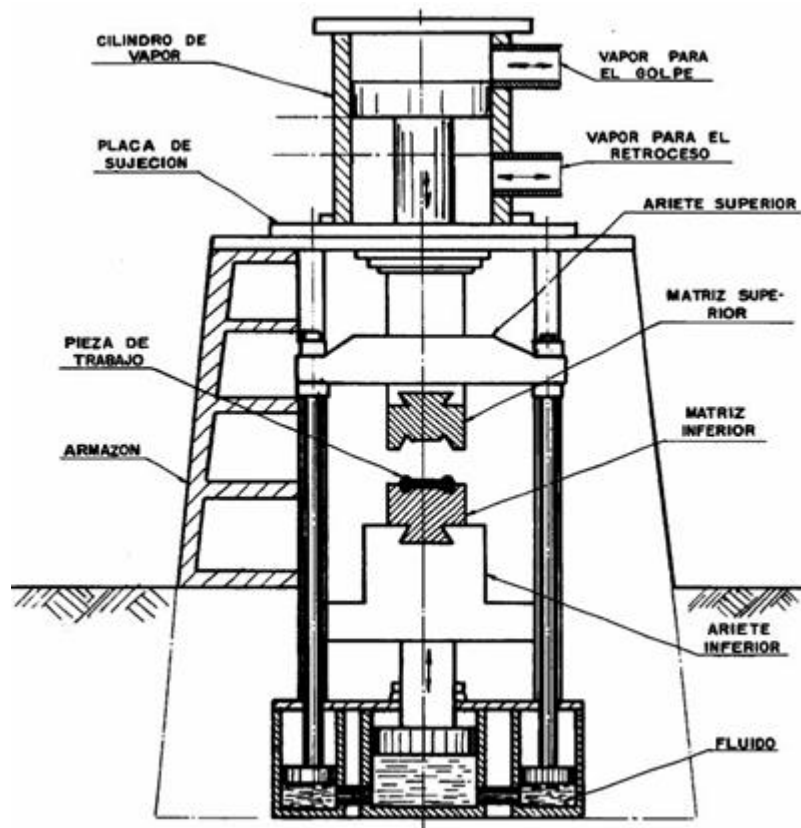


Figura 3.12. Martillo de caída activada de contragolpe

Debido a que el peso del ariete inferior y su pistón son mayores a los superiores, los arietes regresan automáticamente después del golpe. La velocidad de regreso se incrementa por la presión del vapor que actúa sobre el pistón.

3.14. Prensas

Funcionan en posición vertical al igual que el martinete, pero en lugar de impacto, imparten presión sobre la pieza. Generalmente tienen una maza o carro que se mueve en dirección vertical para presionar la pieza y llevar a cabo la deformación en contraste con los martillos, cuya característica es el golpeo repetitivo. A diferencia de los martillos, la energía es absorbida por la pieza de trabajo en un porcentaje mucho mayor, y las pérdidas se distribuyen por el bastidor en lugar de ir a la cimentación.

Estas prensas pueden costar dos veces más que un martillo de la misma capacidad, no obstante, son lo doble de rápidas. Pueden hacer lo mismo que un martillo, aunque a veces, debido a su acción de compresión, hacen mejor el trabajo con metales difíciles de forjar.

Estas máquinas se clasifican en:

Prensas mecánicas.

Constan de un bastidor o armazón que contiene en su base la fijación a los cimientos (mucho menos robustos que en los martillos), y el asiento del lado inferior.

Prensas mecánicas excéntricas. El impulso en la mayoría de estas máquinas, se basa en el mecanismo biela-manivela que transfiere movimiento circular en recíprocante, como en el motor de combustión interna. Un volante, como el que se ve en la figura 3.13, acumula energía que se usa sólo durante una pequeña parte de la revolución del eje excéntrico, o sea durante la deformación.

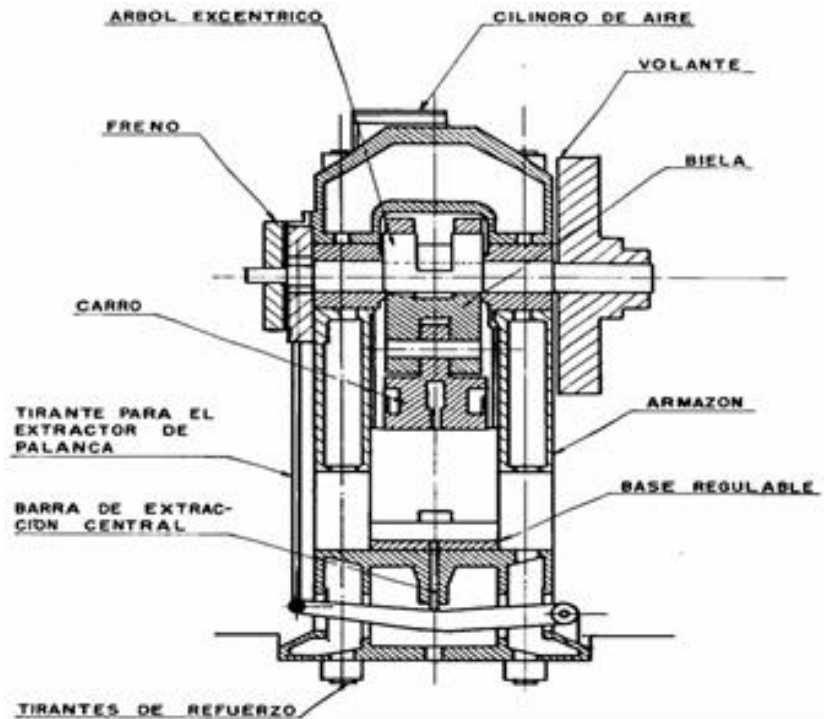


Figura 3.13. Prensa mecánica excéntrica

Prensas mecánicas de tornillo.- Al igual que los martillos y las prensas excéntricas, son máquinas ampliamente usadas en la industria de la forja. Se componen de un armazón de una sola pieza de acero fundido, que en su parte superior lleva un eje horizontal que contiene las ruedas de fricción accionadas por un motor eléctrico, en la figura 3.14 se muestra una prensa de este tipo.

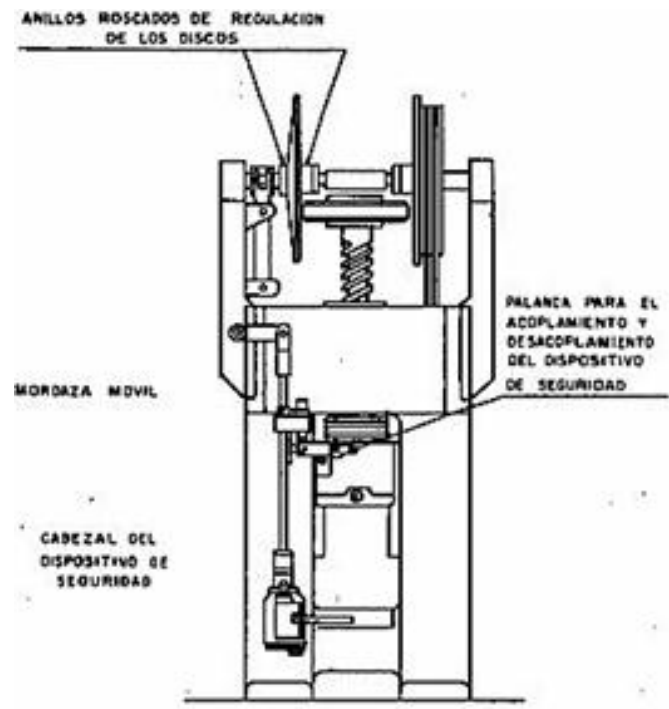


Figura 6.14. Prensa mecánica de tornillo

Perpendicularmente a las ruedas de fricción se encuentra localizado el volante de acero fundido, conectado a las mismas por un sistema de embrague controlado por un servomotor.

Cuando se accionan los controles, la rueda de fricción acelera el volante que tiene conectado a su vez el tornillo, fabricado de acero al molibdeno. El tornillo tiene acoplado en su parte inferior la maza que se acelera conforme va bajando, mientras que la energía cinética del volante continúa incrementándose.

Cuando la maza golpea la pieza, la carga necesaria de forjado se refuerza y se transmite a través de ésta, el tornillo y el yunque, a la armazón de la prensa.

Cuando toda la energía acumulada en el volante se ha usado en deformar la pieza y en deformaciones elásticas de la máquina, las piezas móviles se paran. En este momento, o un instante antes, el servomotor activa el eje horizontal y presiona la

otra rueda de fricción contra el volante, que junto con el tornillo se aceleran en dirección inversa y la maza es subida hasta su posición superior, terminándose así el ciclo.

Prensas hidráulicas.

Se clasifican en prensas de impulso directo, impulso acumulado y electro-óleo hidráulicas, en la figura 3.15 se muestra un ejemplar de una prensa hidráulica.

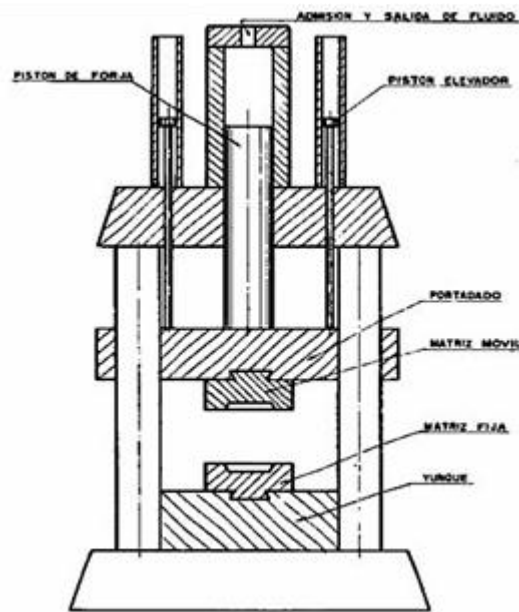


Figura 3.15. Prensa hidráulica vertical

Las características que corresponden a estas máquinas son:

Ya que la carga máxima se tiene durante el golpe, existe gran cantidad de energía para la deformación.

Dentro de la capacidad de las prensas hidráulicas, la carga máxima puede ser limitada para proteger la herramienta. En este caso, no es posible exceder este límite de carga, ya que la válvula de presión controla la presión del fluido actuando sobre el ariete

La velocidad del ariete puede variarse continuamente según se quiera durante el ciclo de golpeo.

Prensas hidráulicas de impulso directo.

Contienen aceite como medio de trabajo. El ariete superior cae por gravedad y el aceite es trasladado del tanque hacia el cilindro de la maza a través de la succión de esta caída libre, en prensas horizontales la maza se mueve con poca presión. En contacto con la pieza, la bomba sube la presión en el cilindro de la maza. Cuando la maza superior alcanza una posición determinada, o cuando la presión llega a un límite preestablecido, el fluido es liberado y retorna a la maza. La principal ventaja de las prensas horizontales es que se aprovecha mejor la energía del impacto, ya que las dos mazas se desplazan, como se ve en la figura 3.16, además no requieren cimentación especial.

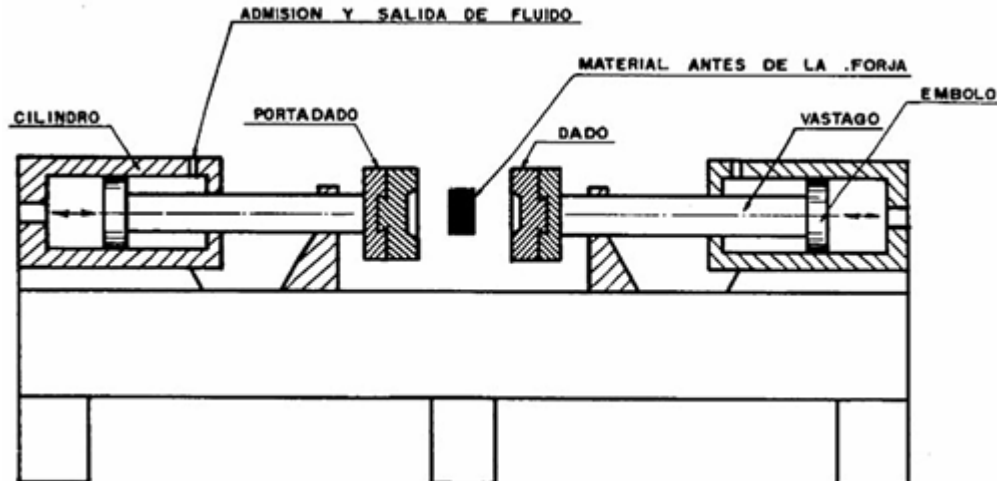


Figura 3.16 Forja con prensa horizontal

Prensas hidráulicas de impulso acumulado.

Normalmente tienen una emulsión de agua con aceite como medio de trabajo, usan acumuladores cargados de nitrógeno o aire para mantener el medio bajo presión. La secuencia de operaciones es similar a la de impulso directo, excepto que la presión se eleva por medio de los acumuladores.

Por consiguiente, el margen de penetración no depende directamente de las características de la bomba y puede variar dependiendo de la presión del acumulador, de la compresibilidad del medio y de la resistencia a la deformación de la pieza. Hacia el final del golpe, la carga disponible de la maza disminuye porque el medio de trabajo se expande conforme la deformación progresa.

Prensas electro-oleohidráulicas.

Sus características principales son: El bastidor de la prensa, compuesto de tablero, montantes y cabezal está unido en forma de marco rígido, mediante tirantes pretensados. El cabezal sirve a la vez como depósito de aceite, además todo el accionamiento hidráulico se halla por completo montado en él.

Debido a su construcción compacta, la máquina necesita poco espacio. La maza de la prensa se acciona por medio de una bomba de émbolo axial, con dirección de caudal variable o constante. La bomba está directamente acoplada a un motor especial. La inversión de marcha de la prensa en el punto inferior es iniciada por una corredera de mando, mientras que en el punto superior, para retener la maza se realiza el regreso desconectando la bomba a través de la corredera. Este sistema da breves tiempos de inversión a la vez que una carga reducida para la bomba. Se obtiene también un cambio de dirección exacto, libre de retraso, a la vez que una gran duración de todo el accionamiento hidráulico.

3.15. Ventajas y desventajas

A continuación se resumen las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de martillos y prensas, ya mencionados.

Martillos de caída libre

- Son máquinas de capacidad restringida, simples, de bajo costo y se usan para forjas que sólo pesan unos cuantos kilogramos.
- La altura de caída y, por tanto, la fuerza de golpe es constante; si se quiere variar, se debe parar la máquina y ajustarla.
- Poseen bastante exactitud en cuanto al movimiento del ariete.
- No requieren gran inversión en equipos auxiliares.

Martillos de caída activada

- La cantidad de energía está bajo el control del operador, ya que puede variar la altura de caída de cualquier golpe.
- Poseen bastante exactitud en cuanto al movimiento del ariete.
- Menor altura de recorrido, por lo tanto, funcionamiento más rápido, lo que proporciona un mayor número de golpes por minuto.
- Gastos de operación mayores e inversiones en equipos auxiliares.
- Ya que es más importante la cantidad de trabajo desarrollado por minuto que por golpe, poseen mejor rendimiento debido a su funcionamiento más rápido.

Martillos de contragolpe

- Dan gran rendimiento, ya que el trabajo desarrollado en el choque de los dos arietes se absorbe casi totalmente por pieza, habiendo pocas pérdidas en la cimentación.

- La cimentación resiente vibraciones mínimas, pudiendo construirse con un volumen 15% menor a los de otros tipos.
- El juego de los dos arietes al sumarse repercute en la precisión de las estampas.
- Como los dos arietes se mueven al mismo tiempo, la pieza no se puede acompañar por el operario para un forjado preciso.

Prensas mecánicas excéntricas

- Se encuentran en capacidades de 300 a 8000 ton.
- Desarrollan su fuerza máxima al final del golpe, con la que se obtiene una excelente precisión en el forjado de configuración difícil.
- Dan un gran número de golpes por minuto.
- No requieren de personal muy especializado.
- Se puede automatizar el proceso.

Prensas de fricción de tornillo

- No tienen un punto muerto inferior definido, con lo que se pueden repetir golpes sobre la misma estampa para obtener mayor precisión.
- Son máquinas ideales para operaciones de acuñación, estampado en caliente de aleaciones ligeras, y como máquinas complementarias del proceso de electrorrecalcado.

Prensas hidráulicas

- Desarrollan su fuerza máxima, tan pronto como los dados tocan la pieza de trabajo, continuando durante todo el proceso.

- Son las máquinas de forjado más lentas y, por tanto, el tiempo de contacto bajo carga es mayor y desgasta más los dados.
- Son empleadas generalmente en forja libre y punzonado.

3.16. Características técnicas

El proceso de forja aporta beneficios para las piezas producidas por este método de manufactura, entre otras cosas elimina defectos internos, mejora las propiedades mecánicas y ahorra tiempo y dinero. Sus características técnicas más sobresalientes se enumeran a continuación.

1. Integridad estructural. La forja elimina las bolsas de gas internas y otras inclusiones del metal, que podrían causar fallas no predecibles en piezas sometidas a esfuerzos o impactos elevados.

2. Alta resistencia y tenacidad. Mediante la orientación adecuada de las fibras del metal, la forja desarrolla la máxima resistencia posible al impacto y a la fatiga, dando además a la pieza la ductilidad necesaria para resistir fallas bajo impactos inesperados. En la figura 3.17 se muestra la orientación del flujo de grano para una pieza de metal forjado.

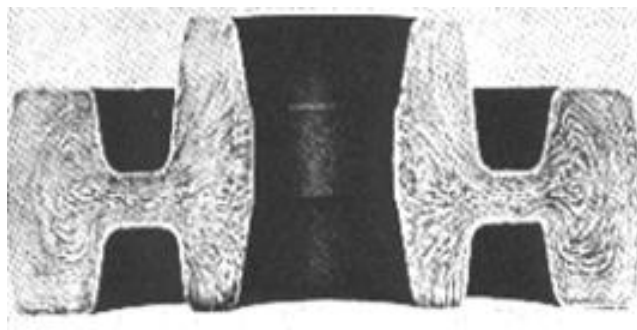


Figura 3.17. Configuración de las líneas de grano

3. Facilidad de configuración. Muchas de las piezas forjadas se pueden producir aproximadamente a la configuración final estipulada, reduciéndose a un mínimo la necesidad de un maquinado posterior.
4. Uniformidad de las piezas. Es posible obtener piezas que exhiban una amplia gama de propiedades fisicomecánicas, dependiendo de los materiales, aleaciones y tratamientos térmicos.
5. Ahorro de peso. La alta resistencia que puede ser desarrollada en las forjas por la adecuada orientación del flujo de fibras, refinamiento de la estructura cristalina y tratamiento térmico, les permite tener en muchas ocasiones un peso más reducido que las piezas fabricadas con otros procesos.
- 6) Economía. Mediante la forja, se pueden producir piezas de configuración geométrica muy complicada, que en otro caso se tendrían que elaborar mediante el ensamble de varias partes. Esto permite obtener un considerable ahorro en la producción al evitar costosas uniones de soldaduras, remaches, etc.

3.17. Fundamentos de diseño sobre el producto

Los fundamentos referentes al diseño del producto que se enunciarán a continuación, son aplicables a todos los metales forjables y sus aleaciones.

3.17.1. Línea de partición

Es el plano de partición entre el dado superior y el inferior de una matriz cerrada. Normalmente se ubica (aunque no siempre) a través del área transversal máxima de la pieza; puede ser plana o irregular y se debe señalar en todos los dibujos del producto y de la matriz. La ubicación del plano de partición puede influir considerablemente en el costo del herramental, duración de la matriz, facilidad

de forja, flujo del grano, propiedades mecánicas y requerimientos de maquinado para la terminación de la pieza.

Es preferible situar el plano de partición sobre la periferia mayor de la pieza, ya que es más fácil forjar lateralmente el flujo de metal, extendiéndolo que llenar un hueco profundo, un ejemplo de esto se muestra en la figura 3.18.

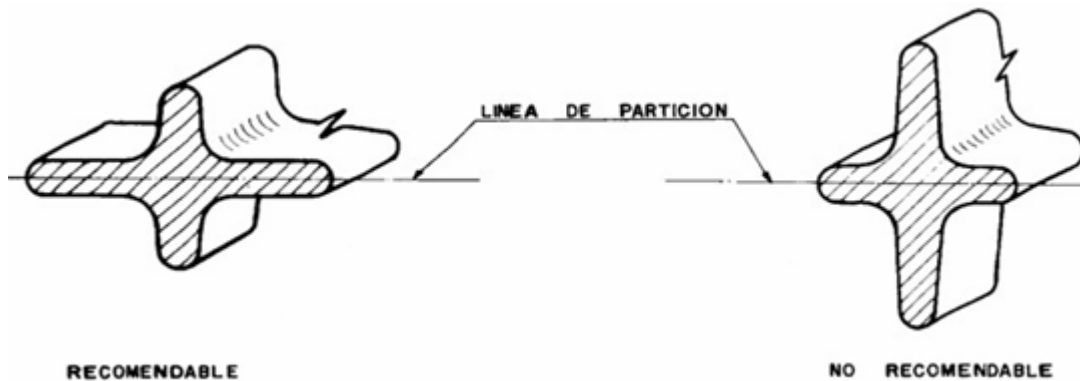


Figura 3.18. Línea de partición situada a lo largo de la sección más grande y poco profunda

Mediante dados superiores planos se puede reducir el costo del herramental, debido a que sólo se requiere maquinar la cavidad en el dado inferior, esto también simplifica el proceso, ya que elimina la posibilidad de desalineamiento sobre los dados superior e inferior y permite tener un solo dado superior plano para varias matrices, en la figura 3.19 se observa una superficie forjada con un dado plano.

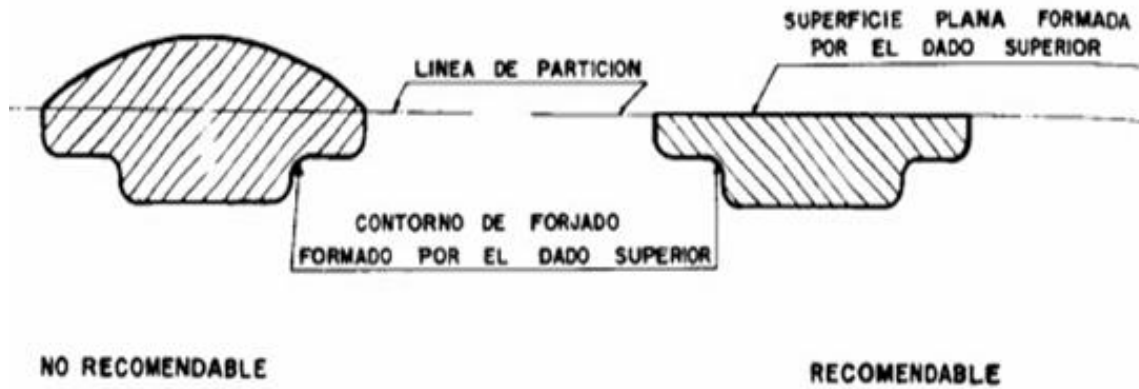


Figura 3.19. Una superficie plana en la línea de partición reduce el costo del dado, simplifica la operación de desbarbado y elimina el desalineamiento entre dados

Las piezas donde la línea de partición está inclinada con respecto al plano de forja, pueden presentar dificultades durante el desbarbado si la inclinación es demasiado grande, la práctica recomendable es limitar esta inclinación a 75° como máximo, según se indica en la figura 3.20, para evitar extremos mal desbarbados.

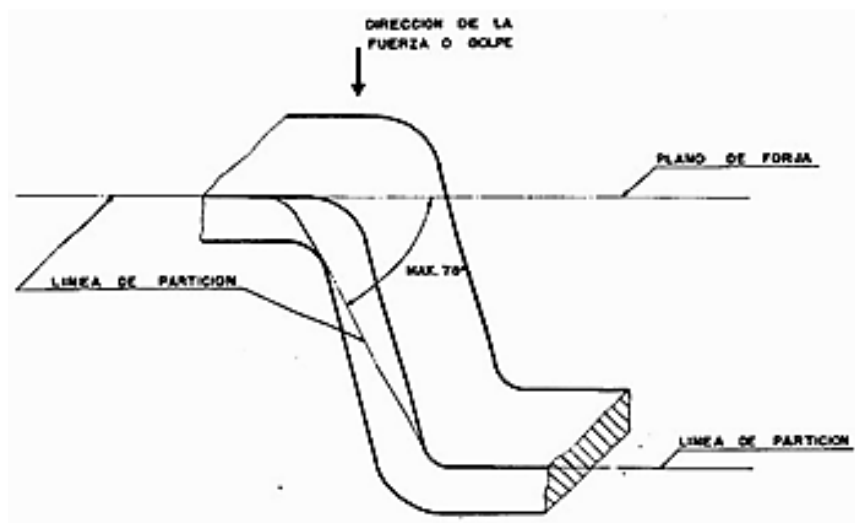


Figura 3.20. La inclinación máxima recomendable de la línea de partición para el desbarbado no debe ser superior a los 75°

La localización de la línea de partición tiene un papel crítico sobre el flujo del grano y en las propiedades dimensionales del producto forjado.

Durante el proceso, el exceso de metal fluye fuera de la matriz por la cuneta de alivio conforme los dados se aproximan. Este flujo en dirección de la línea de partición puede crear zonas desfavorables en la pieza según se muestra en la figura 3.21.

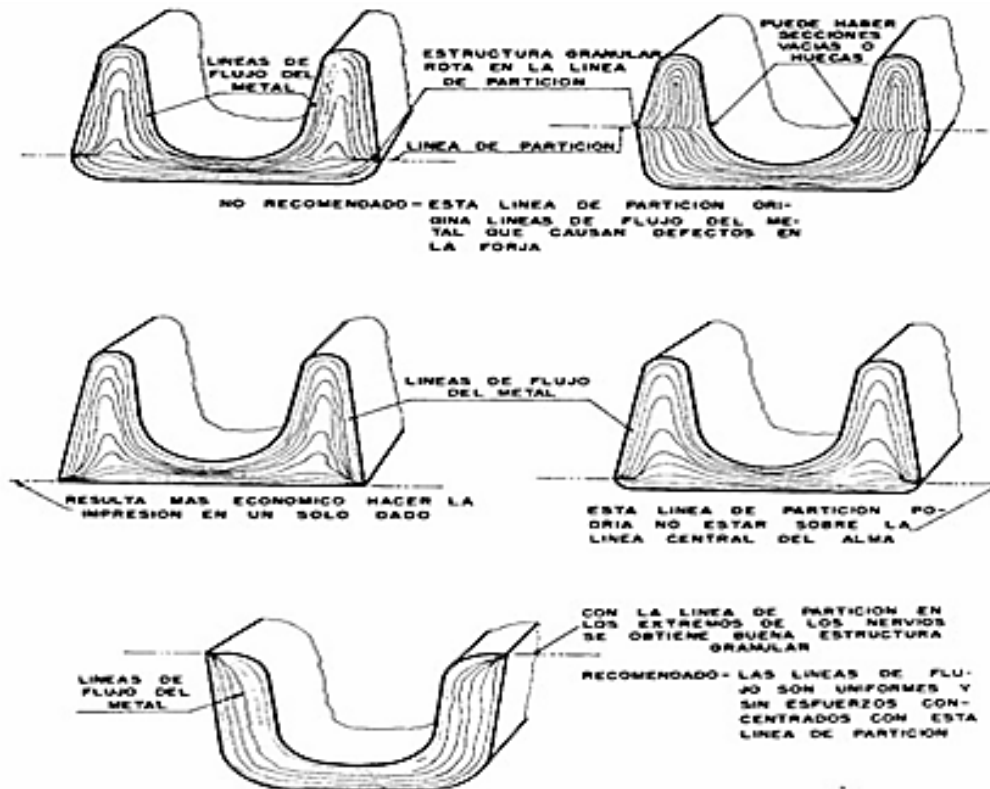


Figura 3.21. Efectos producidos en la orientación del grano por la localización de la línea de partición en una sección en "U"

Una línea de partición sobre el lado exterior de un nervio, puede colocarse indistintamente, adyacente al alma de la pieza o en el extremo del nervio opuesto. En las forjas donde el alma de la pieza esté situada en varios planos, enmarcada por un nervio, la línea de partición puede seguir la trayectoria del alma de la pieza, como se ve en la figura 3.22.

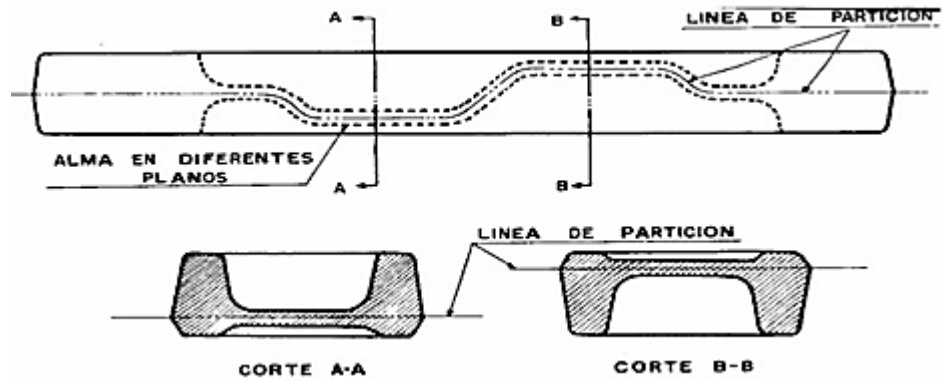


Figura 3.22. Trayectoria de la línea de partición a lo largo del alma de la pieza

También es correcto situar la línea de partición por encima o por debajo de la superficie del alma de la pieza. La figura 3.23 muestra como la ubicación de la línea de partición puede modificar el diseño del producto y de la herramienta.

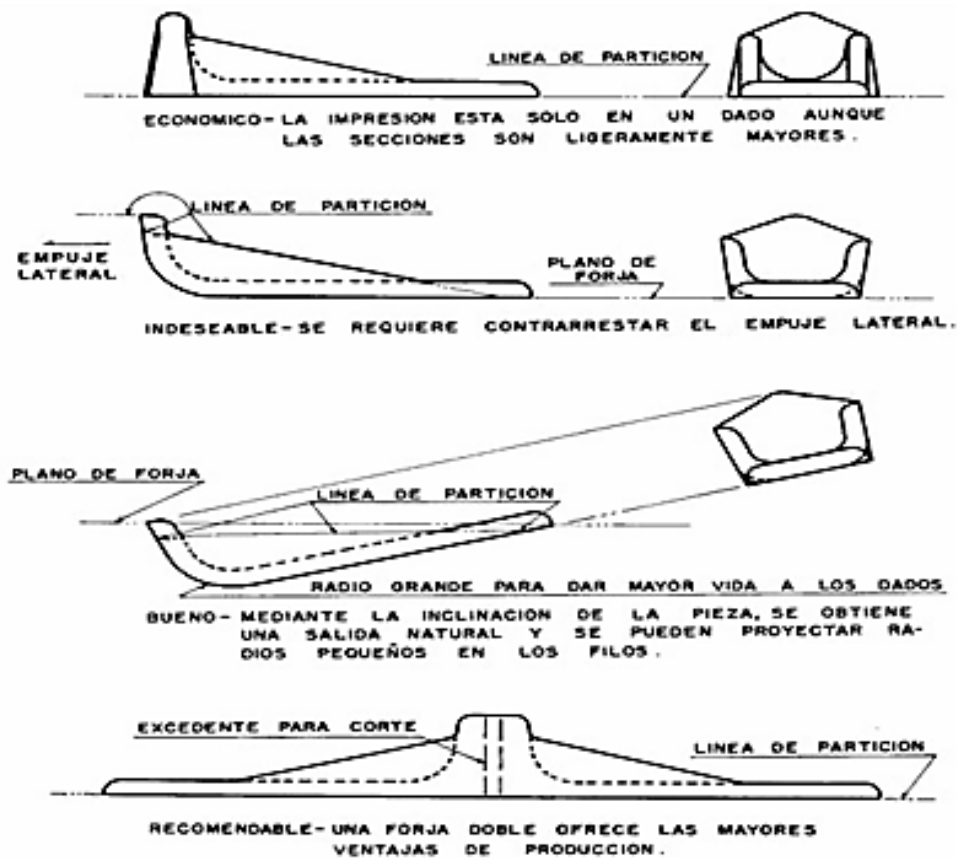


Figura 3.23. Ejemplos que ilustran los efectos del cambio de la línea de partición y del plano de forja

Cuando la línea de partición está inclinada con respecto al plano de forja o las dimensiones principales de la pieza están en planos coordenados girados, el ángulo de salida debe estar referido a la dirección de la carrera de la prensa o martillo, como se observa en la figura 3.24.

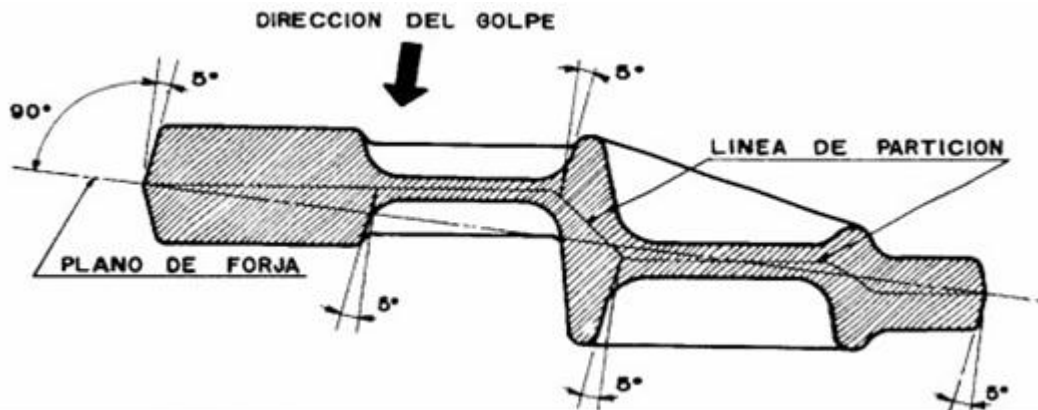


Figura 3.24. Los ángulos de salida deben ser medidos respecto a la perpendicular al plano de forja

Los ángulos de salida no pueden establecerse hasta que el plano de forja sea delimitado. Un método para posicionar el plano de forja con respecto a una línea de partición irregular, se muestra en la figura 3.25.

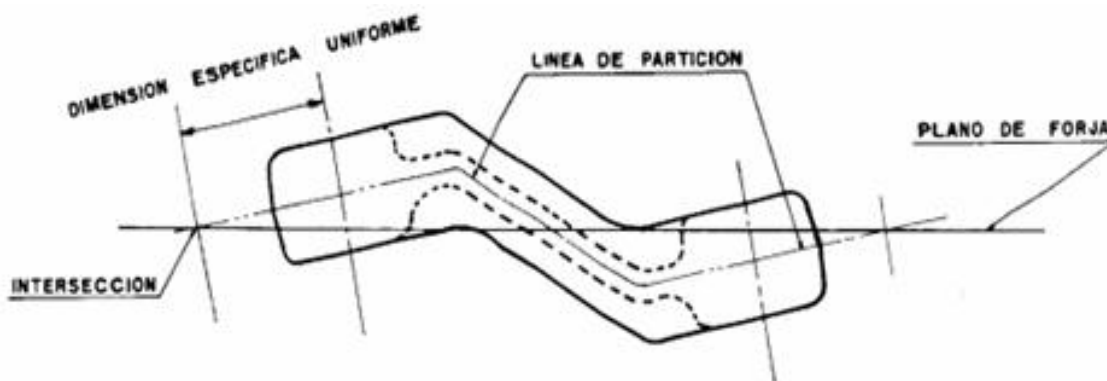


Figura 3.25. Plano de forja recomendado respecto a la línea de partición

Los puntos de intersección se sitúan a 13 mm o menos de los extremos de la pieza.

3.17.2. Ángulo de salida

Las salidas se refieren a la conicidad dada a las paredes interiores y exteriores de una pieza (obtenida en una matriz de forja) para facilitar su extracción de la cavidad del dado. Como ya se mencionó, las salidas están acotadas mediante ángulos referidos a la dirección de la carrera del yunque.

Las salidas no sólo aseguran una buena forja con un mínimo de dificultades de producción, sino que también reducen la fatiga de la matriz. Los ángulos de salida estándar se muestran en la tabla 3.3 en función de la profundidad de la cavidad.

Tabla 3.3. Profundidad máxima de la cavidad del dado en función del ángulo de salida

PROF.	ÁNGULO DE SALIDA				
	1°	3°	5°	7°	10°
mm	CATETO "A"				
0.79	0.0005	0.0016	0.0027	0.0038	0.0055
6.58	0.0011	0.0033	0.0055	0.0077	0.011
6.38	0.0016	0.0049	0.008	0.0115	0.0165
3.17	0.0022	0.0066	0.0109	0.015	0.022
4.76	0.0033	0.0098	0.016	0.023	0.033
6.35	0.0044	0.013	0.022	0.031	0.044
7.93	0.0055	0.016	0.027	0.038	0.055
9.52	0.0065	0.020	0.033	0.046	0.066
16.11	0.0076	0.023	0.038	0.054	0.077
16.70	0.0087	0.026	0.044	0.061	0.088
16.87	0.011	0.033	0.055	0.077	0.110
19.05	0.013	0.039	0.066	0.092	0.132
26.22	0.015	0.046	0.077	0.107	0.154
26.4	0.017	0.052	0.087	0.123	0.176

En la mayoría de los casos, los ángulos de salida menores de 90° impiden el uso de martillos de forja, ya que se requiere la adición de un mecanismo con pernos expulsores para extraer la pieza forjada de la cavidad. La combinación de varios ángulos de salida puede resultar en un mayor costo de la matriz de forja, debido a que en algunas ocasiones la cavidad se maquina con cortadores cónicos y el empleo de un solo ángulo de salida, implica el uso de un solo cortador.

Los nervios, paredes laterales y protuberancias con ángulo de salida constante para diferente profundidad, variarán en el espesor de la base. Si se efectúa un corte imaginario por el fondo de la cavidad, se observaría que las partes más profundas tendrían una pared recta y de espesor constante, sin embargo, conforme se acercara el corte al plano de partición, la base variaría de espesor y estaría curva o irregular, debido al ángulo de salida constante, esto se muestra en la figura 3.26.

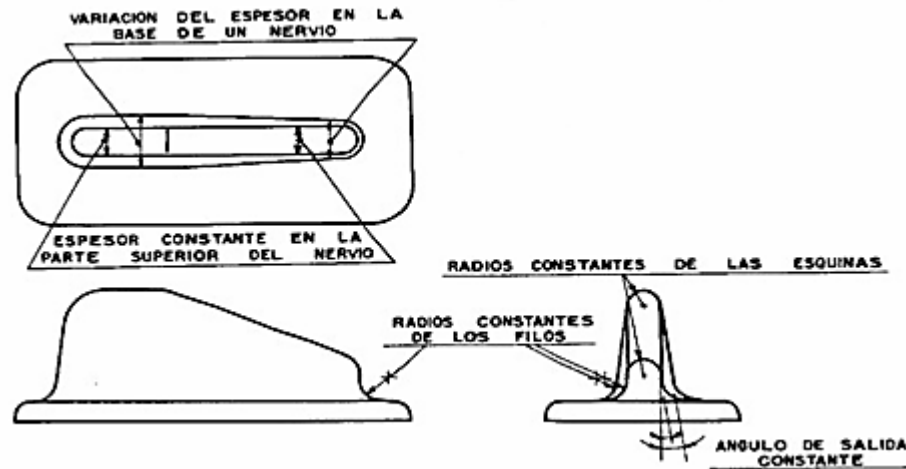


Figura 3.26. Simplificación del diseño mediante ángulos, radios y espesores constantes

Formar un nervio de altura variable con la parte superior e inferior paralelas, requiere la combinación de ángulos de salida con el consecuente incremento en el

costo de la matriz. Esto se debe hacer en casos donde sea imperativo. La figura 3.27 muestra varias opciones y sus defectos.

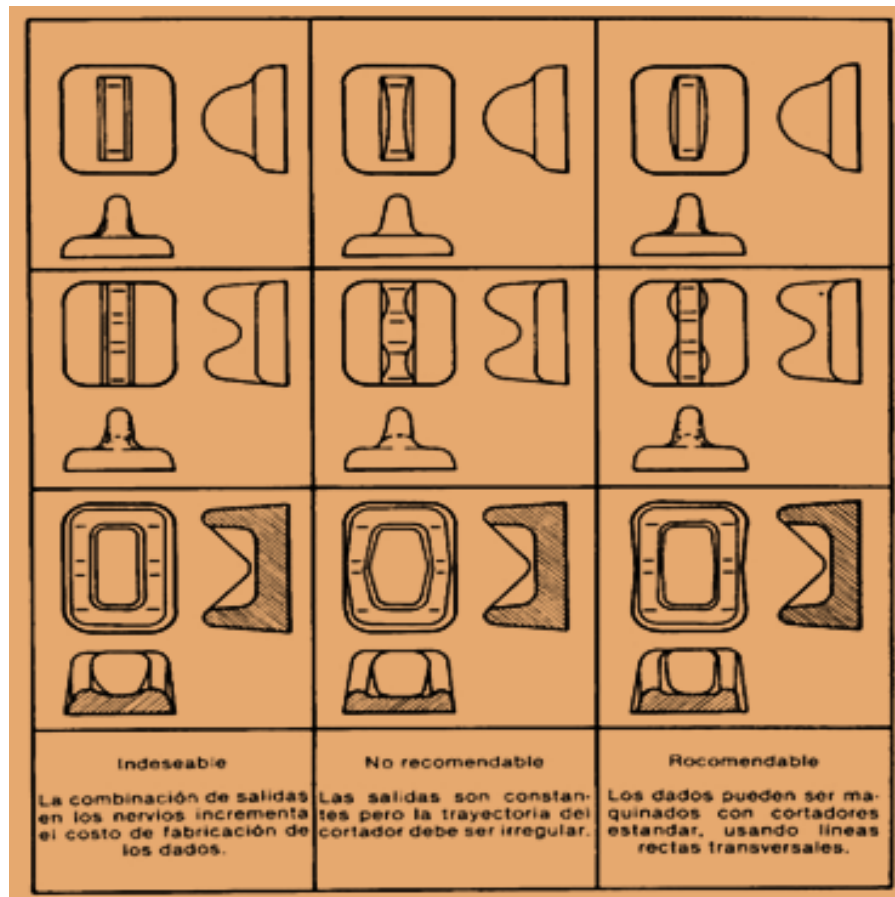


Figura 3.27. Recomendaciones sobre el contorno de las salidas para minimizar los costos

3.17.3. Bordes o salidas negativas

Esto es posible aunque requiere de cuidadosas consideraciones para su aplicación. Los bordes pueden incrementar ligeramente el costo de operación, ya que la extracción de la pieza puede ser más dilatada.

Una forja con bordes a ambos lados de la línea de partición, como la que se muestra en la figura 3.28, no puede realizarse debido a que el dado requeriría ser separable

o partido para remover la pieza y esta separación del dado podría mutilar la forja al vencer la resistencia del ángulo de salida en ambos dados.

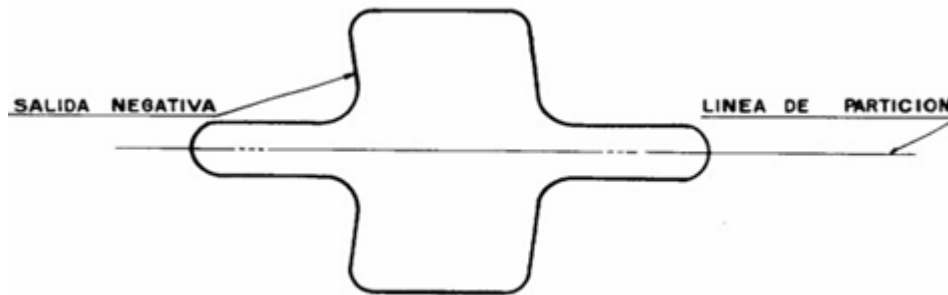


Figura 3.28. Las salidas negativas en los dados superior e inferior impiden su apertura y la extracción de la pieza

Los bordes que deben estar en el dado inferior, sólo se pueden forjar entre los límites mostrados en la figura 3.29 y la pieza debe ser removida en la dirección inclinada a causa del ángulo negativo que no debe ser mayor de 6° .

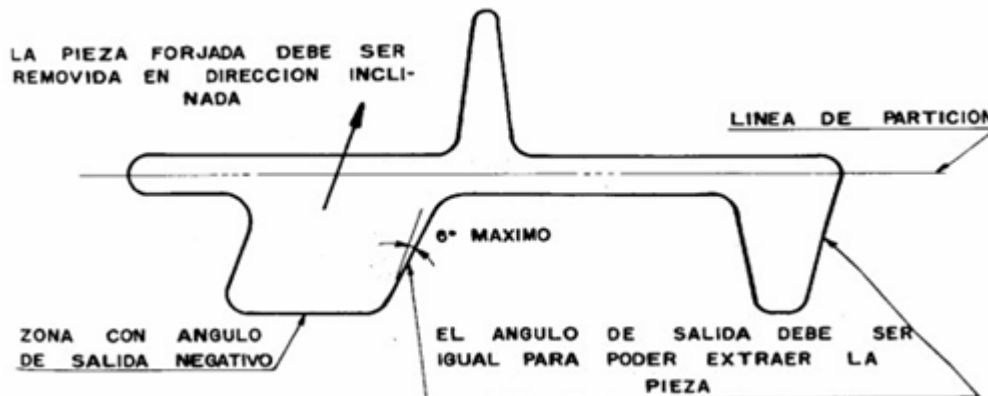


Figura 3.29. Pieza con ángulo de salida excesivo para permitir su extracción a pesar del ángulo negativo

También se pueden forjar piezas con ángulos negativos, inclinando el plano de forja para eliminar dicho ángulo, como se muestra en la figura 3.30.

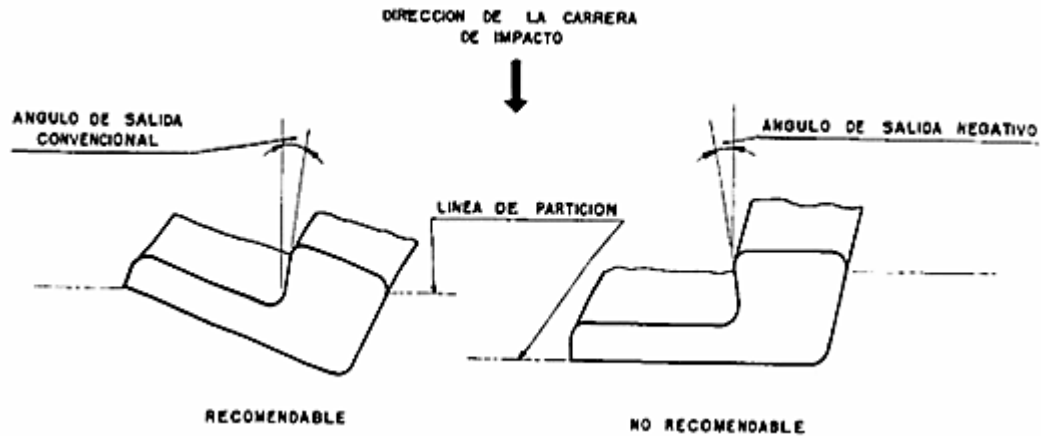


Figura 3.30. *Inclinación del plano de forja para poder formar una zona con ángulo de salida negativo*

3.17.4. Radios en las esquinas

El radio de una esquina se forma por la intersección de dos superficies con un ángulo menor o mayor de 180°. Para establecer las dimensiones de estos radios, se deben tener en cuenta dos factores:

- 1) El radio como un factor de concentración de esfuerzos en el dado
- 2) La presión necesaria para llenar la cavidad del dado.

La forma de un extremo o la esquina de una pieza forjada, requieren la correspondiente cavidad en el dado, debido a que la forja es una pieza en positivo y la cavidad del dado una forma negativa; por lo tanto, el radio de una forja está formada por la correspondiente arista del dado. Cuando estas aristas son excesivamente marcadas (poco radio), la fuerza del metal bajo presión y el esfuerzo que esto causa sobre las esquinas, puede provocar fisuras o roturas de estas esquinas después de que tan sólo unas cuantas piezas hayan sido forjadas.

Este efecto adverso sobre el dado se incrementa, debido a las grandes presiones requeridas para llenar y formar esquinas agudas, lo que disminuye la vida del dado y vuelve al proceso antieconómico.

Los radios mínimos en las esquinas, limitan el uso de nervios muy altos y delgados. Conforme a la gráfica mostrada en la figura 3.31 (elaborada para aleaciones de aluminio) que proporciona el radio de una esquina en función de la altura de la forja a partir del plano de partición, se tiene que hacer lo siguiente:

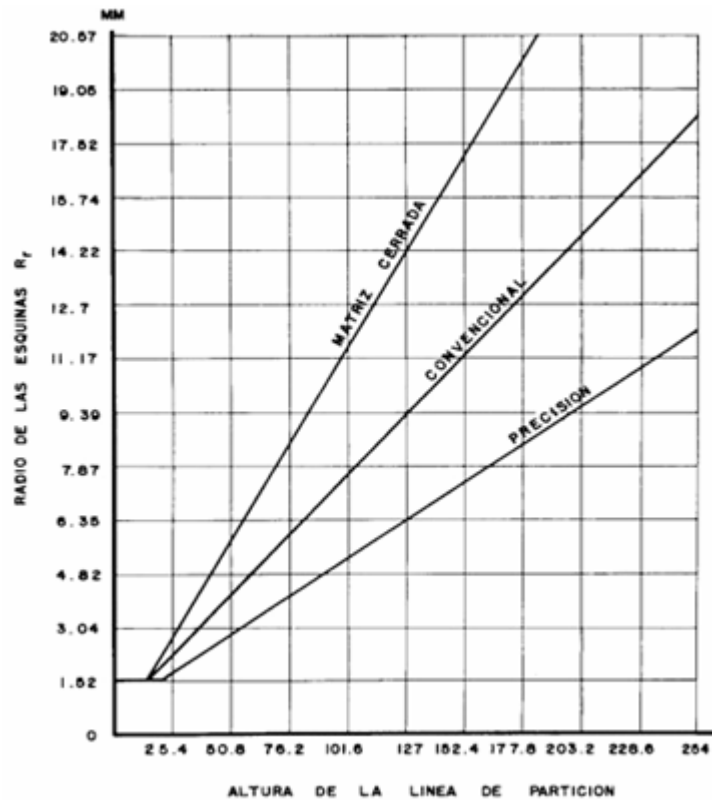


Figura 3.31. Dimensiones de los radios recomendados para las esquinas

Formado con un radio en el extremo y salidas estándar, un nervio no debe ser más delgado que el doble del radio. Un nervio grueso o caja, debe tener un extremo plano con dos radios en las esquinas, cada uno igual al radio recomendado; sin embargo, es mejor usar un solo radio, igual a la mitad del espesor del nervio, estos dos casos se ilustran en la figura 3.32.

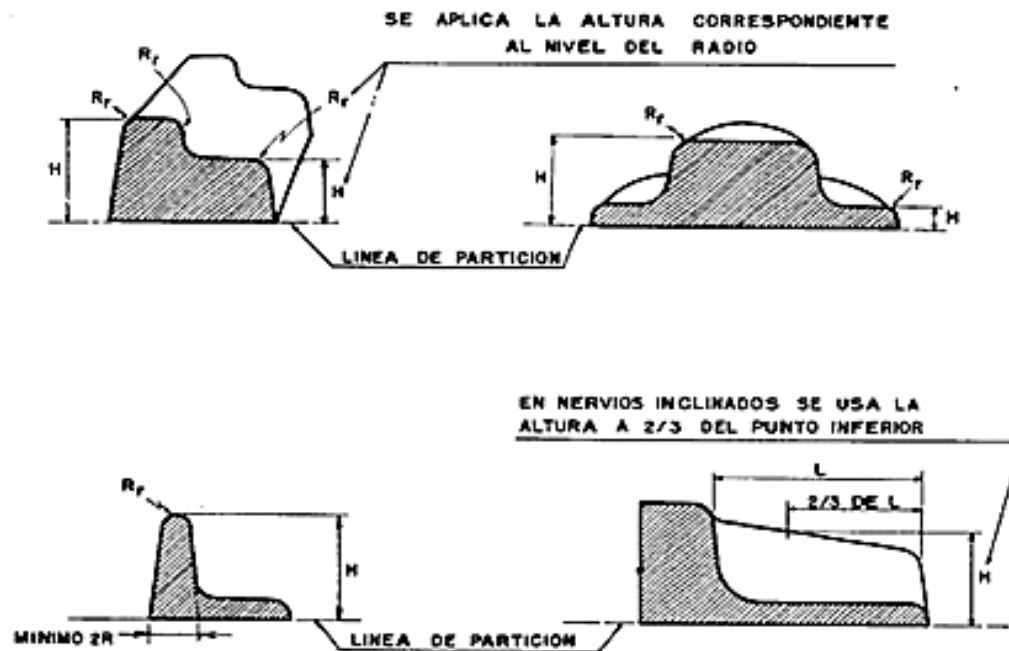


Figura 3.32. El radio de las esquinas es función de la altura de partición

Se deben buscar radios máximos, pero cuidando de mantener los costos de forja al mínimo. La cuidadosa utilización de radios constantes en las esquinas, permite el empleo de herramientas con la misma conicidad, lo que puede redundar en ahorros, en la figura 3.33 se muestra una pieza con radios constantes.

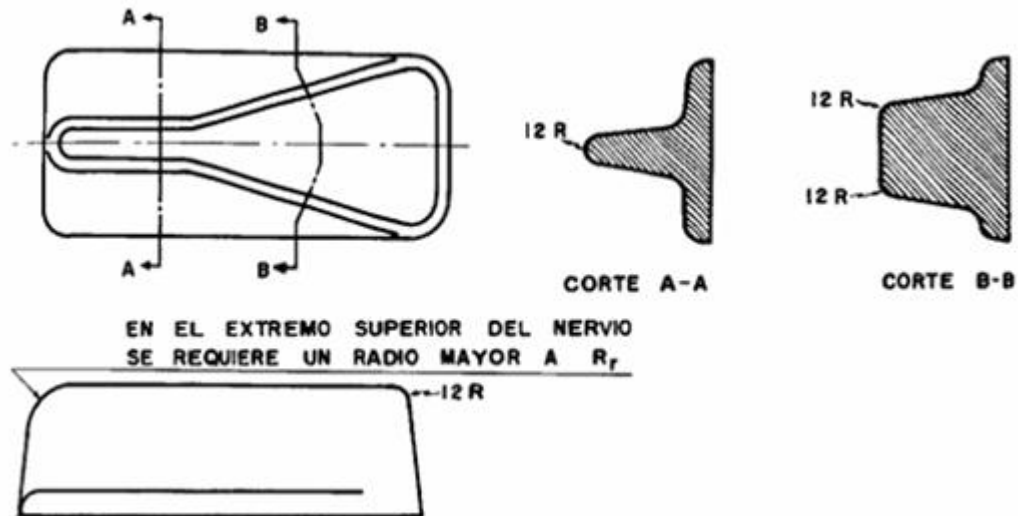


Figura 3.33. El costo de fabricación de los dados puede ser abatido si se utiliza un radio constante en las esquinas

En los extremos de los nervios, es mejor utilizar un radio mayor que el indicado en la figura 3.34. El radio R_x que se muestra en la figura 3.35 puede dimensionarse de acuerdo a lo siguiente:

- Igual a la distancia entre el agujero y el extremo de la pieza, más el radio del agujero.
- Tres veces al radio R_r .
- Tan grande como sea posible.

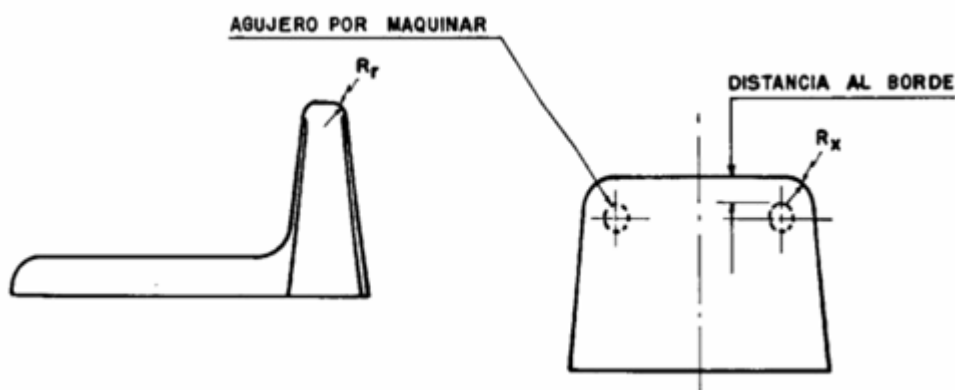


Figura 3.34. El radio R_x en las esquinas debe ser tan grande como sea posible para mejorar la forjabilidad

Mientras que se recomienda que R_x sea tan grande como sea posible, el tamaño del radio en la vista superior también es importante. Lo mejor es un radio completo que facilite el maquinado del dado, como el recomendado en la figura 3.35. .

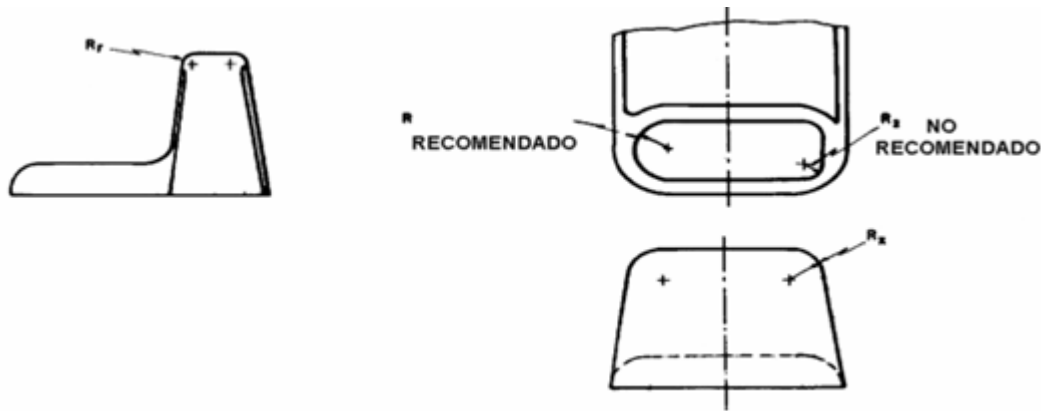


Figura 3.35. En los extremos de un nervio se recomienda un redondeamiento completo

Si el arco de circunferencia no es de un solo radio (R_z en la figura) el maquinado es más complicado. Las aristas y bordes que están redondeados con un arco de circunferencia completo, como el nervio con extremo redondeado que se ve en la figura 3.36, reducen los problemas de fractura en las esquinas.

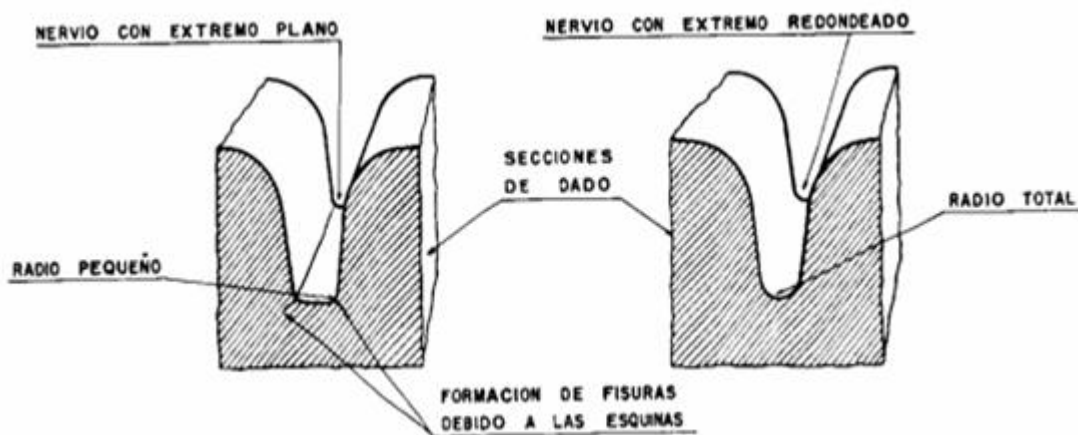


Figura 3.36. Redondeo de nervios para alargar la vida de los dados y facilitar el flujo de metal

La parte superior o el extremo de un nervio, se debe redondear con un radio mínimo, dependiendo de la altura con respecto al plano de partición. La vida útil del dado se reduce cuando se forjan nervios delgados o profundos.

La fuerza requerida para llenar la cavidad de un nervio profundo, particularmente cuando está adyacente a una sección (alma) muy delgada, desarrolla severos esfuerzos en el dado.

Por lo tanto, los nervios cercanos a almas delgadas, deben ser tan cortos como lo permita el diseño. Los filos que se forman en la intersección de dos superficies, deben permitir al material en forja, fluir libremente para seguir el contorno del dado con facilidad. Los filos con radios pequeños pueden causar vacíos momentáneos durante los cambios de dirección del metal al fluir. Estos huecos son subsecuentemente llenados, pero la interrupción del flujo ocasiona una fisura o grieta que debilita la pieza, lo anterior se muestra gráficamente en la figura 3.37.

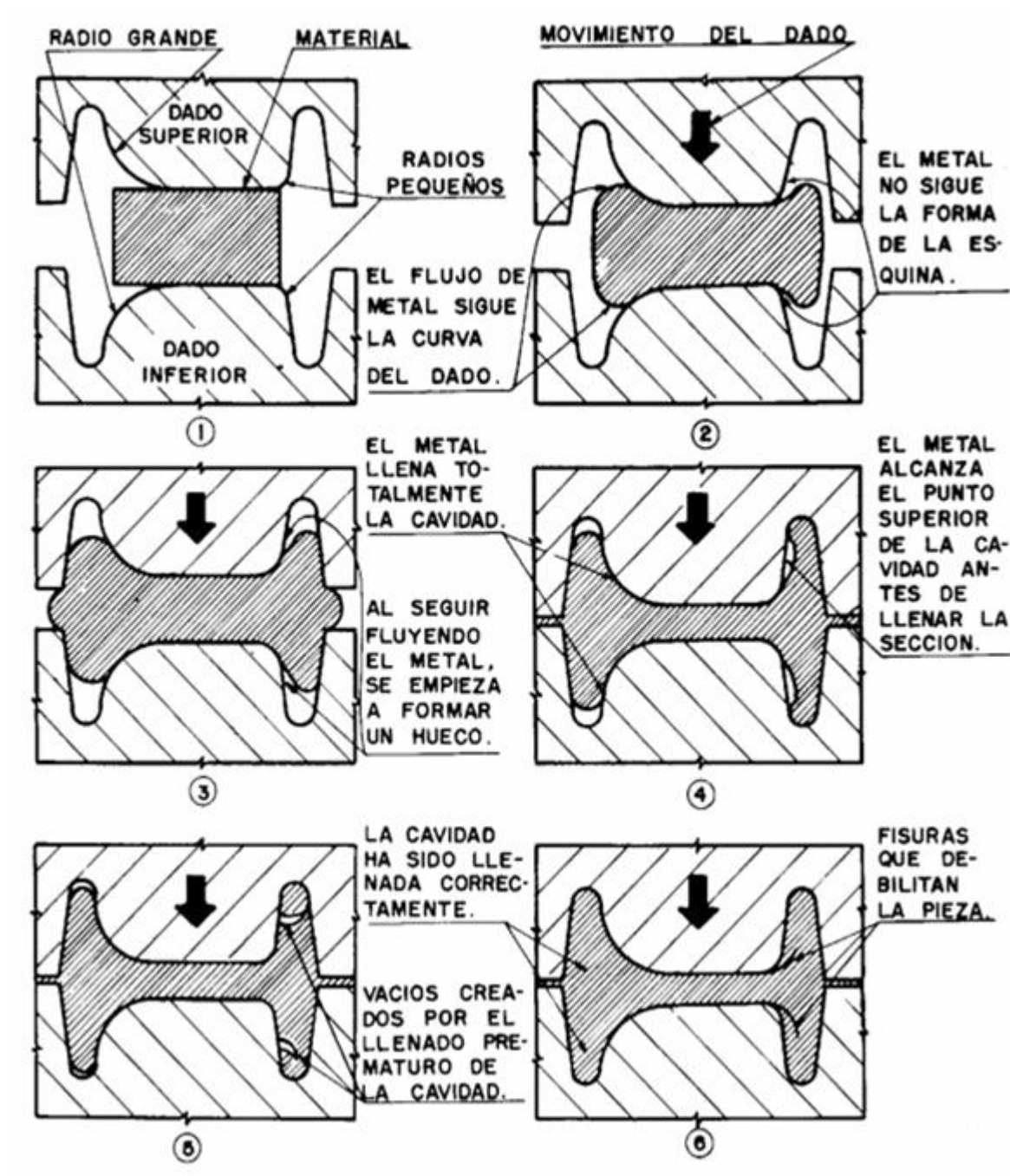


Figura 3.37.- Pasos progresivos de la forja de una pieza para mostrar el efecto de los radios en los fillos mal dimensionados

La figura 3.38 muestra los radios en los fillos para forjas de aluminio en los procesos de forja en bloque convencional y de precisión.

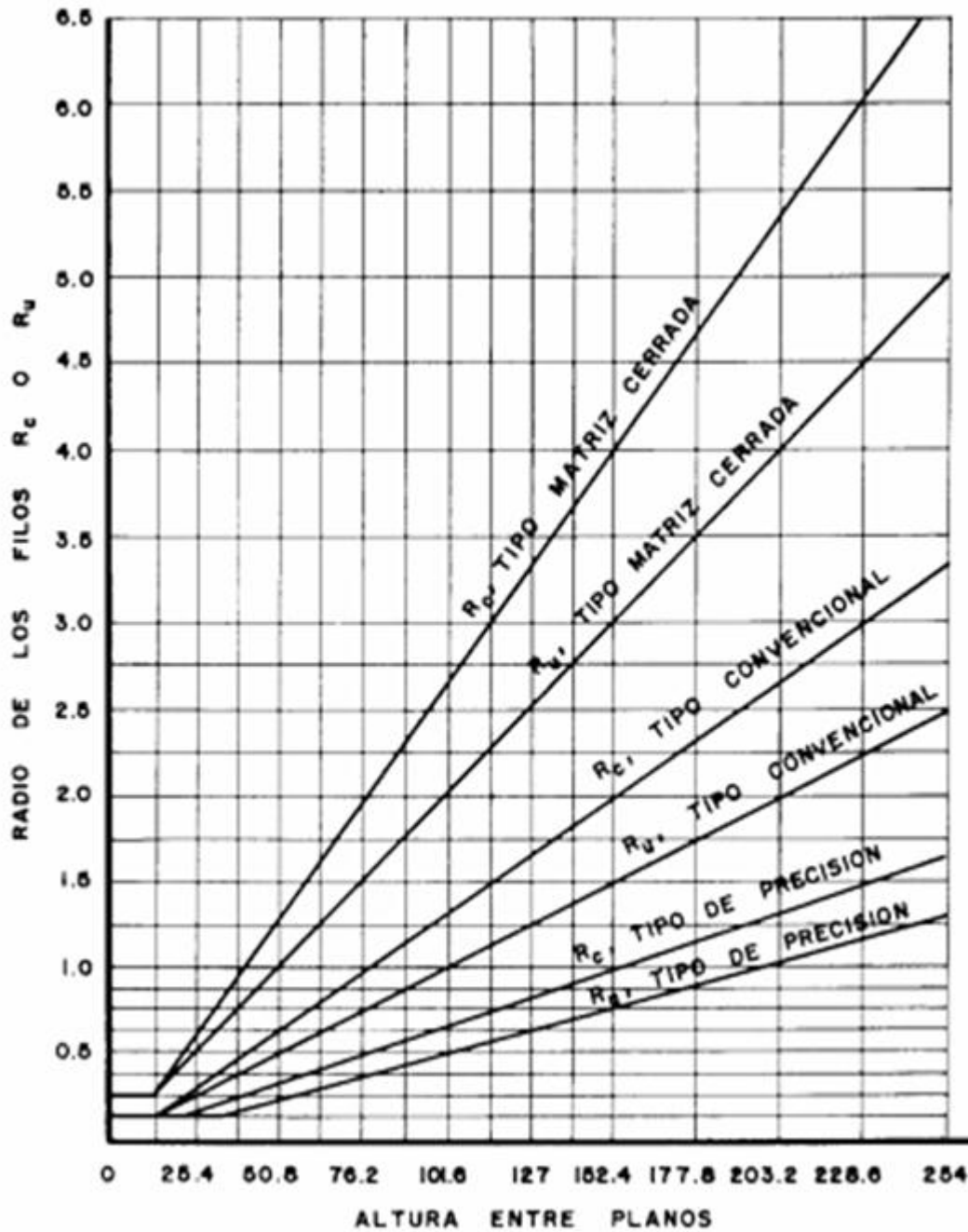


Figura 3.38. Dimensiones de los radios recomendados en los fillos de los dados o en las esquinas del producto

3.18. Defectos en forja

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

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

1. Materia Prima:

Durante la colada de lingotes de acero, se pueden generar distintos defectos, a continuación se describen brevemente los defectos más comunes que ocurren durante este proceso:

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

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

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

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

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

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

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

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

producir inclusiones, las escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido, también se convierten en inclusiones.

2. La forja misma:

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

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

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

Agrietamiento y reventado central, este defecto es una grieta interna que se desarrolla como resultado de los esfuerzos de tensión a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo durante el proceso de forja. Si los esfuerzos de tensión son suficientemente grandes, ocurre el reventado central. Algunas condiciones que

promueven estas fallas son las impurezas (inclusiones), cavidades o microporosidades presentes la pieza de trabajo.

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

Cavidades, microporosidades, al igual que las inclusiones, estos defectos (internos) provienen de los procesos de fundición y solidificación del material. Dichos defectos pueden ser eliminados durante el proceso de compresión, mediante una suficiente y uniforme deformación de la pieza de trabajo.

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

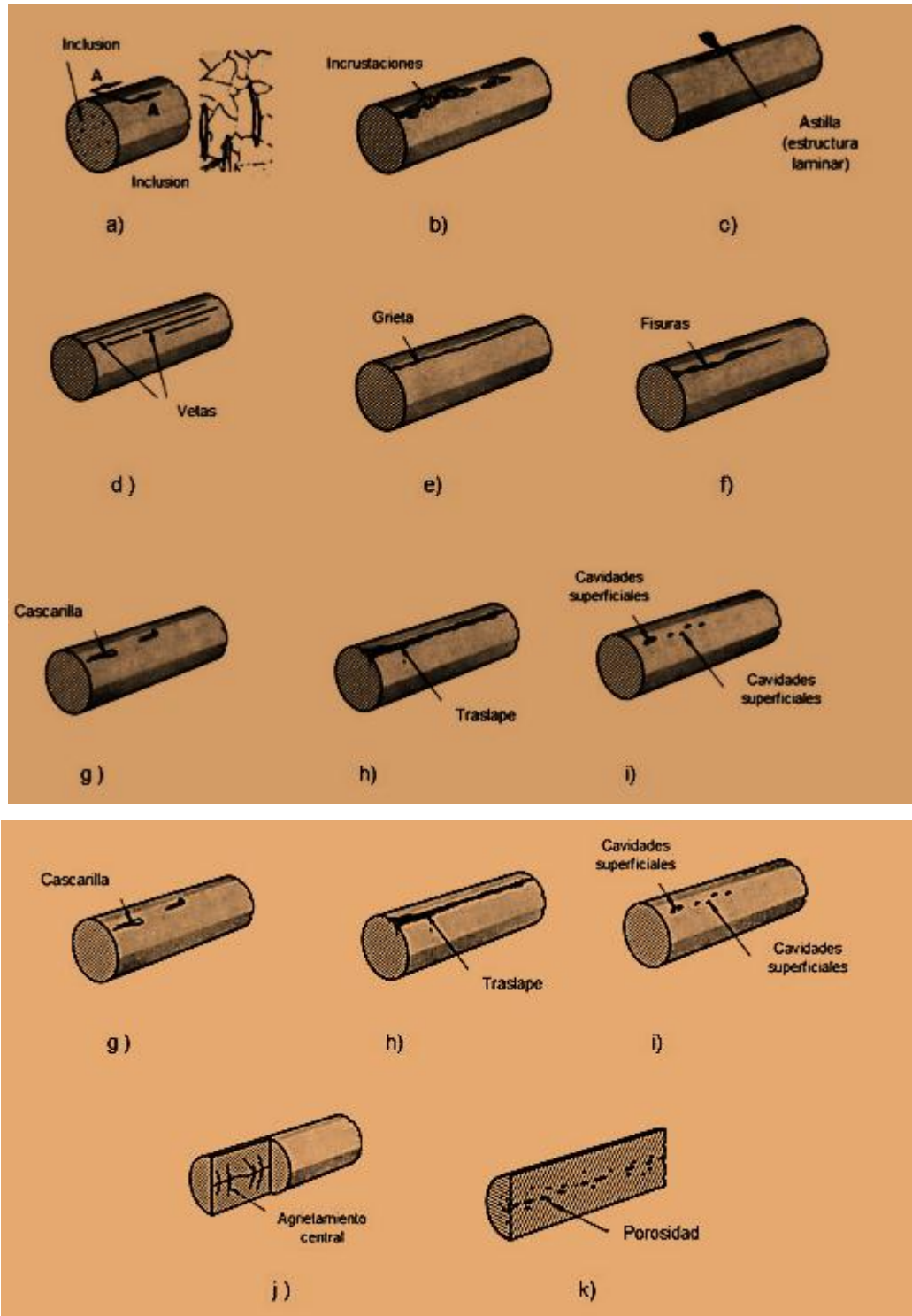


Figura 3.39. Defectos típicos posteriores al proceso de forja.

CAPITULO 4

LAMINADO

4.1. Introducción

El laminado o también llamado rolado es un proceso de reducir el espesor, o modificación de la sección transversal, de una pieza larga de metal mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos. Este proceso fue desarrollado por primera vez a finales de 1500, cuyo principio es simple pues consiste en el aplastar el material con un cilindro de un material más duro y resistente.

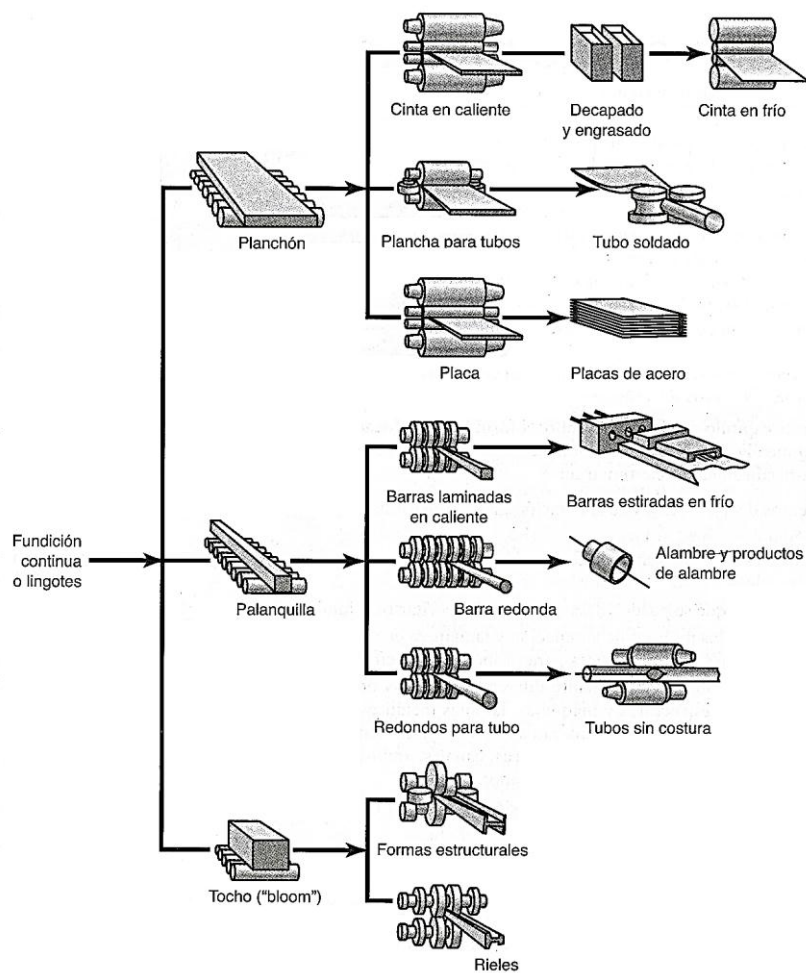


Figura 4.1. Esquema de varios procesos de laminado plano y de forma.

Los productos que se obtiene son tres principalmente:

Las placas, que generalmente se consideran con un espesor superior de 6 mm (1/4 pulg), se utilizan en aplicaciones estructurales, como son las estructuras de máquina, los cascos de buque, las calderas, los puentes y los recipientes nucleares. Las placas para dichas aplicaciones van de los 100 a 125 mm (4-5 pulg) para la estructura de buques y tanques, de 150 mm (6 pulg) para los recipientes de reactores y de 0.3 m (12 pulg) para apoyos para calderas grandes.

Las hojas, comúnmente tienen menos de 6 mm de espesor; y se fabrican para manufacturar materias primas intermedias como piezas planas o cintas en rollo para futuras aplicaciones. Estas láminas se usan en las carrocerías de autos y fuselajes de avión, enseres domésticos, recipientes para alimentos y bebidas, y en equipos domésticos.

Principalmente, se tienen dos procesos básicos del laminado: laminado plano y laminado de forma, aunados estos a otros procesos alternos como la fabricación de tubo y tubería sin costura, formas estructurales y rieles.

En el **laminado de perfiles** el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal más complejo. Los productos obtenidos incluyen perfiles redondos, hexagonales y cuadrados. También perfiles para construcción como vigas en I, en L, en C (canales) y rieles ferroviarios.

El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

4.2. Laminado plano.

El proceso consiste en que una tira de espesor h_0 entre en el espacio de laminación donde un par de rodillos de rotación reduce a un espesor h_f cada uno de los rodillos es movido a través de su flecha impulsadas por un motor eléctrico. La velocidad superficial del rodillo es V_i . La velocidad de la tira incrementa desde su valor de entrada V_0 a través del espacio de laminación. La velocidad máxima a la salida del espacio de laminación; la identificamos como V_f . Dado que la velocidad superficial del rodillo es constante, existe un deslizamiento relativo entre el rodillo y la tira a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación, L .

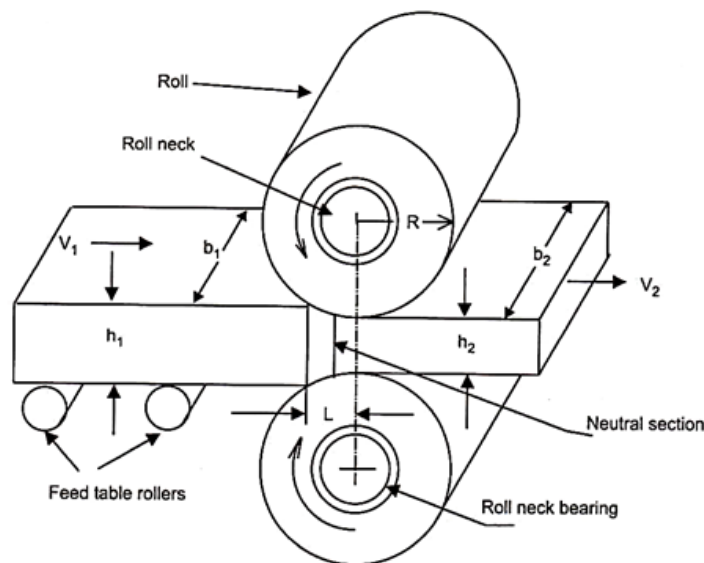


Fig. 7.1. Longitudinal rolling process

Figura 4.2 (a) Ilustración esquemática del proceso de laminado plano, el ancho de la tira suele aumentar durante el laminado de b_1 a b_2

En un punto a lo largo del tramo de contacto, conocido como el punto neutro o punto sin deslizamiento, la velocidad de la tira es la misma que la del rodillo. A la izquierda de ese punto, el rodillo se mueve más rápido que la tira; a la derecha del mismo la tira se mueve con mayor velocidad que el rodillo, por tanto, las fuerzas de fricción se oponen al movimiento actúan sobre la tira.

Los rodillos tiran hacia adentro del espacio de laminación haciendo uso de fuerzas de fricción, pero a su vez se debe cuidar que estas fuerzas de fricción no dañen la superficie del material.

4.2.1. Fuerza del rodillo y requerimiento de potencia

Ya que los rodillos ejercen presión sobre el material para reducir su espesor, se requiere una fuerza perpendicular a al arco de contacto y al plano de la tira a laminar. Esta fuerza se puede calcular mediante el uso de la ecuación siguiente:

$$F = LW\sigma_{avg} \quad \dots\dots(4.1)$$

Donde:

L es la longitud entre el rodillo y la tira,

w es el espesor de la tira, y

σ_{avg} es el esfuerzo promedio real de la tira en el espacio de laminación.

Esta ecuación corresponde a un proceso sin fricción, por lo que si tomamos en cuenta los coeficientes de fricción, nuestra ecuación sufre divergencia y dará una fuerza del rodillo menor a la real.

La potencia necesaria para laminar una tira, se puede estimar suponiendo que la fuerza actúa a la mitad del arco de contacto. El par por torsión por rodillo es el producto de F por a; por lo que se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$P = \omega FL \quad \dots\dots(4.2)$$

Donde:

F es la fuerza en Newtons,

N es la velocidad angular en rad/s y

L es la longitud en metros.

Estas fuerzas de laminación pueden causar deflexión o aplastamiento de los rodillos, lo que afectara sustancialmente al proceso de laminación. Además, el tren de laminación incluyendo carcaza, tacones (cuñas), y rodamientos, puede estirarse bajo las fuerzas de laminación de manera que el espacio de laminación se abra significativamente, de manera que debe considerarse esta deflexión que sufren los rodillos en el momento de realizar la reducción de espesor.

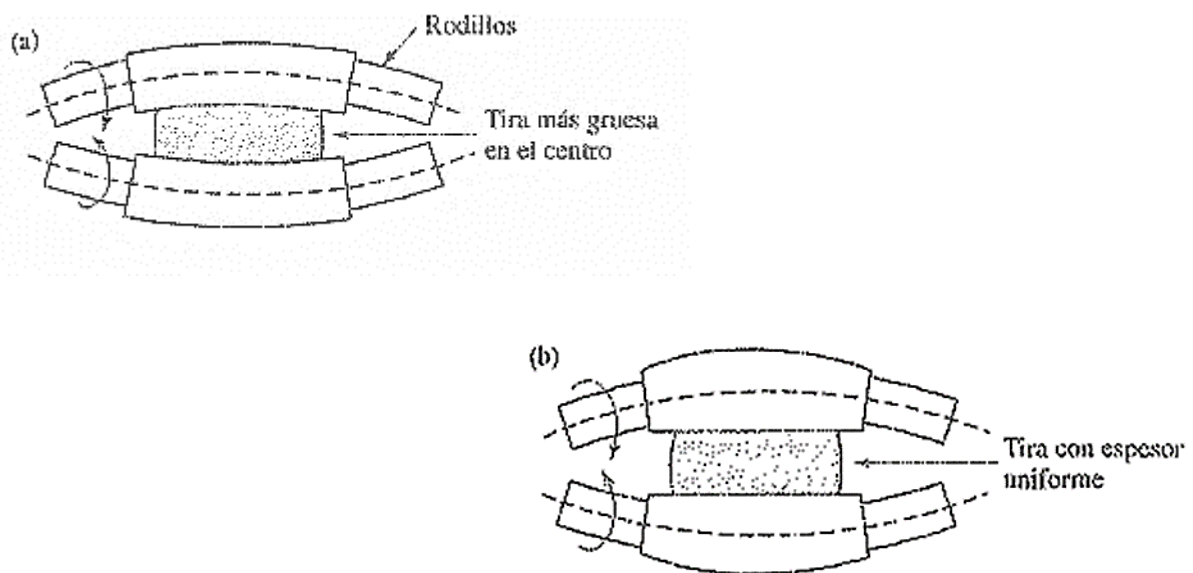


Figura 4.3. (a) Flexión de rodillos cilíndricos rectos, causados por las fuerzas de laminación; (b) Flexión de rodillos rectificadas con combadura produciendo en tira de espesor uniforme.

Las fuerzas de laminado se pueden reducir mediante tres procedimientos:

- Reducción de la fricción,
- Reducir el diámetro de los rodillos con el fin de disminuir el área de contacto,
- Efectuar reducciones más pequeñas por pasada,
- Reducir la resistencia del metal laminando a altas temperaturas.

En ocasiones se hace uso de tensiones longitudinales que sirven para reducir la cantidad de esfuerzos de compresión necesarios para reducir el espesor del material. Estas tensiones se dividen en tensión posterior, a la entrada; y tensión anterior, realizada a la salida de la lámina. Estas tensiones se logran mediante equipos especiales de frenado.

4.2.2. Consideraciones geométricas

Las fuerzas necesarias para la laminación suelen flexionar a los rodillos logrando cambios geométricos en estos. Como resultado de esta deflexión de los rodillos, la tira laminada tiende a quedar más gruesa en el centro que en sus borde (corona), por lo cual se suelen rectificar los rodillos dándoles un grosor un poco mayor en el centro, es decir se les da una combadura. Por tanto en cuanto se flexionan los rodillos, la combadura se endereza y el ancho de la tira laminada permanece constante.

Para el laminado de metales en hoja la combadura suele ser de 0.25 mm mayor que en los bordes del rodillo. Debido al aumento de la temperatura durante la deformación plástica que sufre un metal al ser laminado, los rodillos pueden presentar un abarrilamiento (combadura térmica), por lo cual estos factores deben considerarse a la hora de montar un tren de laminación tomando en cuenta las diferencias térmicas y las posibles deflexiones de los rodillos.

Otro efecto que se presenta es el aplanamiento de los rodillos, efecto indeseado que produce un área mayor de contacto, por lo que la energía necesaria para el laminado aumenta también. Durante la laminación, de placas y hojas, el ancho se conserva prácticamente constante, mientras que en el laminado de piezas con secciones transversales diversas, es inherente un aumento en la sección transversal

a lo que se le conoce como ensanchado. El ensanchado se puede evitar usando rodillos verticales que mantenga contacto con los bordes del material laminado.

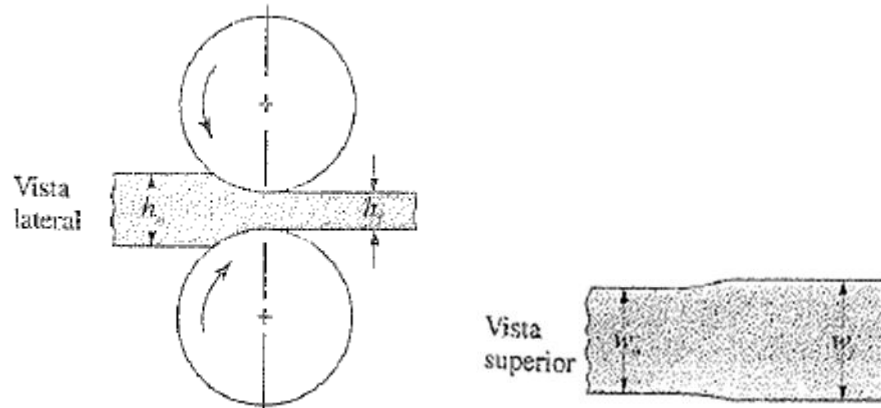


Figura 4.4. Ensanchado: incremento en el ancho de una tira en el laminado plano

4.3. Laminado de perfiles.

El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada. Los principios que se aplican al laminado plano se pueden aplicar al laminado de perfiles. El material inicial, de forma generalmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final. El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama diseño de pases de laminación, su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor elongación en estas secciones. Las consecuencias de una reducción no uniforme pueden ser torceduras y agrietamientos del material. Se utilizan rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo.

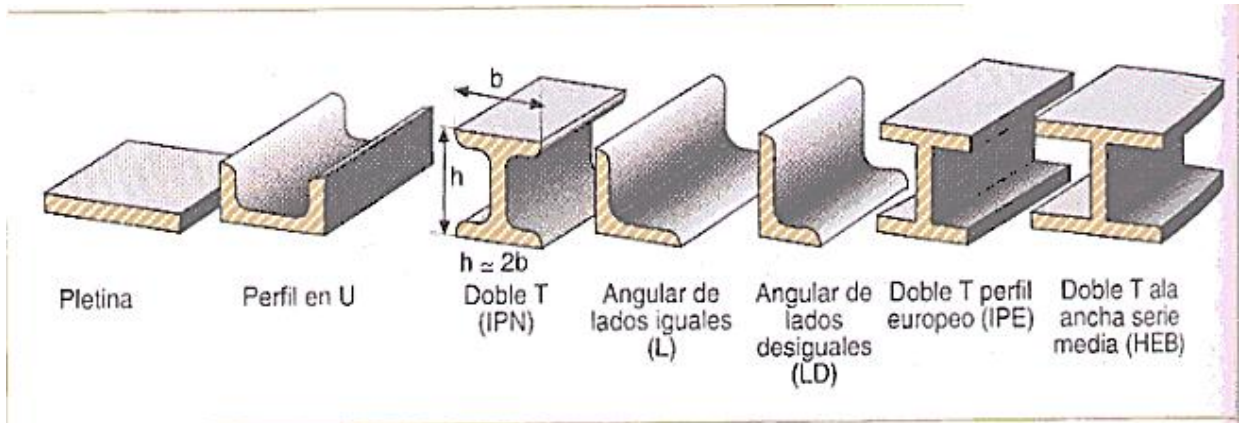


Figura 4.5. Perfiles estructurales obtenidos mediante laminado

CAPITULO 5

EXTRUSIÓN.

El proceso de extrusión data de aproximadamente del siglo XVII y XIX, y es uno de los procesos más utilizados para el conformado de los materiales. El proceso de extrusión es un proceso de conformado por compresión, consiste en introducir una preforma, por ejemplo, un billet, en una matriz o dado, donde es sometida a esfuerzos de compresión y se obliga a que el material fluya por uno o varios orificios de la matriz.

Con este proceso se pueden producir un gran número de perfiles y formas transversales ya sean sólidos o huecos, con lo cual se presume que se pueden extruir piezas semi-acabadas. Otra ventaja de este proceso es que la estructura granular y las propiedades mecánicas aumentan considerablemente (extrusión en caliente), así mismo, las piezas extruidas pueden tener tolerancias muy estrechas (extrusión en frío) y se genera poco o casi nada de material de desperdicio.

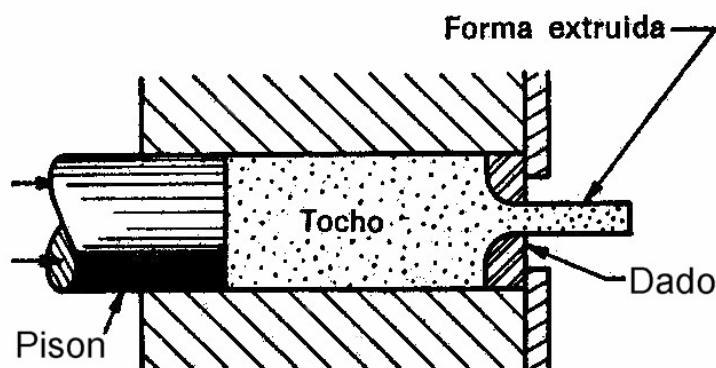


Figura 5.1. Proceso de extrusión directa.

Con frecuencia se combinan los procesos de extrusión con los de forja, llamada regularmente como extrusión en frío; la cual tiene aplicaciones muy relevantes como la fabricación de tornillos, partes de automóviles, bicicletas, motocicletas, elementos de maquinaria pesada y para equipos de transporte.

Entre los productos característicos de la extrusión se encuentran los rieles para puertas corredizas, tubos extruidos de distintos perfiles transversales, los perfiles estructurales y arquitectónicos, marcos para puertas y ventanas.



Figura 5.2. Piezas extruidas y ejemplo de productos fabricados cortados de tramos de piezas extruidas.

Los materiales que con más frecuencia se extruyen son el aluminio, cobre, acero, magnesio, zinc, latón y plomo, los primeros tubos de plomo por extrusión se fabricaron en el siglo XVIII, aunque también se pueden extruir otros materiales como aleaciones metálicas, otros metales y algunos plásticos.

5.1. Análisis de la extrusión

Las variables geométricas en la extrusión son el ángulo del dado o matriz, α , y la relación de las secciones transversales de la preforma entre la del producto extruido A_0/A_f , llamada relación de extrusión R . Otras variables son la temperatura, la velocidad y el tipo de lubricación.

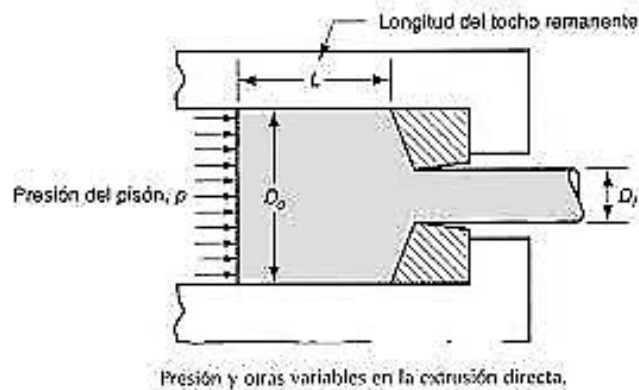


Figura 5.3 Variables en el proceso de extrusión directa. El ángulo del dado, la reducción de área transversal, la velocidad y la temperatura de extrusión, la temperatura de la preforma y la lubricación.

Las relaciones R de extrusión van de 10 a 100, aproximadamente. Pueden ser mayores, llegando al valor de 400, en aplicaciones especiales, o menores para los materiales menos dúctiles, aunque por lo general son del valor 4 como mínimo, para hacer que el material fluya en forma plástica por toda la pieza. Los productos extruidos tienen casi siempre menos de 7.5 m de longitud, por la dificultad de manejar tramos mayores, que podrían llegar a ser de 30 m.

Un parámetro que describe la forma del producto extruido es el diámetro del círculo circunscrito (DCC), es decir el diámetro del círculo más pequeño en que puede caber la sección transversal del perfil extruido. Así, para un perfil cuadrado el DCC es la longitud de su diagonal.

La complejidad de una pieza extruida es función de la relación existente entre el perímetro de la sección transversal de la pieza extruida entre su área transversal, lo cual se le conoce como factor de forma. Por lo que podemos decir que las piezas con secciones transversales solidas tienen un factor de forma mínimo, mientras que las piezas mostradas en la figura 5.4 tiene un mayor factor de forma.

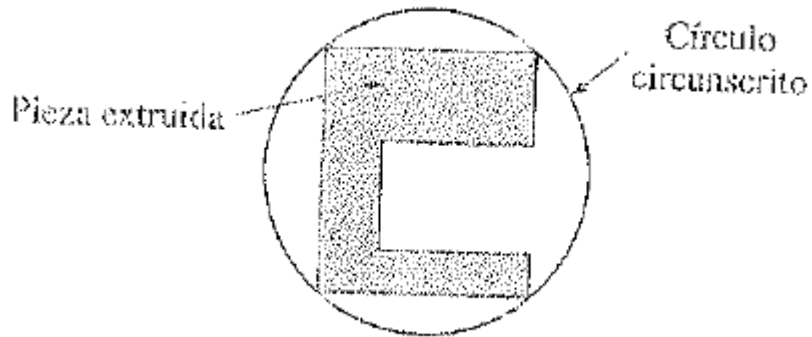


Figura 5.4. Método para determinar el diámetro del círculo circunscrito (DCC) de un perfil extruido.

Los diámetros DCC para el aluminio van de 6 mm a 1 m; la mayor parte sean de 0.25 m. Debido a las grandes fuerzas necesarias, el DCC máximo para el acero se limita normalmente a 0.15 m.

Las velocidades del ariete de compresión llegan hasta a 0.5m/s. En general se prefieren velocidades menores para el aluminio, magnesio, cobre, y las velocidades mayores para los aceros y las aleaciones refractarias.

La mayor parte de los productos extruidos tienen una tolerancia de ± 0.25 mm hasta 2.5 mm. Aumentando directamente proporcional con el área transversal.

5.2 Tipos de extrusión

Dependiendo de los acabados, de las propiedades del material y de las necesidades del proceso de conformado, la extrusión se puede llevar a cabo de distintas maneras; por lo cual se pueden clasificar estas distintas maneras de llevar a cabo dicha operación. Por su configuración física y por los movimientos relativos entre material y dado, el proceso se puede clasificar en dos tipos: extrusión directa y extrusión indirecta.

Otro criterio, según sea la ductilidad del material, la extrusión se puede hacer a temperatura ambiente, o a altas temperaturas. Y finalmente los procesos de extrusión se pueden hacer de manera continua o discreta.

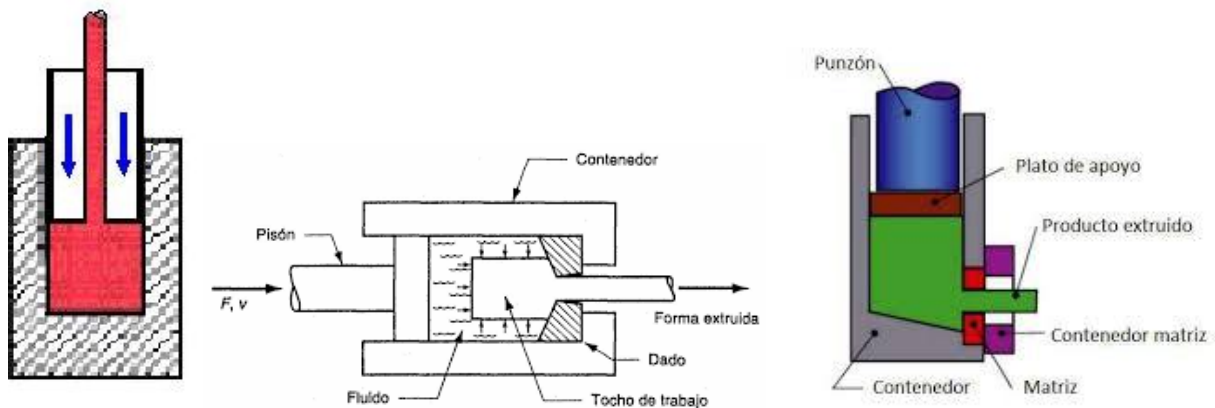


Figura 5.5. Tipos de extrusión: Indirecta (a), Hidrostática (b) y lateral (c).

5.2.1 Extrusión directa e indirecta.

El proceso básico de extrusión es la extrusión directa o de avance, la cual consiste en colocar el tocho o billet de metal en el recipiente o cámara y es impulsado por un pistón que comprime al material forzándolo a pasar a través de una o más aberturas que hay en un dado situado en el extremo opuesto. Esta abertura puede tener forma rectangular, cuadrada, redonda, o de cualquier forma que se quiera dar a la sección transversal de nuestra pieza extruida.

Al aproximarse el pistón al dado, una pequeña porción del material permanece, no puede forzarse a través del dado, por lo que esta porción, llamada tope o cabeza, es cortada en la salida del dado usando una cizalla.

El problema principal al que se enfrenta la extrusión directa es la gran fricción que se produce entre el tocho o billet y la pared interna del recipiente al forzar su movimiento; la fricción ocasiona un incremento sustancial de la fuerza requerida en el pistón para lograr la extrusión directa.

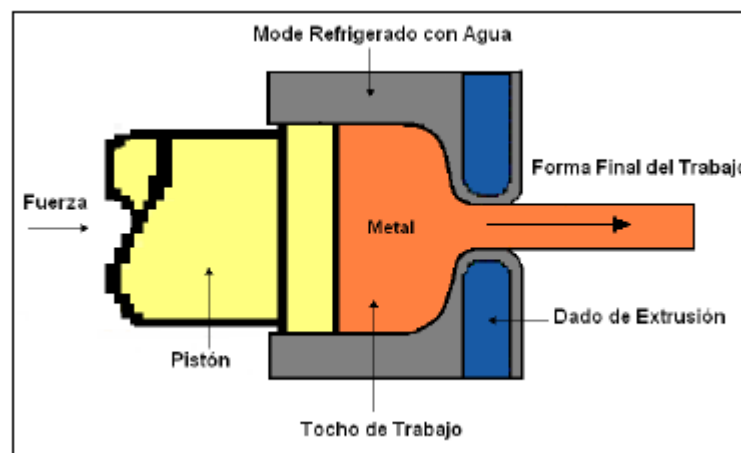


Figura 5.6. Esquema del proceso de extrusión directa.

En la extrusión directa caliente el problema de la fricción se agrava por la presencia de óxidos en la superficie del material, causa primordial de los defectos en los productos extruidos. Para resolver esta problemática se usa un bloque simulado entre el pistón y el billet de trabajo, el diámetro del bloque de simulación es ligeramente menor que el diámetro del billet, de manera que en el recipiente o matriz queda un anillo de metal de trabajo con las capas de óxido del material de trabajo, dejando libre de óxidos al material extruido.

En la extrusión directa se pueden hacer secciones huecas, por ejemplo los tubos extruidos, los cuales se procesan como se ve en la figura 4.6. Se hace una perforación a la preforma paralelamente respecto al eje o dirección de extrusión, luego se introduce un mandril el cual se sujeta al bloque simulado. Al comprimir al billete o tocho, se fuerza al material a fluir entre el claro del dado y del mandril, logrando una sección transversal tubular.

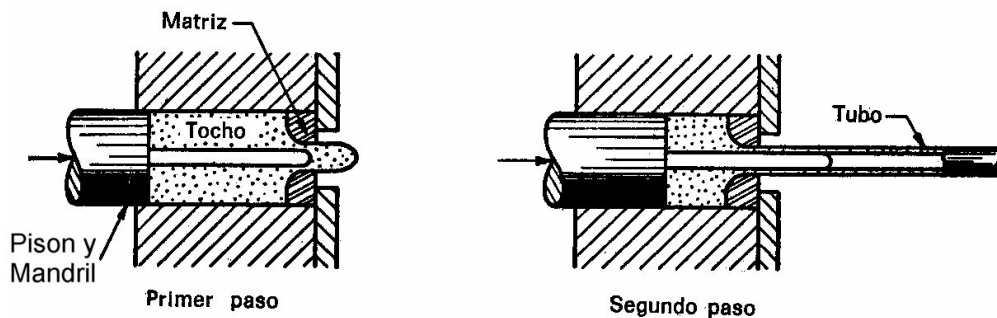


Figura 5.7. Pasos en el proceso de la extrusión directa para producir perfiles de sección transversal hueca.

Inicialmente, la preforma a extruir directamente es de sección transversal circular, pero la forma transversal final está determinada por la forma que tenga la abertura entre los dados, por lo que se puede obtener una variedad infinita de perfiles de secciones transversales continuas. En la figura 5.8 se muestran algunos ejemplos.

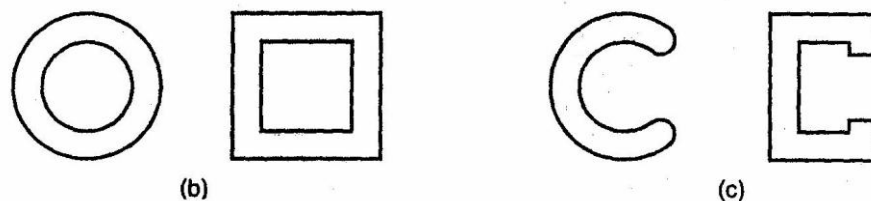


Figura 5.8. Perfiles extruidos de sección transversal hueca (b) y semi-hueca (c).

La extrusión indirecta, llamada también llamada extrusión inversa o en reversa, se diferencia elementalmente de la directa porque el dado está montado sobre el pistón y este se mueve hacia el tocho, por lo que el material a extruir no se mueve y la fricción es menor. El material es forzado a fluir a través del claro en dirección opuesta a la del movimiento del pistón, lo cual provoca una fricción menor que en la extrusión directa, por lo tanto, la fuerza requerida en el pistón es menor.

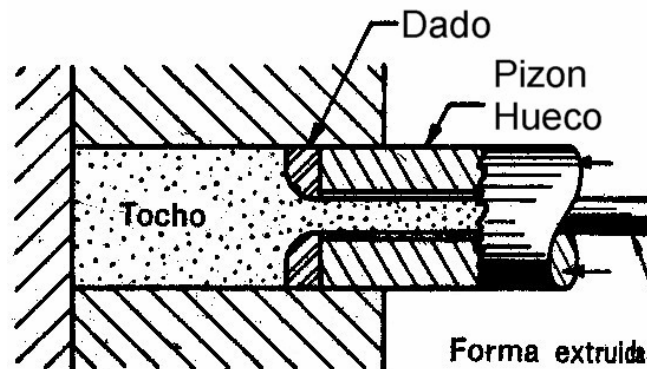


Figura 5.9. Esquema del proceso de extrusión indirecta.

Algunas desventajas de la extrusión indirecta es la menor rigidez del pistón hueco por la necesidad de lograr su movimiento y la dificultad de sostener al material extruido.

La extrusión indirecta también puede producir secciones huecas, como lo muestra la figura 4.#: En donde se fuerza al material a pasar alrededor del pistón, lo cual significa una limitante en la longitud de trabajo del pistón.

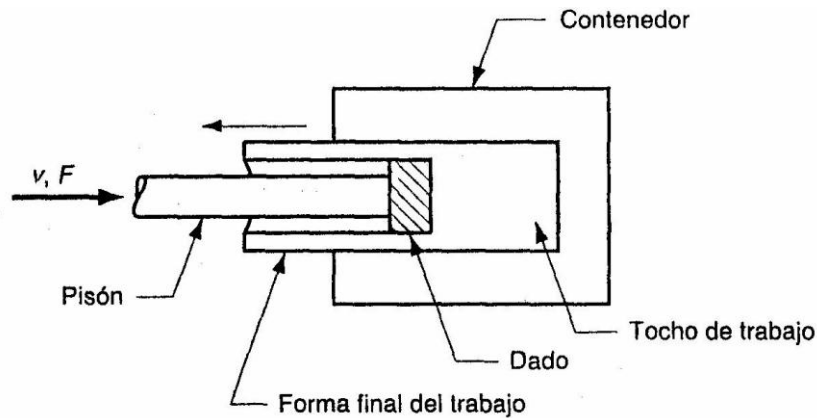


Figura 5.10. Pasos en el proceso de la extrusión indirecta para producir perfiles de sección transversal hueca.

5.2.2 Extrusión en frío y en caliente

La diferencia de temperaturas a las cuales se llevan a cabo estos procesos de extrusión está en razón primordial de la diferencia de ductilidad de los materiales a temperaturas cercanas a la ambiente, lo cual se entiende en el proceso y con los resultados obtenidos.

En la extrusión a temperatura ambiente o en frío fue desarrollada en la década de 1940, e indica una combinación de extrusiones directa e indirecta, y forjado. Los materiales utilizados son muy dúctiles, tal es el caso del aluminio, el cobre, magnesio, zinc estaño y sus aleaciones. Resaltando que el más utilizado en la extrusión en frío es el aluminio. En general, la extrusión en frío se usa para producir partes discretas, en forma terminada o casi terminada. Algunas ventajas que ofrece la extrusión en frío son las propiedades que adquiere el material como es una mayor resistencia debido al endurecimiento por deformación plástica, además de que se tienen buenos acabados superficiales, ausencia de capas de óxidos y tolerancias más estrechas a velocidades mayores de extrusión.

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

- Mejores propiedades mecánicas debido al endurecimiento por el trabajo, siempre que el calor generado por la fricción y la deformación plástica no logre recristalizar al metal.
- Buen control de tolerancias dimensionales, en parte debido a la capa o costra de óxido, siempre que la lubricación se la adecuada.
- Eliminación de procesos de precalentado.
- Capacidades y costos de producción menores.

Algunas de las desventajas que presenta la de extrusión en frío es que los esfuerzos en la máquina de extrusión son muy altos, ya que se requieren durezas muy altas (58-65 HRC) y propiedades mecánicas suficientes, tenacidad, resistencia al desgaste y a la fatiga. Por tanto, los costos del equipo pueden llegar a ser elevados.

Para los metales y aleaciones que no tienen una ductilidad suficiente a temperatura ambiente, la extrusión se hace a temperaturas elevadas, con el fin de reducir las fuerzas requeridas. Como todos los procesos de conformado en caliente, la extrusión en caliente tiene sus requisitos especiales, por que debido a altas temperaturas se pueden presentar problemas como un desgaste excesivo del dado, el repentino enfriamiento repentino de la preforma, y excesos de fricciones por la resiliencia del material y existencia de capas de óxido.

Para evitar algunos de los problemas ya mencionados, se prefiere antes del proceso de conformado, precalentar los dados y el billet, con el fin de no perder temperatura durante el proceso. Para evitar la formación de óxido en la palanquilla o billet se requiere el uso del bloque simulado, que es un bloque con diámetro menor que ser coloca frente al ariete de compresión, logrando una extrusión libre de óxidos.

La lubricación descrita, en especial cuando se trata de aceros, ya que se pueden operar a la herramienta si la lubricación falla. El método más efectivo de lubricación es la aplicación de una placa fosfatada modificada en la pieza, seguida por una capa de jabón o de cera.

También es importante el control del material de la pieza en cuanto a su calidad, así como su precisión dimensional y sus condiciones superficiales.

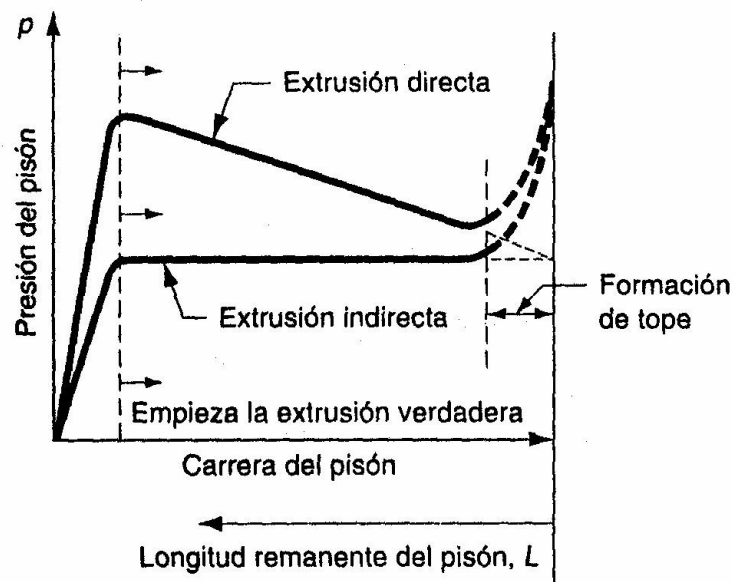


Figura 5.11. Gráficas típicas de la presión contra la carrera del pistón (y la longitud remanente del tocho) para extrusión directa e indirecta. Los valores más altos de la extrusión directa resultan de la fricción en las paredes del recipiente. La forma de la acumulación de la presión al inicio de la gráfica depende del ángulo del dado (mayores ángulos del dado significan acumulaciones de presión más pronunciadas). El incremento de presión al final de la carrera se relaciona con la formación del tope.

5.2.3 Extrusión continua y discreta

La diferencia entre estas clasificaciones del proceso de extrusión radica en la estabilidad del proceso en el tiempo, ya que los procesos de extrusión por sus propiedades o requerimientos específicos pueden ser más o menos estables unas respecto de otras. Algunas operaciones se aproximan al ideal de estabilidad,

produciendo secciones largas en un solo ciclo o proceso, quedando solo limitadas por el tamaño de la preforma, o mejor dicho por la cantidad de material que se puede introducir en la matriz en un solo ciclo. Es entonces que decimos que estas operaciones son semicontinuas o continuas.

Por otra parte, las operaciones de extrusión donde solo se producen piezas casi únicas por cada ciclo de extrusión son denominadas como extrusión discreta. Ejemplo de este tipo de proceso sería la extrusión por impacto.

5.2.4 Extrusión por impacto

La extrusión por impacto es similar a la extrusión indirecta, y con frecuencia se cataloga como una extrusión en frío y discreta. En esta el punzón desciende rápidamente sobre la pieza bruta (tejo) que se extruyen hacia atrás. Debido a la constancia de volumen, el espesor de la sección tubular extruida es función de la holgura entre el punzón y la cavidad del dado o matriz.

El diámetro de las piezas fabricadas puede llegar a ser de 150 mm. Los procesos de extrusión por impacto pueden llegar a producir secciones tubulares de paredes delgadas, que pueden llegar a tener una relación de espesor-diámetro de 0.005. Por lo cual la simetría entre la pieza bruta, el punzón y la matriz debe ser casi perfecta.

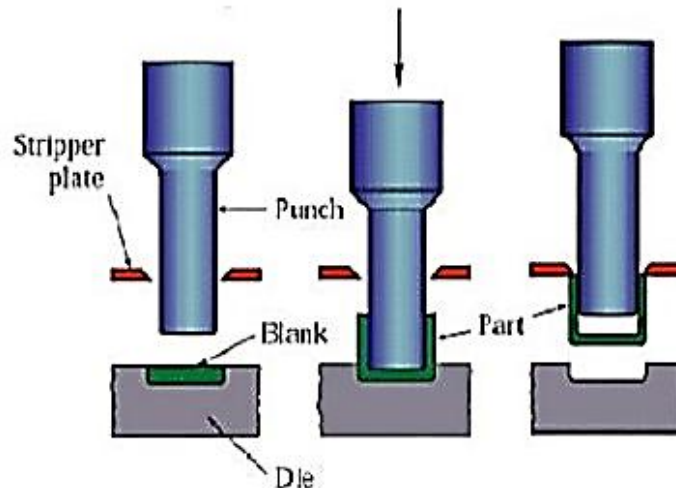


Figura 5.12. Esquema del proceso de extrusión por impacto. Las partes extruidas se desprenden usando una placa desmoldeadora, ya que tienden pegarse al punzón.

5.2.5 Extrusión hidrostática

En la extrusión hidrostática, la presión necesaria para la extrusión se suministra a través de un fluido incompresible que rodea la palanquilla o tocho. En consecuencia no hay fricción en la matriz y en las paredes de la cámara. Las presiones suelen ser del orden de los 1400MPa. La alta presión en la cámara transmite un poco del fluido a las paredes disminuyendo las fuerzas necesarias para lograr la extrusión.

La extrusión hidrostática fue desarrollada a principios de 1950, y fue mejorada cuando se colocó una segunda cámara a menor presión en el lado donde se extrae el material extruido, llamo proceso de extrusión de fluido a fluido, lo cual redujo comparablemente los esfuerzos generados y dando resultados benéficos en los terminados superficiales.

La extrusión hidrostática suele hacer a temperatura ambiente y con aceites vegetales como fluido, en especial el aceite de rechino ya que no se ve afectada su viscosidad con los cambios de presión.

Para extrusiones fluido a fluido a altas temperaturas se suelen utilizar ceras, polímeros o vidrio como fluidos, los cuales también sirven como aisladores térmicos y ayudan a mantener casi constante la temperatura del billet durante la operación.

A pesar del éxito que han tenido estos procesos, sus aplicaciones son limitadas, en parte por la compleja naturaleza del herramental, sin tener en cuenta los costos por su baja estabilidad de ciclos y la necesidad del control de las presiones.

5.3 Fuerza de extrusión

La fuerza que se requiere en la extrusión depende de la resistencia del material de la preforma, de la relación de extrusión, de la fricción entre las superficies de la preforma y la matriz y de variables de proceso como son la velocidad de extrusión y la temperatura a la cual se lleva a cabo. La fuerza de extrusión F , se calcula por la fórmula:

$$F = A_o k \ln \frac{A_o}{A_f} \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

Donde

k es la constante de extrusión y

A_o y A_f son las áreas transversales del billet y del producto respectivamente.

En la figura 5.13 se observa una gráfica donde se obtienen los valores de k para distintas temperaturas.

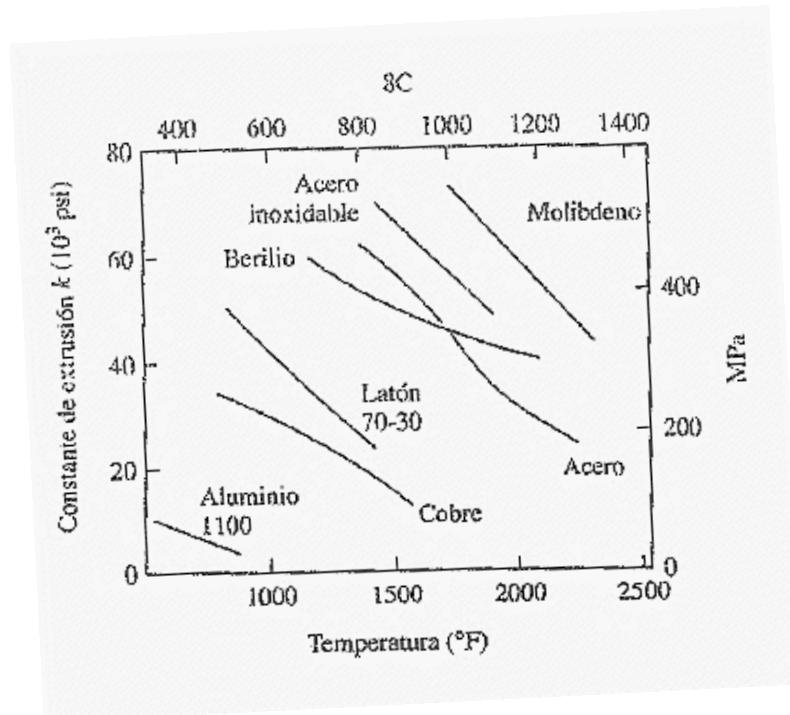


Figura 5.13 Grafica donde se muestra la constante de extrusión k para distintas temperaturas.

5.4 Flujo del metal en la extrusión

Es importante conocer el comportamiento del material que fluye en un proceso de extrusión así como en otros procesos de conformado, ya que son de gran influencia sobre la calidad y las propiedades del producto final. El material fluye en sentido longitudinal, en forma muy parecida a la de un flujo incompresible en un canal; por lo tanto los productos de un proceso de extruido tienen una estructura granular alargada.

La técnica para estudiar el flujo del material dentro de una matriz de extrusión es primero cortar el billet longitudinalmente por la mitad, luego dibujar una cara con una red cuadrículada. Se colocan las dos mitades en la matriz y se extruyen. A continuación se separan los productos y se estudian los patrones de las líneas de flujo que se marcaron. La figura siguiente nos muestra los patrones de las líneas de flujo

características obtenidas con la técnica descrita en extrusión directa con dados a escuadra (90°).

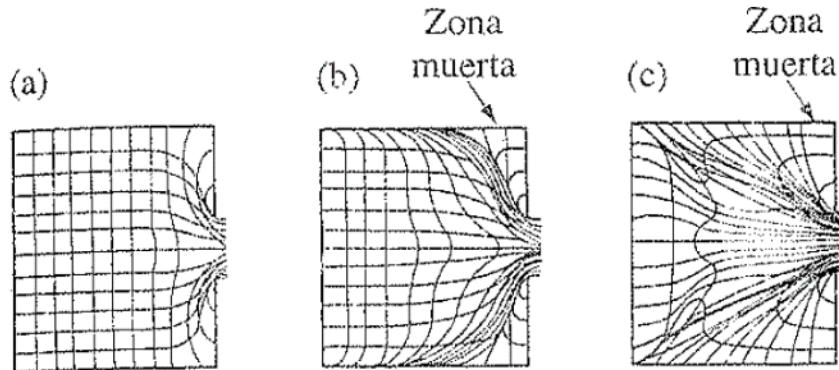


Figura 5.14 Flujos de metal al extruir con dados cuadrados, (a) Figura del flujo obtenido con baja fricción en una extrusión directa. (b) Patrón obtenido con gran fricción en contacto ente el billet y la matriz. (c) Patrón obtenido con alta fricción o con el enfriamiento del billet en la cámara. Este patrón es observado en metales cuya resistencia aumenta con rapidez al bajar la temperatura, provocando el defecto tubo.

5.5 Defectos en las extrusiones

De acuerdo con las condiciones iniciales del material y las variables en el proceso, los productos extruidos pueden desarrollar varios defectos que pueden afectar su resistencia y su calidad. Algunos defectos son visibles a los ojos humanos, mientras que otros solo pueden descubrirse con técnicas especiales. Existen tres defectos principales durante una extrusión: agrietamiento de la superficie, tubos y agrietamiento interno.

1. Agrietamiento de la superficie.

Si la temperatura, la fricción o la velocidad de extrusión es demasiado alta, la temperatura superficial aumenta considerablemente, y esta condición puede crear agrietamientos y desgastes superficiales. Estas grietas son intergranulares, es

decir ocurren en los límites de grano y suelen deberse a la fragilidad en caliente del material. Estos defectos suceden en especial con aleaciones de aluminio, magnesio, zinc.

Este fenómeno suele ocurrir a temperaturas menores, pero esto se explica por pequeñas cantidades de material que se queda pegado en las caras internas de la matriz, lo que crea un aumento en la presión. Estos defectos, por su similitud al tallo de la planta, son conocidos como defectos bambú, y se suelen evitar reduciendo las velocidades de extrusión o precalentando el billet.

2. Tubo.

En el proceso, el patrón de flujo tiende a jalar óxidos e impurezas superficiales hacia el centro del lingote o billet, casi como un embudo. Este defecto llamado tubo, también llamado tubo de escape o cola de pescado, se puede reducir modificando el patrón de línea del flujo, para formar un flujo más uniforme; controlando los parámetros de operación como son la fricción y la temperatura.

Otra forma de evitarlo es maquinando la preforma para evitar la formación de costras de óxido y de impurezas superficiales, o con ataques químicos.

El defecto tubo puede presentarse hasta en una tercera parte del material final, por lo cual se debe cortar.

3. Agrietamiento interno.

En el centro del producto se pueden desarrollar grietas, que tienen diversos nombres: grieta central, reventones central, fractura en forma de punta de flecha, o fracturas de Chevron. Las cuales se atribuyen a un estado de esfuerzos de tensión hidrostáticas en la línea central, en la zona de deformación del dado, caso muy

similar a la región de estrangulamiento en los especímenes sometidos a la prueba de tensión.

Este defecto aparece en las superficies internas de los tubos extruidos por las mismas causas.

La tendencia del agrietamiento central aumenta si se incrementa el ángulo del dado, si se aumenta la concentración de impurezas, y disminuye si se aumenta la relación de extrusión y la fricción.

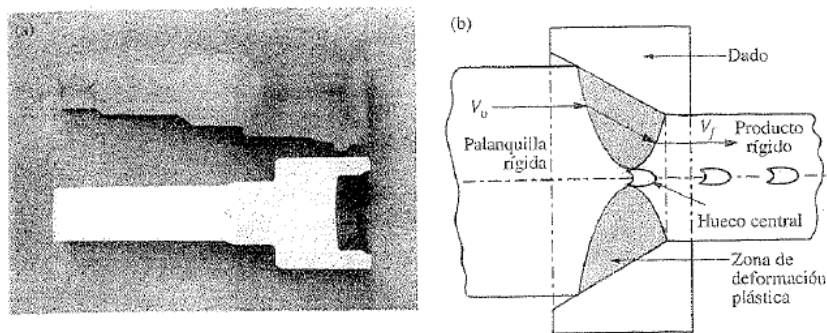


Figura 5.15 Agrietamiento con patrón Cheverón (Hueco Central) en billets o tochos de acero extruido.

CAPITULO 6

SOLDADURA.

La soldadura es una de los métodos existentes para la unión de dos o mas piezas metálicas que han resultado vital en el desarrollo de incontables estructuras y elementos de máquinas y mecanismos. Esto se debe a la relativa simplicidad de su empleo y a la gran efectividad que se obtiene. La soldadura al igual que otros procesos usados en la ciencia, la ingeniería y la tecnología ha avanzado mucho y se ha desarrollado a una gran velocidad; así como una gran variedad de procesos de soldadura que permiten una mayor área de aplicaciones.

6.1. Introducción

La soldadura puede definirse como un proceso de unión de partes metálicas, principalmente implicando la cohesión localizada de ellas por fusión y/o presión, generalmente con un elemento material base, con un proceso que conlleva la formación de cristales comunes por difusión en la frontera de la unión.

Dentro de las características más importantes que se deben considerar y tener presentes en todo proceso de soldaduras son: la composición química del material de las piezas sometidas a la unión, el tamaño del grano de la estructura interna y el espesor de la placa.

A continuación, se explican un poco más los puntos mencionados.

6.2. Composición química

El elemento químico que más afecta la soldabilidad es el carbono, sin embargo el efecto de otros elementos también se tiene en cuenta mediante la formula de carbono equivalente. Se obtienen mejores resultados en la soldadura a medida en

que el carbono contenido en los materiales a soldar sea menor, debido a que la máxima dureza y la fragilidad, que un acero puede llegar a alcanzar después de un rápido descenso de temperatura con medios enfriadores, es directamente proporcional al carbono equivalente. Esta relación se puede observar la figura 6.1

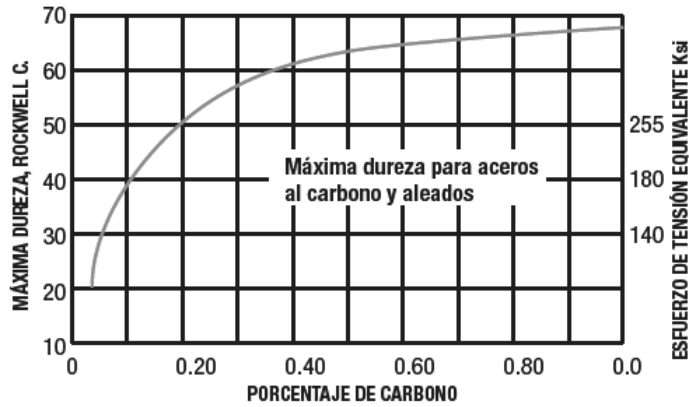


Figura 6.1 Máxima dureza obtenida para tasas de enfriamiento elevadas en función del porcentaje de carbono en el acero.

Los elementos aleantes cromo, níquel y molibdeno en los aceros permiten el endurecimiento con bajas tasas de enfriamiento, incluso aumentando la dureza a distancias alejadas de la superficie, el precalentamiento es la solución más común para la disminución de la tasa de enfriamiento y dureza. Los electrodos son diseñados usualmente para depositar un material de aporte con un contenido el 0.008% al 0.12% de carbono para evitar el agrietamiento.

6.2.1. Tamaño de grano

La diferencia en los tamaños de grano en un material o pieza metálicos es definido por los procesos que le dieron origen como es la fundición e incluso los tratamientos térmicos posteriores a su fundición, y es importante considerar el tamaño de grano

ya que el proceso de soldadura se vera con mejores resultados para aceros de grano fino; El tamaño de grano es una de las principales variables que afectan la ductilidad y la resistencia de un material al impacto, así como propiedades como la dureza y la tenacidad. Recordemos que un grano es una porción del material donde el arreglo atómico interior es cristalino o se considera casi idéntico en todas las partes de su red cristalina. La zona donde se juntan dos o más granos del material es denominada límite de grano, lugar donde se localizan las dislocaciones producto de cargas externas; origen de los defectos lineales y uno de los principales aspectos en el estudio del tamaño de grano.

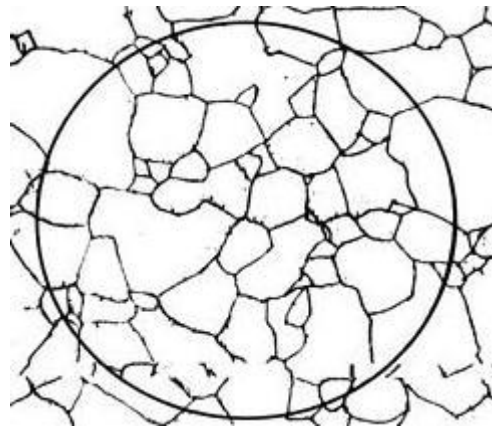


Figura 6.2 Tamaño de grano en un metal

Es importante en el manejo de materiales controlar el tamaño de grano, ya que al reducirlo, el material aumentara su cantidad de granos y por tanto la cantidad de límites de grano, aumentando finalmente las propiedades que ya se han mencionado, pero que estas dan paso a un mejor proceso de soldadura.

6.2.2. *Espesor del material*

En general, si el espesor a ser soldado disminuye, se mejora la soldabilidad del material. Las láminas gruesas absorben el calor con tasas de enfriamiento más rápidas que las láminas delgadas usando el mismo tipo de soldadura. Una solución parcial a este problema es el precalentado de la pieza a unos 100 °C y mantener la temperatura durante el proceso de soldadura.

6.3. Tipos de soldadura

Los procesos de soldadura más conocidos son: Arco eléctrico, soldadura por llama, soldadura por puntos, soldadura por presión, entre otros.

6.3.1. Soldadura por arco eléctrico.

Es un método de soldadura donde la unión se realiza por medio de la fusión del material de las dos piezas a soldar. El calor necesario para lograr la fundición del material es obtenido mediante un arco eléctrico creado entre las piezas y un electrodo que puede ser de aporte, es decir que se funde y brinda su material como medio de unión en el acople; o bien puede ser un electrodo que no sea de aporte y solo funde los materiales y se suelden.

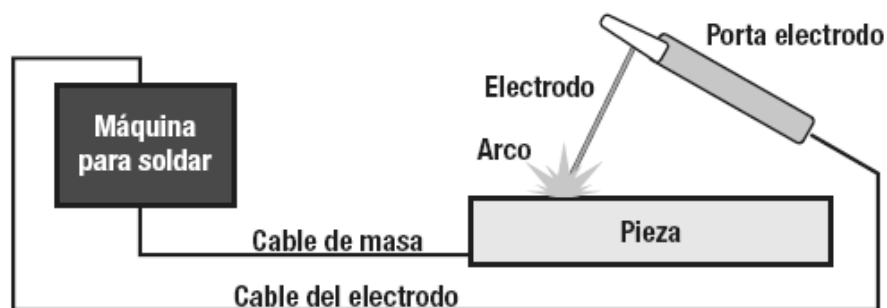


Figura 6.3 Esquema general del método de soldadura por arco eléctrico.

El electrodo normalmente es una varilla recubierta, la cual se evapora logrando una atmosfera protectora lo cual garantiza que el proceso de que se puedan juntar los materiales localmente fundidos.

6.3.2. Configuraciones de la soldadura y posiciones del electrodo.

En la siguiente imagen se muestran algunas de las configuraciones de las uniones mediante soldaduras, así como las posiciones del electrodo durante el proceso de soldadura.

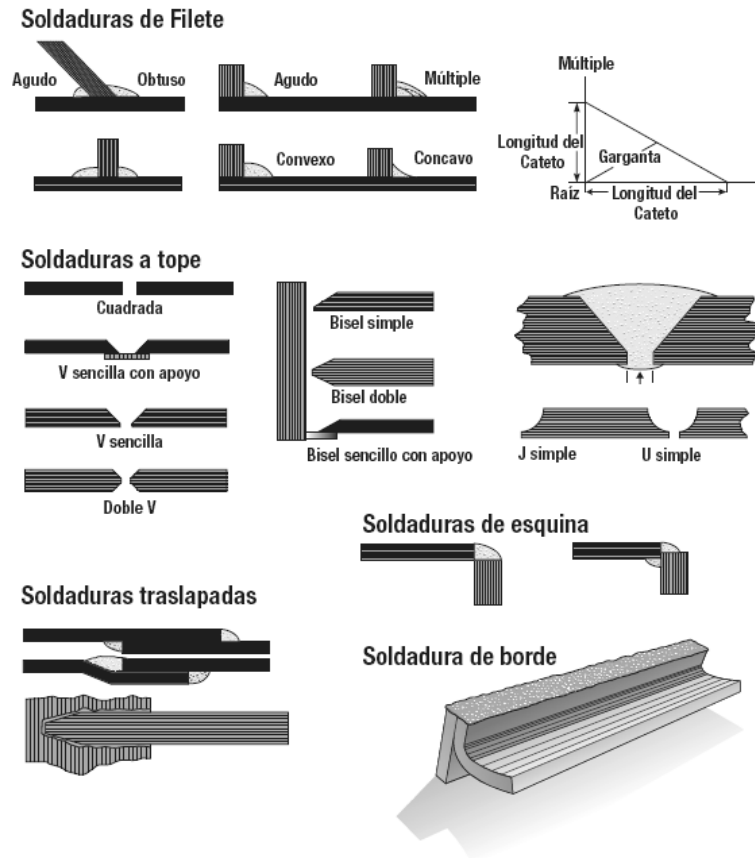


Figura 6.4 Configuración de los tipos de soldadura.

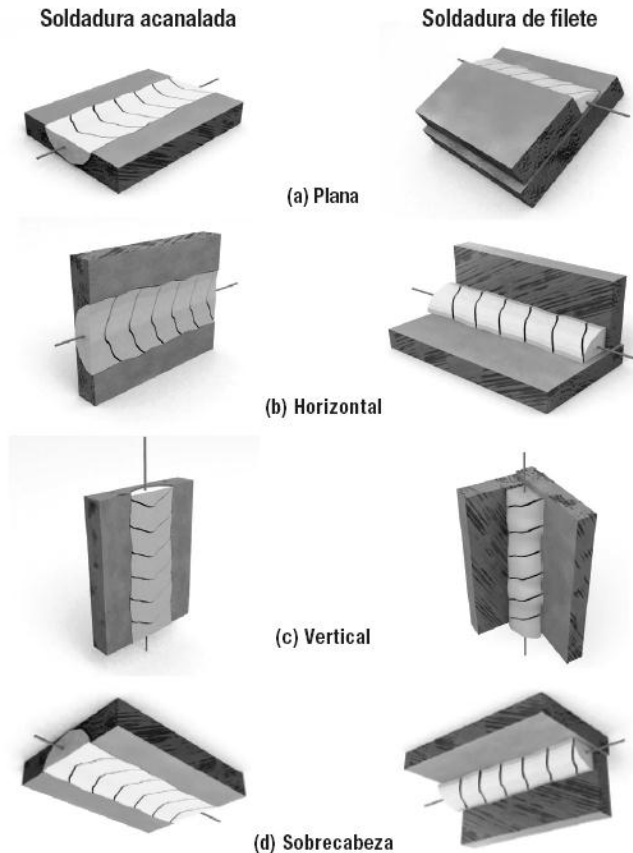


Figura 6.5 Diferentes configuraciones de la posición del electrodo al soldar.

La soldadura por arco con electrodo revestido se le conoce por las siguientes denominaciones:

- SMAW. Shielded metal-arc welding (ANSI/AWS A3.0)
- 111, Soldadura metálica por arco con electrodo revestido (EN 24063)
- MMAW, Manual metal-arc welding (Reino Unido).

Ventajas:

- Este equipo se considera relativamente sencillo, no muy caro y portable.
- Tanto como el metal de aportación y medios para su protección durante el soldadura se originan del propio electrodo revestido. No se requiere una protección adicional por medio de gases auxiliares o fundentes granulares.

- Aunque es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que procesos con protección gaseosa este debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- De muy fácil el manejo ya que puede usarse en cualquier posición, lugares abiertos o cerrados o con restricciones de espacio. No necesita conducciones de agua ni tuberías de gases de protección, por lo que relativamente puede ser usado en lugares alejados de la fuente de energía.
- Aplicable a espesores variados (en general mayores de 2 mm.).
- Aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

Limitaciones:

- No es un proceso rápido, debido a la necesidad de retirar escoria y la baja tasa de deposición razones por las cuales ha sido desplazado por otros procesos en algunas aplicaciones.
- Este proceso requiere de una gran habilidad por parte del soldador.
- Para metales como el plomo, estaño, zinc, y aleaciones no es aplicable dado su bajo punto de fusión ya que el calor del arco es excesivo para estos. De igual forma para metales como titanio, niobio, tantalio, circonio no es aplicable debido a su alta sensibilidad a la oxidación ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura
- No es aplicable a espesores por debajo de 1.5-2mm.
- A pesar de que teóricamente se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5mm, este proceso no resulta provechoso para espesores mayores a 38mm.

Aplicaciones:

Utilizado especialmente en soldaduras de producciones cortas, trabajos de mantenimiento y reparación y construcciones de campo.

La mayor parte de aplicaciones de este proceso se da en espesores comprendidos entre 3 y 38mm.

Es aplicable a aceros al carbono, aceros aleados, inoxidable, fundiciones y metales no ferreos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones.

Los sectores con una mayor aplicación serían la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques, puentes, recipientes a presión, calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y cualquier tipo de trabajo similar.

Pueden ser empleados en combinación con otros procesos, realizando la pasada de raíz o las de relleno.

6.3.3. Soldadura por flama, llama o gas

El potencial eléctrico necesario para llegar a la coalescencia del metal base se obtiene de la llama generada en la quema de un combustible que puede ser gas natural, gasolina, acetileno, gas butano, gas propano, etc.: en la presencia de oxígeno, O_2 . Normalmente el metal es de aporte desnudo o sin recubrimiento y puede llegar a alcanzar temperaturas de hasta $3300^{\circ}C$ dependiendo del material base.

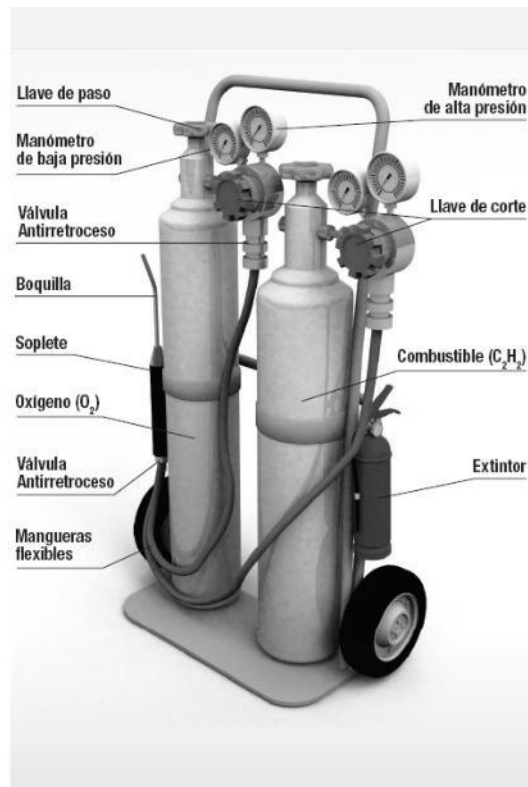


Figura 6.6 Esquema general del equipo utilizado en el soldado por flama.

Ventajas:

- El soldador tiene control sobre la fuente de calor y la temperatura de una forma independiente al control del metal de aportación.
- El equipo de soldadura necesario para este procedimiento es de bajo costo, regularmente portátil y versátil ya que puede ser utilizado para otras operaciones relacionadas con el soldadura como: oxicorte, pre y pos calentamiento, enderezado, doblado...etc. Con solo intercambiar o añadir algún accesorio.

Limitaciones:

- Se producen deformaciones y tensiones internas causadas por un elevado aporte térmico debido a la lenta velocidad de soldadura.

- Este proceso es lento, de una baja productividad y para espesores pequeños exclusivamente. Ya que aunque se pueda aplicar a espesores grandes resulta más económico para estos utilizar el soldadura por arco eléctrico.

Aplicaciones:

Las ventajas previamente enunciadas hacen que el soldadura oxigas sea el indicado para:

- Trabajos en campo.
- Pequeñas producciones.
- Reparaciones por soldadura.
- Pequeños espesores.
- Soldaduras con cambios de dirección o posición bruscos.

Con este proceso pueden soldarse metales y aleaciones férreas y no férreas, a excepción de metales refractarios, que pueden ser utilizados a altas temperaturas (volframio, molibdeno y tantalio) y de los activos (titanio y circonio).

Equipo de soldadura oxiacetilénico.

La principal función de estos equipos es suministrar la mezcla de gases (combustible y comburente) a una velocidad, presión y proporción adecuadas.

6.3.4. Soldadura por Arco Protegido con Gas

Los procesos de soldadura por arco protegidos por gas más comunes son:

- Soldadura TIG.
- Soldadura MIGIMAG.
- Soldadura por plasma.

La principal función de los gases de protección es evitar que el metal, el baño de fusión y el electrodo se oxiden o contaminen con impurezas. Ya que si el aire entrara en contacto con el metal ya fundido el oxígeno del aire produciría óxido, el nitrógeno causaría porosidad y la humedad tanto porosidad como grietas.

Otra importante función de los gases de protección es la de hacer más fácil la transferencia de material en la soldadura por arco, ionizándose para lograr el estabilizar el arco y la formación de la columna de plasma.

Gases de protección.

Básicamente se utilizan 3 gases como protección durante el proceso de soldadura.

- Argón.
- Helio
- Dióxido de Carbono

Estos gases pueden usarse separados o mezclados entre sí. En algunos casos se añade:

- Oxígeno.
- Hidrógeno.
- Nitrógeno

Propiedades de los gases.

Las características o propiedades a tener en consideración de los gases son:

- Energía de ionización
- Densidad
- Conductividad

Energía de ionización.

Al establecerse el arco eléctrico el gas circulante se ioniza, en otras palabras se produce la separación, con carácter reversible.

También los gases formados por más de un átomo como el nitrógeno o el hidrogeno se disocian, es decir se produce la separación con carácter reversible de sus iones en los átomos.

Para obtener estos fenómenos (ionización y disociación), es necesario suministrar al gas una energía denominada respectivamente (de ionización y disociación).

En ambos casos esta energía es suministrada por el arco eléctrico durante el proceso de soldadura.

Cuando el gas (ionizado o disociado) entra en contacto con la pieza a soldar se enfría y el plasma se convierte de nuevo en gas, es decir tanto los iones y átomos se unen de nuevo formando el mismo gas previo a la operación de soldadura. Al unirse los átomos es liberada la energía de ionización o disociación que es transmitida a la pieza.

Densidad.

En tanto mayor sea la densidad del gas, se necesitara menor caudal para obtener la misma protección ya que cubrirá de forma más fácil la zona de soldadura.

Conductividad térmica.

El término se refiere a la facilidad para transmitir el calor. En tanto la conductividad térmica sea grande la distribución de temperatura en el arco será más homogénea, originando cordones más anchos y penetración más uniforme.

TIG

El soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible se llama TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza como fuente de energía el arco eléctrico formado entre el electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras el gas inerte protege el baño de fusión.

El material de aportación, cuando de necesita utilizar, se aplica por medio de varillas como en el soldadura oxiacetilénico.

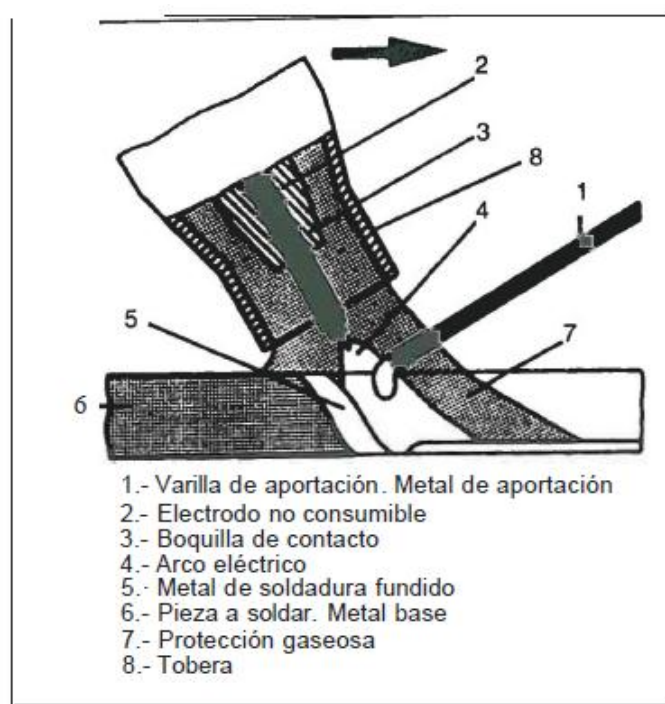


Figura 6.7. Esquema del proceso TIG.

La soldadura TIG también recibe las denominaciones de:

- GTAW, Gas Tungsten Arc Welding (ANSUAWS A3.0).
- 141, Soldadura por arco con electrodo de wolframio y gas inerte (EN 24063).
- Soldadura por arco con electrodo de wolframio (UNE 14-100).
- Gas-Shielded Tungsten-Arc Welding (Reino Unido).

Ventajas.

- Es un proceso adecuado para unir la mayoría de los metales.
- Arco estable y concentrado.
- Aunque en esencia es un proceso manual se ha automatizado para fabricaciones en serie.
- No se produce escoria.
- No se produce proyecciones (al no existir transporte de metal en el arco).
- Genera soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con y sin el metal de aporte, todo dependiendo de la aplicación.
- Se puede usar en todo tipo de uniones y posiciones.
- Soldaduras de gran calidad
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- Permite control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación.

Limitaciones.

- La tasa de deposición es baja en comparación con la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco (en soldadura automática esto se puede solucionar con la técnica de alambre caliente).
- En general la aplicación manual requiere de gran habilidad por parte del soldador.
- Para espesores mayores de 10mm no resulta económico.
- En corrientes de aire puede resultar difícil obtener una protección adecuada de la zona de soldadura.

Aplicaciones

Este proceso se puede utilizar en la soldadura de todos los materiales, incluido el aluminio y magnesio y materiales sensibles a la oxidación como titanio circonio y sus aleaciones.

Es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía nuclear, y aeroespacial.

Debido a que la tasa de deposición es baja, no resulta económico para la soldadura de materiales con espesores mayores de 6-8mm. En estos casos el TIG se usa para la pasada de raíz y después se emplean otros procesos de más productividad para las pasadas de relleno.

Factible también para realizar soldaduras por puntos y por costuras.

Equipo de soldadura requerido.

El equipo básico para el soldadura TIG consiste en una fuente de energía, porta electrodos, electrodos, cable de soldadura, botellas de gas inerte y manjeras para la conducción del gas.

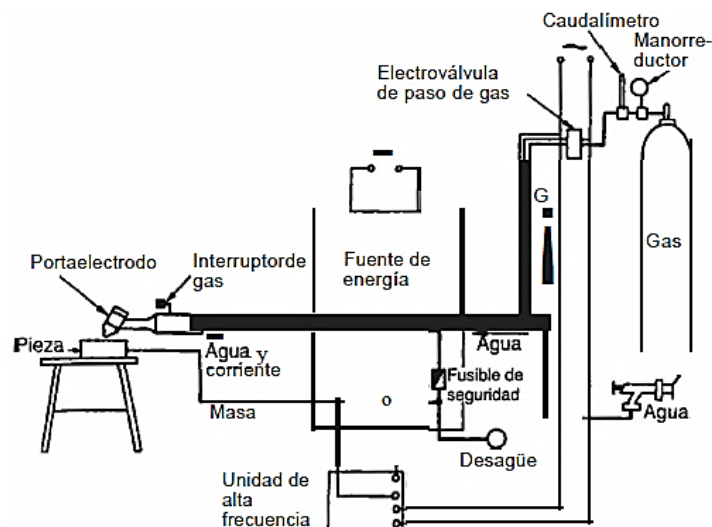


Figura 6.8. Instalación de soldadura TIG, con portaelectrodos refrigerado con agua y con unidad de alta frecuencia

MIG/MAG

La soldadura por arco eléctrico con protección de gas, es un proceso en el cual el calor necesario es generado por un arco que se origina entre un electrodo consumible y el metal a soldar.

Tanto el electrodo como el arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base quedan protegidas en contra de la contaminación de los gases atmosféricos mediante una corriente de

Gas que se aporta por la tobera de la pistola, concéntricamente al alambre/electrodo. Proceso el cual queda representado en la figura 6.9

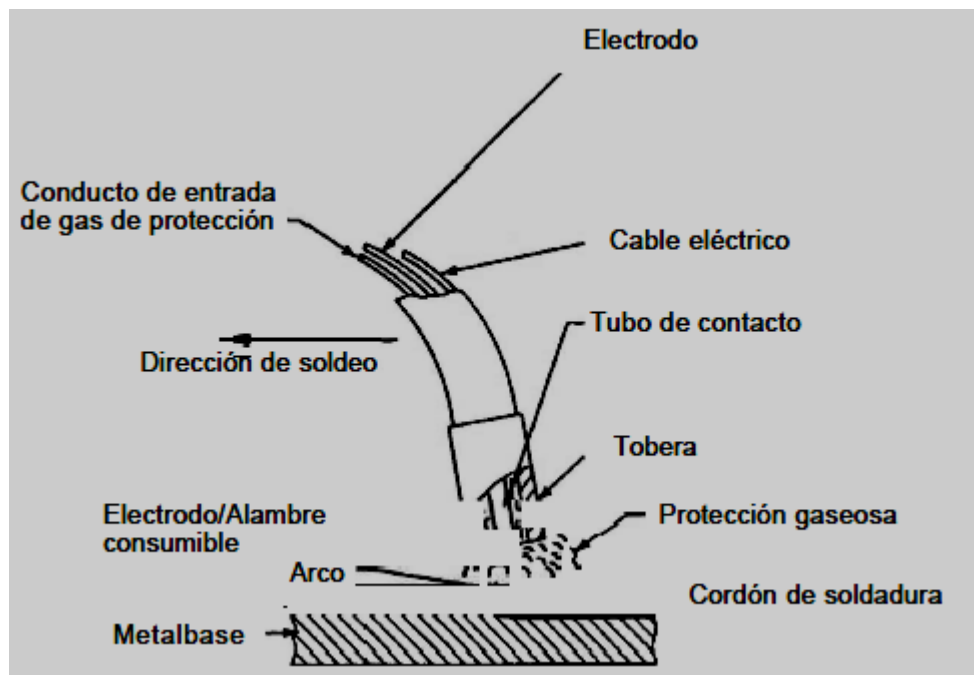


Figura 6.9. Soldadura por arco con gas.

El proceso de soldadura por arco con gas se denomina también:

- GMAW, gas metal arc welding (ANSUAWS A3.0)
- 13, Soldadura por arco con gas (EN 24063).

Si se emplea un gas inerte como protección el proceso se denomina:

- MIG, metal inert gas (ANSUAWS A3.0).

- 131, soldadura por arco con gas inerte (EN 24063).

Si se utiliza un gas activo como protección en el proceso se denomina:

- MAG, metal active gas (ANSUAWS A3.0).
- 135, soldadura por arco con gas activo (EN 24063).

Este proceso de soldadura puede ser automático o manual, al manual se le llama también semiautomático.

Ventajas.

- Se puede soldar cualquier tipo de material.
- La tasa de deposición es elevada y el electrodo es continuo por lo que no es necesario cambiarlo y aumenta la productividad.
- La velocidad de soldadura es mucho mayor a la conseguida con SMAW
- Se puede realizar cordones largos sin la necesidad de que existan empalmes entre cordones.
- No se necesita eliminar la escoria ya que esta no existe.

Limitaciones.

- El equipo para este proceso es más costoso, complejo y menos transportable que el de SMAW
- Es difícil trabajar en espacios restringidos y se necesita conducciones de gas y agua de refrigeración, tanques de gas de protección, tuberías por lo que no puede realizarse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Es sensible a corrientes de aire así como al viento por lo que su uso al aire libre es limitada.

Equipo de soldadura.

- Fuente de energía.
- Fuente de suministro de gas.
- Sistema de alimentación de alambre.
- Pistola (refrigerada por aire o por agua)
- Sistema de control.
- Carrete de alambre/electrodo (de alambre que actúa como electrodo y como metal de aporte).
- Sistema de regulación para el gas de protección.
- Sistema de circulación de agua de refrigeración para las pistolas refrigeradas por agua.
- Cables y tubos o mangueras.

6.3.5. Soldadura con alambre tubular.

En este proceso llamado soldadura con alambre tubular el calor del arco establecido entre un alambre- electrodo consumible continuo y la pieza, genera la soldadura.

La protección es obtenida del fundente el cual se encuentra dentro del alambre tubular pudiéndose usar con o sin gas de protección adicional.

Este proceso combina las características de soldadura de electrodo revestido, soldadura por arco sumergido y el soldadura MIG/MAG.

Esta técnica se diferencia del soldadura MIG/MAG en el tipo de electrodo. Es un alambre hueco y relleno de fundente, el cual al momento de fundirse por acción del arco eléctrico, vierte un metal fundido protegido con una fina capa de escoria.

Dentro de este proceso se pueden encontrar 2 variantes:

- Auto protegido (self-shielded ó innershielded) figura 1.8: esta protege al baño de fusión por medio de la descomposición y vaporización del fundente.

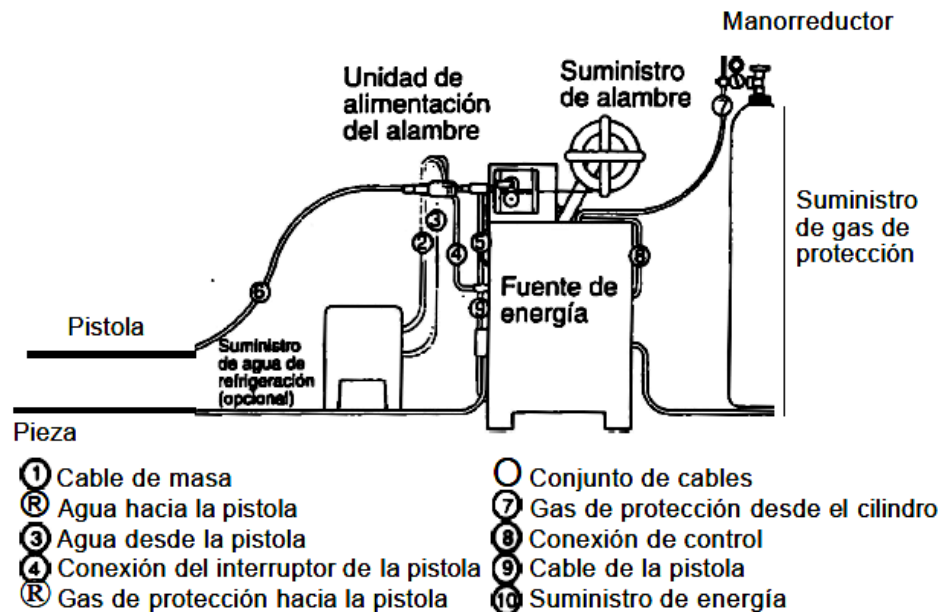


Figura 6.10. Equipo para soldadura MIG/MAG

- Con protección de gas (gas-shielded ó outershielded) figura 1.9: suelen ser CO_2 o mezclas entre argón y CO_2 , que usa gas de protección además de la acción protectora del fundente.

En ambos casos el electrodo forma una escoria que cubre y protege el metal hasta que se solidifica y en ambos la protección obtenida del arco puede soportar el viento y los agentes atmosféricos en mayor grado que los procesos TIG, MIG/MAG.

Este es un proceso semiautomático aunque también puede usarse en una soldadura automatizada o mecanizada.

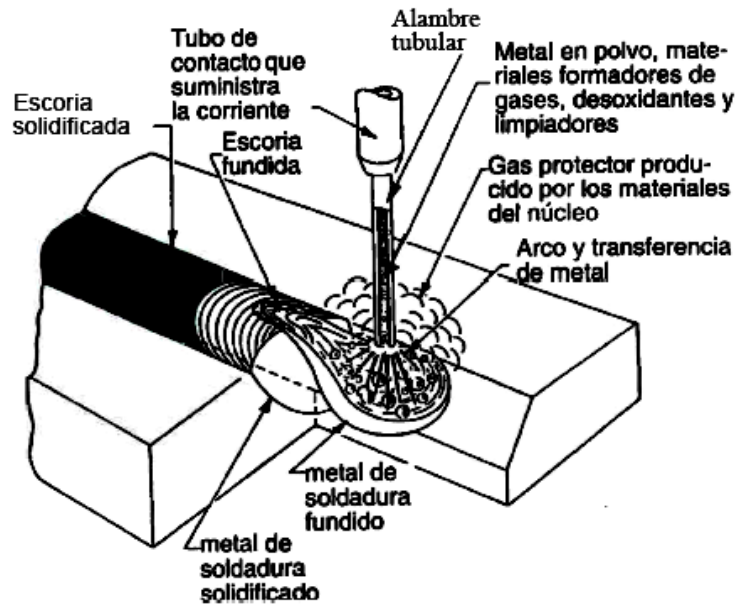


Figura 6.11. Proceso de alambre tubular autoprotegido

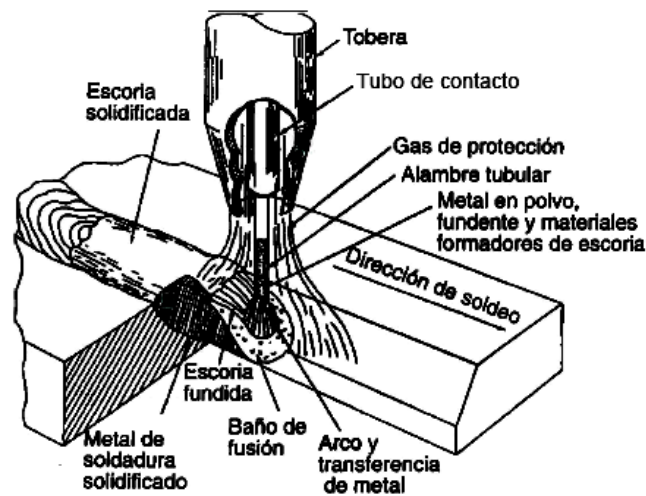


figura 1.9 PROCESO CON ALAMBRE TUBULAR CON PROTECCIÓN GASEOSA

Figura 6.12. Proceso con alambre tubular con protección gaseosa

Al proceso de soldadura con alambre tubular y protección gaseosa se le conoce como:

- FCAW-G, gas shielded flux cored arc welding (ANSYAWS A~.O).
- 136, Soldadura por arco con alambre tubular con protección de gas activo (EN 24063).

- 137, Soldadura por arco con alambre tubular con protección de gas inerte (EN 24063).

Al proceso de soldadura por arco con alambre tubular sin protección gaseosa se le conoce como:

- FCAW-S. self-shielded flux cored arc welding (ANSI/AWS A3.0).
- 114, Soldadura por arco con alambre tubular sin protección gaseosa (EN 24063).

Aplicaciones Ventajas y Limitaciones.

Es utilizado para aceros de bajo carbono, baja aleación inoxidable y fundiciones.

Para la correcta elección del proceso ya sea autoprotegido o protegido con gas depende de las propiedades mecánicas deseadas tipo de alambre disponible y tipo de unión. Por lo general se usa autoprotegido en las mismas aplicaciones en las que se usaría el soldadura con electrodo revestido.

Mientras que el protegido por gas se unas en aquellas aplicaciones en las que se usa MIG/MAG.

De la misma forma que los electrodos revestidos, los alambres usados en este proceso generan por sí mismo el gas protector el cual se genera en el arco por lo que le afecta de una forma baja las corrientes de aire haciendo este mismo un proceso ideal para condiciones climatológicas adversas.

Una desventaja frente al proceso MIG/MAG es el tiempo requerido para retirar la escoria y puede tornarse en un proceso no competitivo, específicamente en las pasadas de raíz. Otra desventaja sería la alta cantidad de humo generado que se producen durante la soldadura.

Frente a la soldadura con electrodo revestido, este proceso resalta gracias a una mayor productividad lo que genera una reducción de costo en el producto.

La mayor desventaja frente al soldadura con electrodo revestido es un mayor costo en el equipo, lo cual refleja una inversión inicial mayor.

Otras características del proceso de soldadura con alambre tubular.

- No requiere tanta limpieza del metal base al contrario del proceso MIG/MAG.
- Los electrodos son más caros que los macizos exceptuando a algunos aceros de alta aleación.
- Entre los campos de aplicación más común para este tipo de soldadura construcciones tales como: astilleros, estructuras de edificios, depósitos de almacenamiento, plataformas petrolíferas, tuberías para gaseoductos y oleoductos, puentes, reparación de maquinaria, etc., siendo posible utilizarlo en cualquier posición.

Equipo de soldadura.

Se puede utilizar el equipo de soldadura MIG/MAG para el soldadura con alambre tubular ya que ambos son similares, en el caso de soldadura con alambre auto protegido destaca la ausencia de gas de protección.

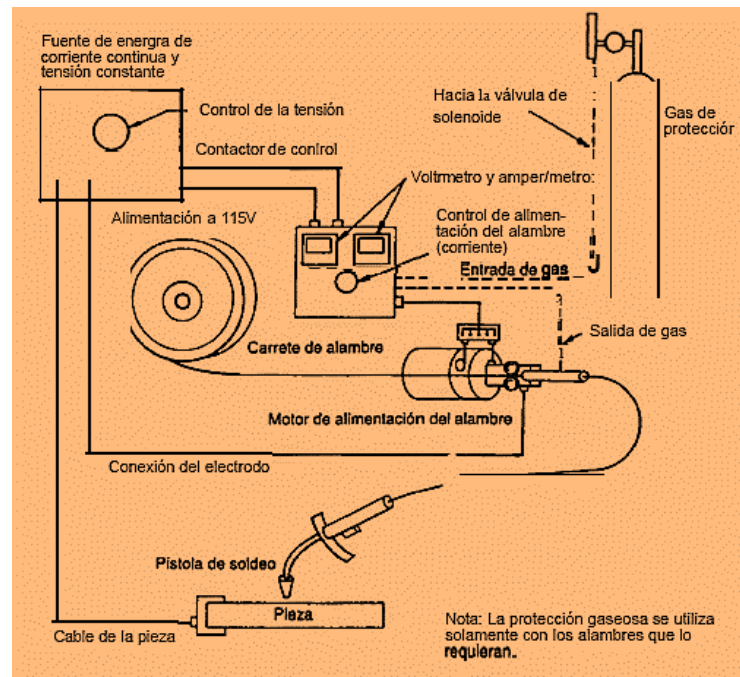


Figura 6.13. *Equipo para soldadura por arco con alambre tubular.*

6.3.6. Soldadura por arco sumergido.

Consiste en la fusión de un alambre -electrodo continuo y desnudo protegido por la escoria otorgada por el fundente sea granulado e en polvo, suministrado gracias a una manguera desde el depósito del fundente.

El proceso de soldadura por arco sumergido puede ser semiautomático o automático. En el semiautomático la pistola es llevada manualmente suministrándose automáticamente el electrodo. Prácticamente no es usado ya que este procedimiento puede incorporarse a procesos de soldadura totalmente mecanizados.

En el automático el proceso es realizado sin la ayuda de un operador lo que le permite obtener grandes rendimientos en producción, obteniendo soldaduras de calidad con altas tasas de deposición.

El arco eléctrico se establece entre el alambre metálico y la pieza a soldar.

El fundente protege al arco y el baño de fusión de la atmosfera circundante de tal forma que ambos permanecen invisibles durante el proceso.

Parte del fundente se funde con una función similar a la del recubrimiento en los electrodos revestidos: protege el arco, lo estabiliza, genera una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso permite añadir elementos de aleación, o compensar la pérdida de ellos.

El resto del fundente (no fundido) puede ser recuperado y reciclado en el proceso.

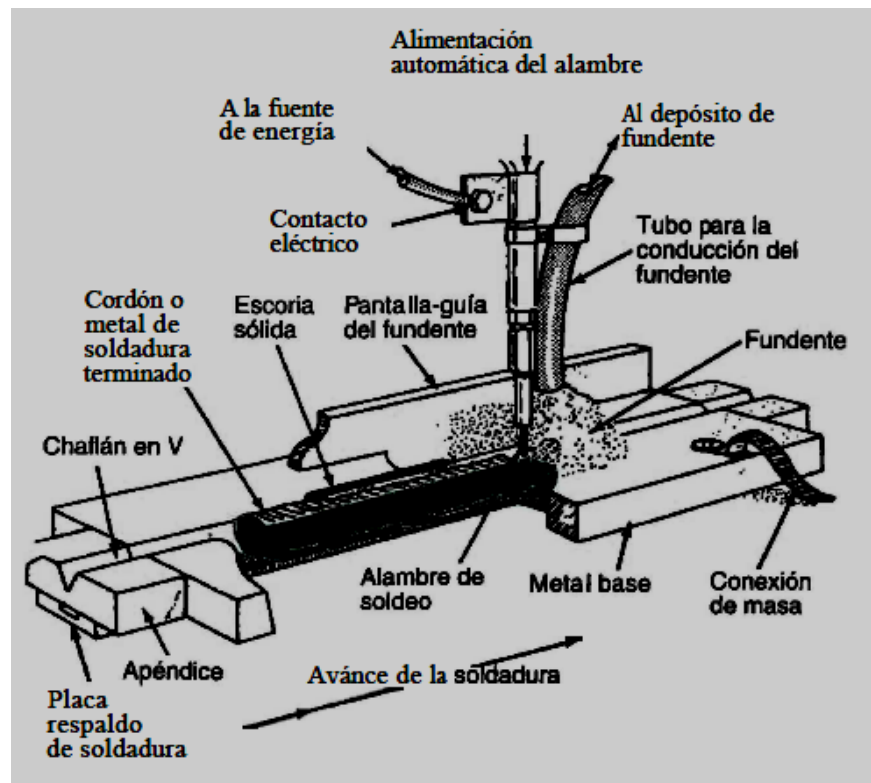


Figura 6.14. Representación esquemática del proceso de soldadura por arco sumergido

Aplicaciones ventajas y limitaciones.

- Se utiliza en un amplio rango de aplicaciones. Es utilizado en el soldadura de grandes conjuntos por la alta tasa de deposición, la alta calidad de la soldadura, la gran penetración obtenida y la capacidad se ser automatizada.

- Es muy usado en la fabricación de depósitos a presión, en construcción naval, en edificación, fabricación de tubería, fabricación ferroviaria así como en cualquier aplicación que requiera realizar soldaduras largas.
- Se pueden realizar soldaduras en materiales con espesores desde 1.5mm
- El proceso de soldadura por arco sumergido no es adecuado para todos los materiales.
- Es muy utilizado para el acero al carbono, aceros de baja aleación y aceros inoxidables. También puede ser usado en el soldadura de aceros de alta resistencia, de alto contenido en carbono y aleaciones de níquel, aunque se prefiere otros procesos con menores aportes térmicos.

Las limitaciones de este proceso serian:

- Es necesario un dispositivo para el almacenamiento, alimentación y recogida del fundente.
- El fundente está sujeto a contaminaciones que pueden producir defectos en la soldadura.
- En general, es un proceso no adecuado para unir metales de pequeño espesor
- Sólo se puede utilizar a tope en posición plana, PA, y en ángulo, PB

Equipo de soldadura.

Este se encuentra representado en la figura 1.13 y consta de :

- Fuente de energía.
- Sistema y panel de control.
- Cabezal
 - Sistema de alimentación del alambre.
 - Pistola de soldadura con tubo de contacto.
 - Tolva de fundente y manguera para su conducción.

- Sistemas de montaje y posicionamiento del cabezal.
- Equipo accesorio
 - Sistema de desplazamiento.
 - Sistema de recuperación del fundente.
 - Posicionadores y accesorios de sujeción.
 - Sistemas de seguimiento de la unión.

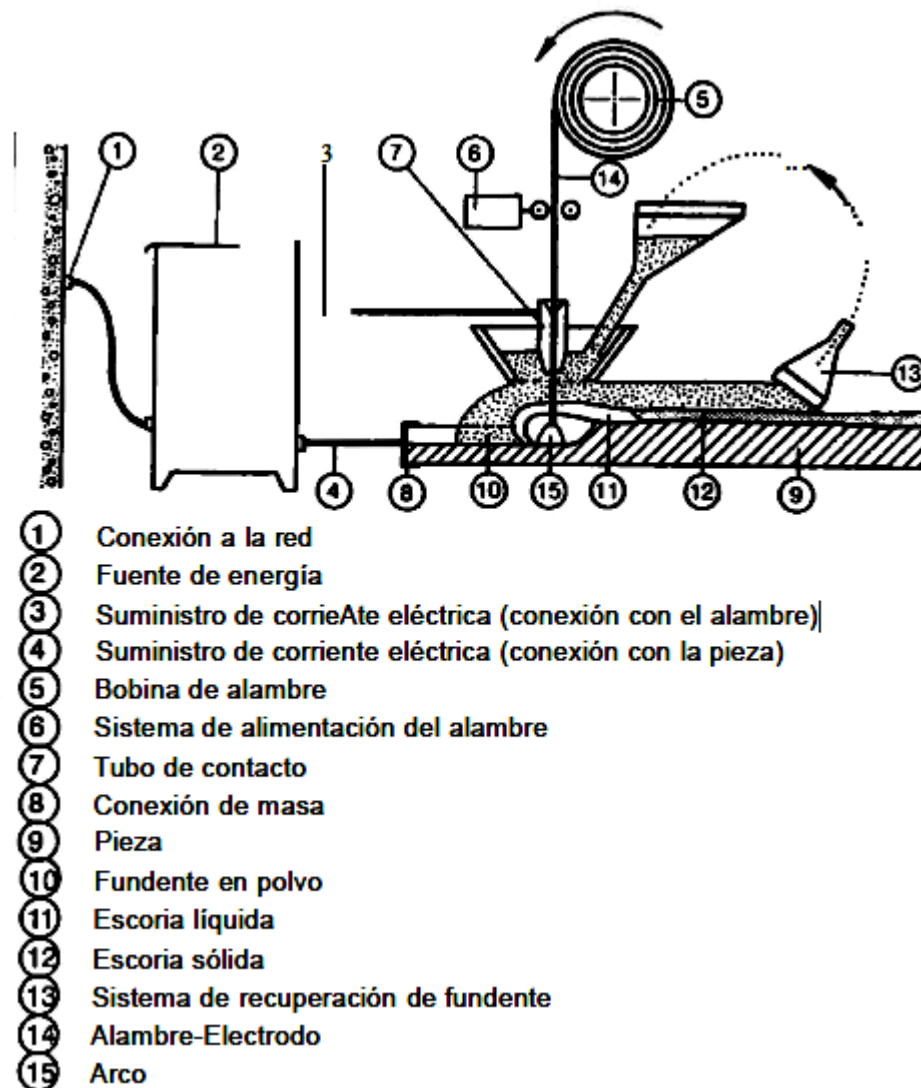


Figura 6.15. Equipo de soldadura por arco sumergido.

6.3.7. Soldadura aluminotérmica, de termita o soldadura de rieles

<http://estructurasacero.blogspot.mx/2007/06/soldadura-aluminotrmica-aluminotermia-o.html>

Surgió a fines del siglo XIX, cuando Hans Goldschmidt A G Alemania, descubrió que la reacción exotérmica entre el polvo de aluminio y un óxido metálico en polvo, puede iniciarse con una fuente de calor.

Es un proceso de soldadura principalmente utilizado para la construcción de rieles de vías férreas. Este es un proceso exotérmico en el que se da una reducción del óxido de hierro por el aluminio. La temperatura teórica para que se produzca la reacción es de 3100°C, sin embargo por la adición de compuestos no reactivos, la pérdida de calor por conducción y radiación, la temperatura se reduce a unos 2480 °C. La cual se considera cercana a la máxima tolerable, ya que el aluminio se evapora a 2500 °C, no obstante esta reducción en la temperatura debe regularse, pues la escoria de aluminio solidifica a los 2040°C.

Para mejorar el proceso se pueden adicionar ferro aleaciones compatibles a la química de las piezas a soldar, ya sea para aumentar la fluidez o para disminuir la temperatura de solidificación de la escoria. Las aplicaciones de este tipo de soldaduras son variadas entre ellas:

- **Soldadura de Rieles:** los que permiten hacer tramos continuos. Se puede realizar con o sin precalentamiento.
- **Soldadura de Reparación:** lo que permite reparar sectores dañados, usando moldes elaborados en el sitio.
- **Conexiones Eléctricas:** se usa una mezcla de termita y óxido de cobre (con polvo metálico para alear el cobre), se usan para unir conexiones de conductores y para

poner tomas a tierra en rieles de acero usando moldes de grafito para fundir el cobre de unión.

Las normas F.A.7001 de noviembre del 67, con resolución P. No 830/7 y la ALAF 5-032, grupo B con emisión en junio del 2002, de la Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles establecen las condiciones de preparación, procedimiento, herramientas, acabados, criterios de aceptación y rechazo, así como ensayos recomendados a la calidad de la soldadura.

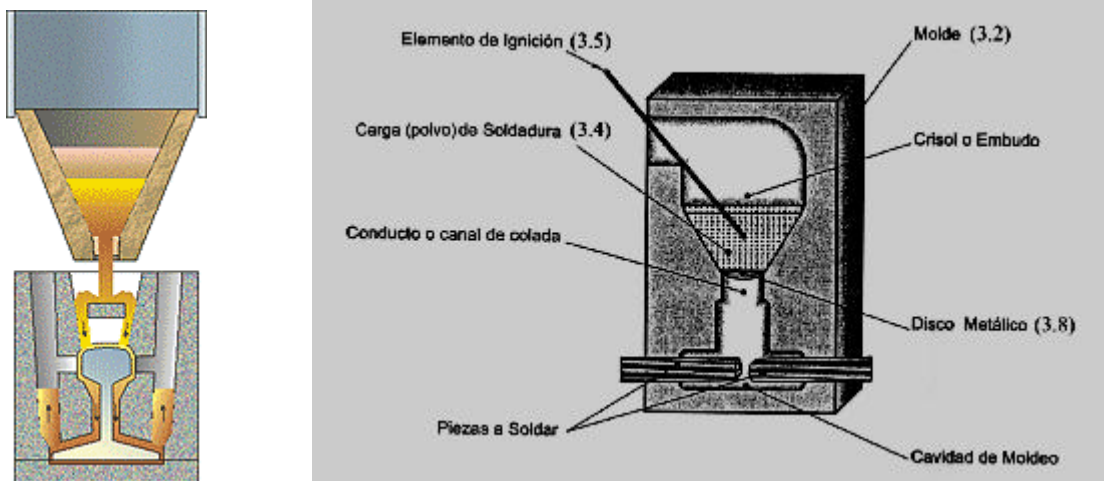


Figura 6.16.

El proceso de colocación de la soldadura, es el siguiente:

Preparación de la unión: se hacen guías dimensionales del tamaño real de la pieza, se colocan las piezas a una separación de 2 a 6 mm por la contracción posterior

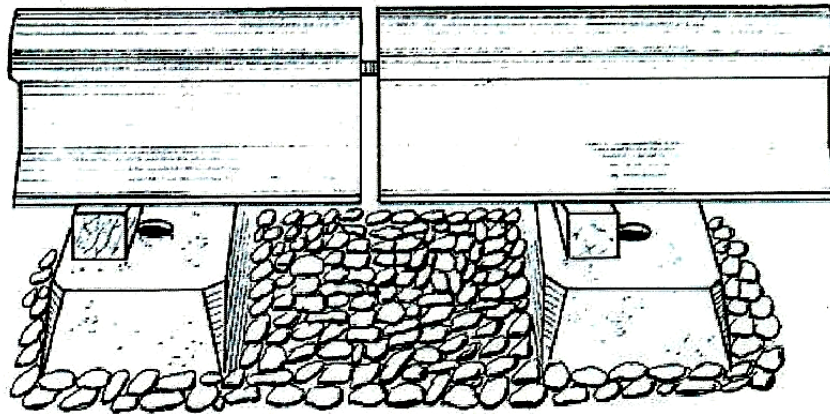


Figura 6.17.

Aplicación del Molde: se coloca el molde encima de los rieles, si la soldadura es muy grande se usa un patrón en cera de la cavidad a soldar, se recubre este patrón con arena refractaria después de colocado en la zona a soldar, se coloca el portillo de calentamiento en el centro o hacia la cara de mayor superficie.

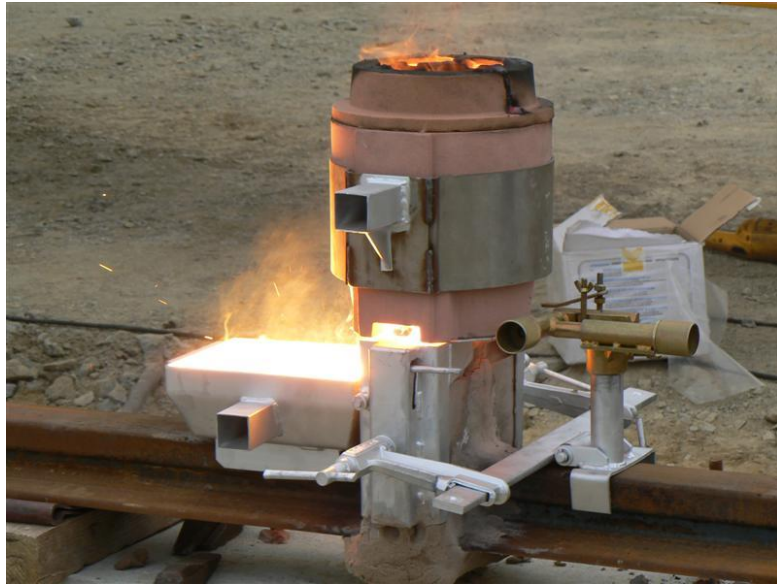


Figura 6.18.

Pre calentamiento: se derrite la cera con soplete y se deja escurrir, luego se aumenta el poder de la llama, secando bien todo el molde. Se precalientan las partes a soldar hasta los 800 a 1000°C, se cierra el portillo de calentamiento por donde ha escurrido la cera, con un tapón de arena.



Figura 6.19.

Colocación del Crisol: este es un recipiente de material refractario, en la zona superior se coloca un tapón de magnesita que se funde a la temperatura que se necesita para colar el metal. Se usan mezclas de termita para ajustar la temperatura en las secciones a soldar.



Figura 6.20

Colado del Material: después de alcanzadas las temperaturas de fundición (aprox. 2480°C), la primera cantidad de material que se coló, pierde temperatura (escoria), por lo cual se descarta por medio de los boquetes que posee el crisol a ambos lados.



Figura 6.21.

Retiro del molde: después del vertido se espera un lapso especificado por el fabricante de la porción de soldadura y se procede a romper el molde y cortar las rebabas, mediante trancha o corta mazarota.



Figura 6.22.

Pulido de la Soldadura: se debe de dar un acabado, más o menos, de 2 a 5 mm de soldadura, mientras se encuentre caliente la misma.



Figura 6.23.

Acabado Final: la soldadura está completamente terminada, lista para el uso.



Figura 6.24.

5.2.3 Soldadura por resistencia (por puntos)

Las partes a juntar en una soldadura antes de unir se presionan una contra otra por un electrodo. Se hace circular una corriente equilibrada y el potencial energético para a la coalescencia se obtiene el efecto Joule sobre los materiales a unir de mucha resistencia eléctrica, no se utilizan consumibles, ya que es un proceso automatizable para espesores delgados.

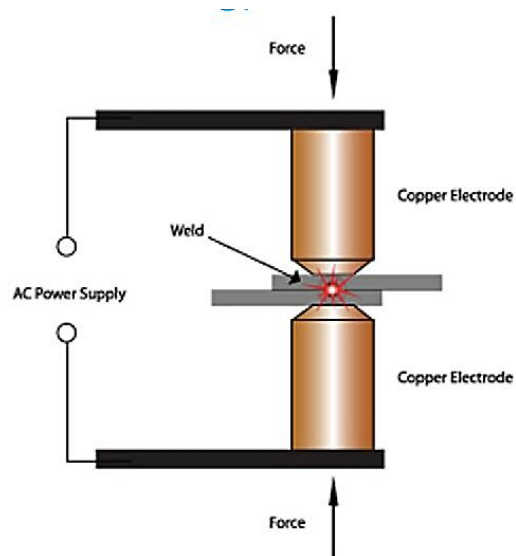


Figura 6.25. soldadura por puntos.

En diversos sectores el método de **soldadura por puntos** se aplica en las grandes industrias para la construcción o reparación de vagones, la manufactura de máquinas y aparatos, la ortodoncia, aunque es un proceso no industrial, soldadura de pilas y para industrias sumamente grandes como la automotriz y la aviación, donde se fabrican y reparan piezas con robots o máquinas portátiles que no requieren una mecanización posterior.



Figura 6.26. Aplicaciones de la soldadura por puntos.

6.3.8. Soldadura por presión

Se aplica calor a las piezas sin lograr la fusión total, se llevan los materiales hasta el estado plástico y se aplica una carga o una fuerza de presión hasta conseguir que los materiales se junten. Este es un proceso de soldadura que se incluye en los de naturaleza de forja, comúnmente llamado soldadura por forja.

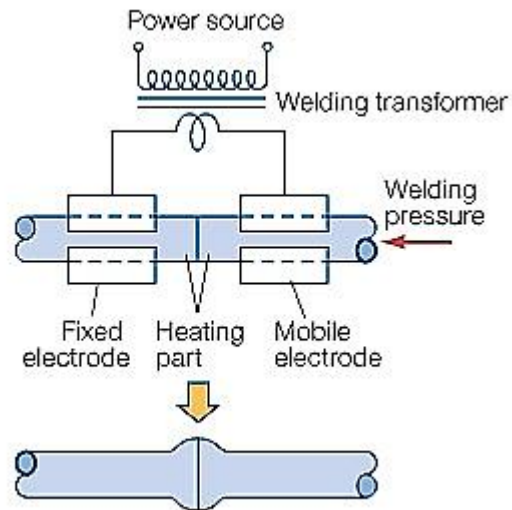


Figura 6.27. Soldadura por presión.

6.3.9. Zona afectada por el calor (ZAC)

En la figura 6.28 se muestra la distribución de temperaturas en las vecindades del material base al momento de aplicar cualquier tipo de soldadura.

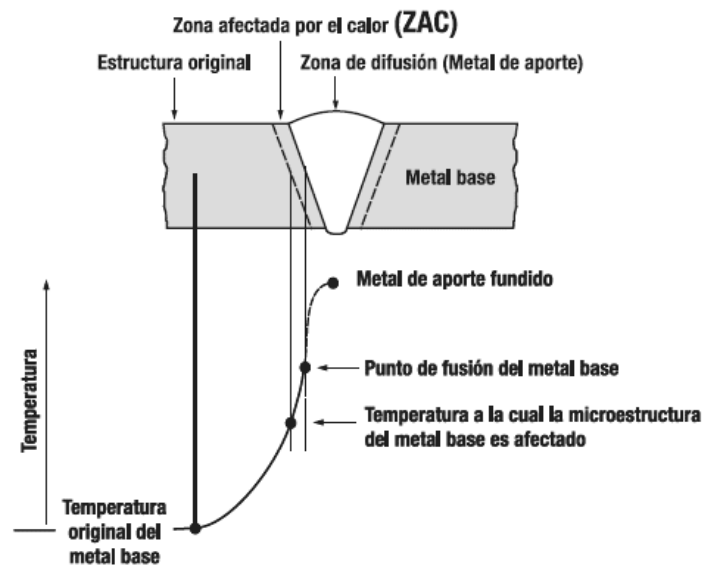


Figura 6.28. Distribución de la temperatura ZAC.

6.3.10. Ventajas y desventajas de la soldadura.

Ventajas:

- Bajo cargas estáticas no inducen concentraciones de esfuerzos importantes y por lo tanto se pueden reemplazar los remaches con un nivel muy bajo de ruido.
- Es un método de unión económicamente hablando muy ventajoso y para una producción efectiva de productos útiles.
- Puede requerir procesos mecánicos más simples que otros métodos de unión como son las roscadas, remachadas en determinados y distintos espesores, entre otros.
- Es un proceso flexible en que la maquinaria utilizada se puede adaptar fácilmente a cambios en el diseño con bajo costo herramental.

Desventajas:

- Limitado desempeño a cargas dinámicas que implica la realización de tratamientos mecánicos y térmicos para mejorarlo.
- Emisión de radiaciones y calor que pueden afectar la salud de los operarios.
- Elevada dificultad para la separación de los materiales ya fundidos.
- Requerimiento de operarios con la preparación y la capacitación suficiente para su realización.
- Introduce concentración de esfuerzos y tensiones residuales.
- Introduce deformaciones indeseables.
- Puede requerir de técnicas posteriores de inspección o ensayo especiales para garantizar la eficiencia de la junta y controlar los posibles defectos que pueden llegar a ser focos potenciales para la nucleación y crecimiento de

fisuras, especialmente en condiciones bajo cargas dinámicas o estáticas, así como ante ataques químicos.

- Su diseño puede implicar la aplicación de modelos de mecánica de fractura.

CAPITULO 7

ATORNILLADO Y REMACHADO.

Existen diferentes métodos empleados en la unión de estructuras metálicas en las industrias y a lo largo de la historia de estas. Casi todas las estructuras metálicas están formadas por diferentes elementos, o perfiles simples, que se unen entre sí para formar las estructuras. Es importante lograr una resistencia general solo se podrá lograr si garantizamos la correcta unión de los elementos y la transmisión de esfuerzos de unos a otros. Se analizan diversos tipos de unión, tanto de carácter fijo, como son remaches y soldaduras, y otros desmontables que en general son los tornillos.

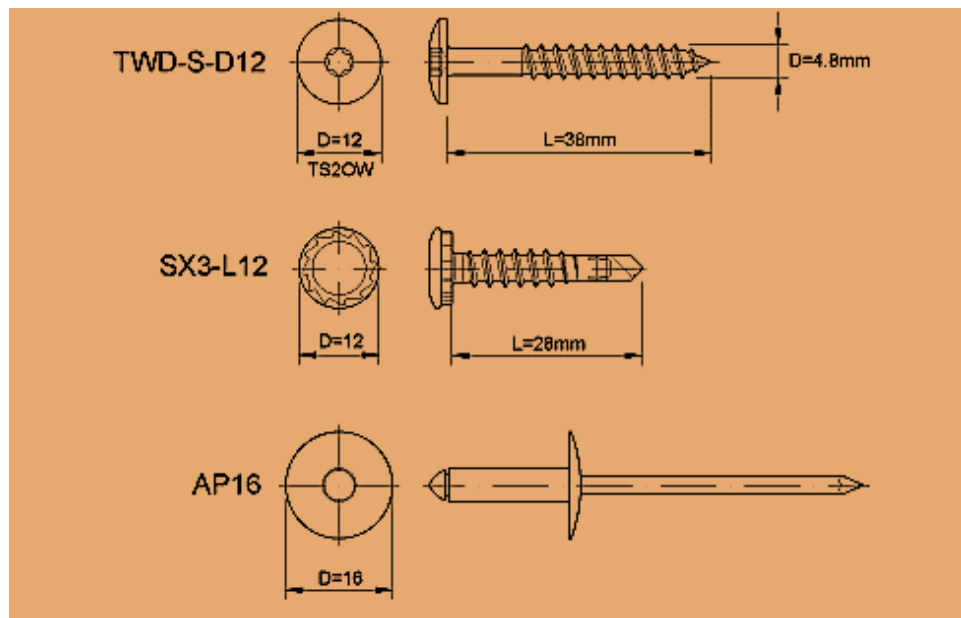


Figura 7.1 Ejemplos de tornillos y remaches.

Los remaches han sido el elemento de unión más empleado, pero sustituido hace tiempo por la unión mediante soldadura. Los tornillos son empleados generalmente

en uniones provisionales y de montaje, o en lugares donde no se dispone de la energía eléctrica necesaria para la ejecución de las soldaduras.

Cabe por último indicar otro tipo de unión, que es el de los tornillos de alta resistencia. Es el método de unión aparecido más recientemente y aunque semejante a las uniones remachadas o atornilladas resulta diferente en lo que respecta a la forma de transmisión de esfuerzos.

7.1 Introducción.

En todo tipo de construcción metálica, y especialmente en el caso de las estructuras metálicas de edificación, resulta indispensable enlazar los perfiles entre sí para formar barras compuestas, así como fijar estas mismas al resto de la estructura, logrando un conjunto estructural funcional.

Se denominan uniones, o costuras de fuerza, al acoplamiento de dos o más perfiles metálicos en una junta, empalme, y otras uniones o costuras de simple o complejo acoplamiento; cuya misión principal es mantener unidos dichos perfiles o barras para lograr el conjunto estructural.

- {-Fijas: Remaches y Soldadura
 - {-Desmontables: Tornillos ordinarios, calibrados y de alta resistencia
-
- {-Uniones de fuerza: Transmiten esfuerzos entre piezas.
 - {-Uniones de atado: Mantienen en su posición los elementos.
- Empalmes: Uniones de fuerza de piezas en prolongación.

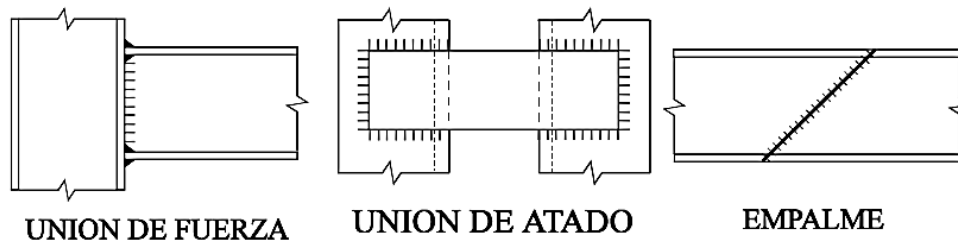


Figura 7.2 Tipos de uniones o costuras de fuerza.

Cualquier unión es siempre un punto delicado en la estructura, ya que se comportan como grandes concentradores de esfuerzos, y por ello es necesario preverlas en todo proyecto, no autorizando la ejecución de más empalmes y uniones que no se hayan especificado, y en lugares donde no se han especificado.

En resumen, debido a que los empalmes uniones o costuras de fuerza son puntos críticos de la estructura, su número debe reducirse al mínimo necesario, y tratar de realizarlas con la mayor garantía posible.

Para calcular los elementos de unión se determinarán las demandas que sobre ellos. En cada unión se estudiará la forma de realizarla con el menor número de elementos, de forma que la transmisión de esfuerzos se verifique correctamente y se reduzcan al mínimo los esfuerzos secundarios. En cuanto al coeficiente de seguridad que se aplique a la unión, este deberá ser el mismo que se ha adoptado para el cálculo de la estructura, o bien para las barras a que sirvan de enlace. Únicamente en uniones de

montaje, que deban realizarse en condiciones difíciles, deberá aumentarse prudencialmente el coeficiente de seguridad, para así prever posibles defectos en su ejecución.

Cuando las barras estén comprimidas puede permitirse que la transmisión de esfuerzos se realice por contacto directo, siempre que las superficies que hayan de estar en contacto estén debidamente mecanizadas para así asegurarlo y evitar concentraciones de tensiones que aparecerían de otra forma.

Cuando se dispongan empalmes de barras, que en general deben evitarse, salvo que sean necesarios y estén previstos en el proyecto, los elementos y medios de unión que hayan de constituir dicho empalme se tienen que dimensionar para que resistan el esfuerzo que ha de transmitirse a través de la unión, o bien para que puedan transmitir el esfuerzo máximo que la sección de la pieza empalmada puede aceptar en tal punto.

Recomendaciones para la ejecución de las uniones.

1. No construir empalmes o uniones no consideradas en el plano del diseño.
2. Minimizar durante el diseño el menor número de uniones.
3. Las piezas a unirse deben presentarse rectas y planas, en un buen estado, para tener buen contacto.
4. Si se emplea soldadura con remaches o tornillos ordinarios o calibrados, estos elementos se consideran simples elementos de fijación. En estos casos la soldadura debe transmitir toda la sollicitación de la unión.

5. Aun para esfuerzos escasos, la unión debe absorber 1/3 de la sollicitación que absorberían las piezas unidas.
6. Evitar a toda costa las uniones a cortadura simple.

- No se considerará la colaboración simultánea de más de cinco tornillos en una misma fila paralela a la dirección del esfuerzo axial sobre la pieza.

-Separación entre elementos:

Remaches: $3 \cdot a \leq s \leq 8 \cdot a$

Tornillos: $3,5 \cdot a \leq s \leq 15 \cdot a$

Distancias a los extremos:

Al borde frontal: $2 \cdot a \leq t_1 \leq 3 \cdot a$

Al borde lateral: $1,5 \cdot a \leq t_2 \leq 3 \cdot a$

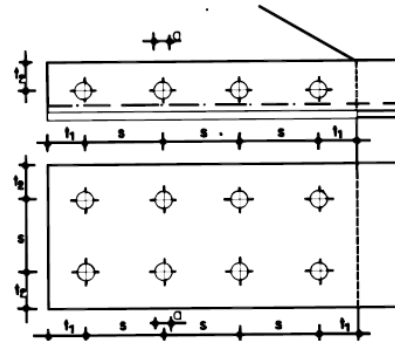


Figura 7.3 Disposiciones constructivas para tornillos y remaches (MV-104. 1966).

7.2 Remachado o roblonado

Un remache consiste en una espiga de diámetro \varnothing , provista de una cabeza de asiento, que está destinada a introducirse a través de las piezas a enlazar, previamente perforadas, de forma que una vez introducido se le forme una segunda cabeza que efectúe el cierre de la unión. Cuando se ha formado esta segunda cabeza el remache se ha transformado en un roblón.

La segunda cabeza, o cabeza de cierre, se forma mediante estampación en caliente del extremo libre de la espiga. Esta estampación puede hacerse a mano o mecánicamente, utilizando prensas hidráulicas o herramientas de aire comprimido.

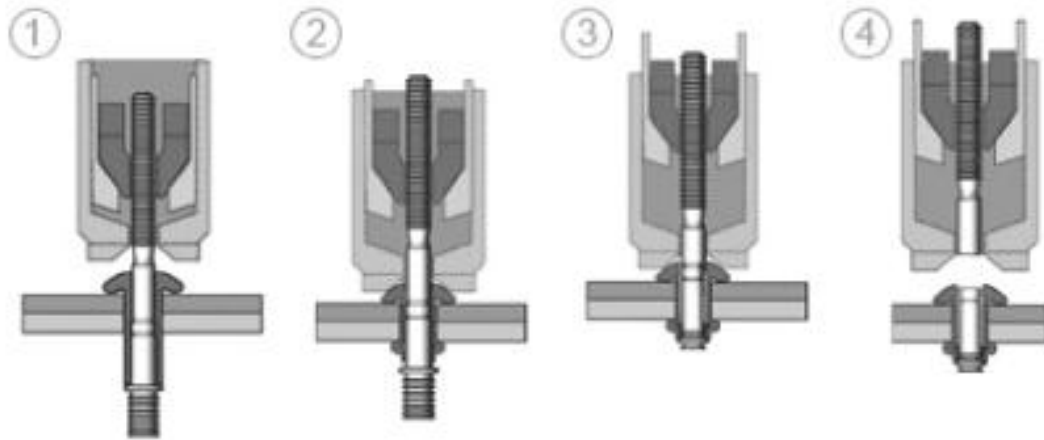


Figura 7.4 Proceso de remachado.

Los roblones que se utilizaban normalmente en la construcción de estructuras metálicas son los de cabeza semiesférica. Los agujeros para el roblonado deben ser de 1 mm mayor que el diámetro nominal del remache. Esto es una regla general para el dimensionado de los agujeros.

Los agujeros en las piezas deberán hacerse siempre mediante taladrado y no por punzonado, debido a la acritud que esta operación introduce y que puede dar lugar a roturas. Únicamente es admisible el punzonado en chapas finas, de hasta 10 mm de espesor. El taladro inicial debe realizarse de diámetro algo menor que el definido, para hacer luego una presentación o montaje inicial de las piezas y terminar el agujero hasta que se alcance su diámetro definitivo por escariado. El tener agujeros más grandes de lo estrictamente necesario representa un gran peligro, ya que la espiga del remache no lo llenará por completo y no serán reales las hipótesis de cálculo.

La longitud de la espiga deberá elegirse de forma que al ser colocado, en el proceso de formación de la cabeza, se rellene completamente el agujero al producirse la

recalcadura o forja de la espiga y además se obtenga la cabeza de las dimensiones adecuadas.

Los roblones constituyen medios de unión puntuales que están solicitados por cortadura o esfuerzo cortante y por aplastamiento, o sea, por la compresión de la espiga contra las paredes de los agujeros.

- Diámetro del agujero = Diámetro de la espiga del remache + 1mm.
- Longitud de espiga = $\frac{4 \cdot d}{3} + \Sigma e$ $\left\{ \begin{array}{l} d : \text{diámetro de espiga} \approx d = (\sqrt{5 \cdot e_{\min}} - 0,2) \text{cm} \\ \Sigma e : \text{suma de espesores de las piezas a unir} \end{array} \right.$
- La suma de espesores de las piezas a unir $\leq 4,5 \cdot d$.

Figura 7.5 Disposiciones para la unión con remaches (MV-105. 1967)

7.3. Atornillado

Para formar uniones desmontables, así como para lograr una mayor velocidad de ejecución de las uniones, se utilizan los tornillos.

Se distinguen tres clases de tornillos: Los ordinarios o tornillos negros; los calibrados o ajustados y los de alta resistencia, que tienen su estudio separado, ya que producen una unión diferente a los dos primeros.

La forma de trabajar de los tornillos es análoga a la de los roblones, de ahí que el cálculo de las costuras atornilladas, así como su morfología, sean las mismas y se puedan estudiar de manera conjunta.

- Tornillos calibrados. Se exige para los diámetros del agujero y de la espiga un ajuste H 11/ h 11. Para estructuras, y para tornillos de diámetros entre 20 y 30 mm, se admite una holgura de 0,3 mm entre espiga y agujero.
- Tornillos ordinarios. Los tornillos que no cumplen las condiciones indicadas anteriormente para los tornillos calibrados se designan como tornillos negros u ordinarios.

- Arandelas. Es obligatorio su uso, para evitar que la rosca o su terminal penetren en el agujero y se produzcan tensiones adicionales a las calculadas por aplastamiento. Cuando la construcción esté solicitada por esfuerzos dinámicos, se emplearán arandelas de seguridad.
- Agujeros. Estos tendrán un diámetro de agujero 1 mm mayor que el nominal del tornillo, o sea, que el de su espiga, redondeando el valor en milímetros.

- Tornillos ordinarios: $\begin{cases} \text{diámetro agujero} = \text{diámetro de espiga} + 1\text{mm} \\ \text{suma de espesores de las piezas a unir} : \Sigma e \leq 4,5 \cdot d \end{cases}$
- Tornillos calibrados (TC): $\begin{cases} \text{diámetro agujero} = \text{diámetro de espiga} \\ \text{suma de espesores de las piezas a unir} : \Sigma e \leq 6,5 \cdot d \end{cases}$

Figura 7.6 Disposiciones para tornillos ordinarios y calibrados (MV-106. 1968)

7.3.1 Tornillos de alta resistencia (AR)

En estas uniones, de concepción diferente a las atornilladas con tornillos normales ordinarios, negros o calibrados, las costuras se realizan mediante tornillos denominados de alta resistencia o AR, apretados fuertemente con el fin de engendrar una gran reacción de rozamiento entre las superficies en contacto y aprovechar esta reacción de rozamiento para la transmisión de los esfuerzos de los perfiles unidos.

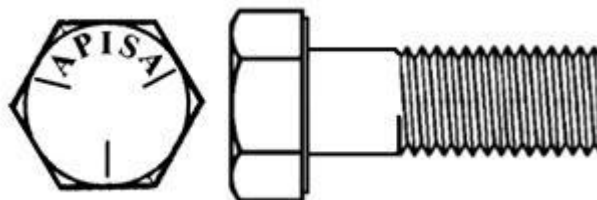


Figura 7.7. Tornillo de alta resistencia.

Una característica importante de los tornillos de alta resistencia es que se introducen con una pequeña holgura en las piezas a unir, para luego tensarlos mediante apretadura de la tuerca o cabeza, para así producir una presión importante entre las superficies en contacto, que es lo que da lugar a la gran reacción de rozamiento.

El esfuerzo, orientado perpendicularmente al vástago o espiga del tornillo, se transmite entre los elementos por el rozamiento estático de las superficies, mientras que el vástago del tornillo queda solicitado por tracción axial y por torsión, como consecuencia del momento de apretadura que se aplica.

Si se incrementa el esfuerzo que solicita a la unión es muy probable que se pueda llegar a sobrepasar la resistencia de rozamiento. Si esto sucede, el movimiento que se inicia hace que los vástagos de los tornillos entren en contacto con los bordes de los agujeros y entonces la transmisión del esfuerzo se lleva a cabo, además de por rozamiento, por cortadura, aunque este esfuerzo sea, en general, de tan poca magnitud que, no se llega a producir la rotura por cortante debido a la gran resistencia del material del tornillo.

En caso de que la carga siga aumentando y se llegue a sobrepasar el valor del límite elástico de los elementos unidos, puede desaparecer parcialmente el pretensado de los tornillos como consecuencia de la estricción, aunque este fenómeno se puede considerar igualmente despreciable.

Los tornillos AR difieren de los tornillos ordinarios solo en que el redondeo de acuerdo entre vástago y arandela será como mínimo de $r = 1 \text{ mm}$ para $\varnothing 14 \text{ mm}$; $r =$

1,5 mm para \varnothing 16 a \varnothing 20; $r = 2$ mm para \varnothing 22. Además, la tolerancia será basta para la cabeza y vástago y media para la rosca.

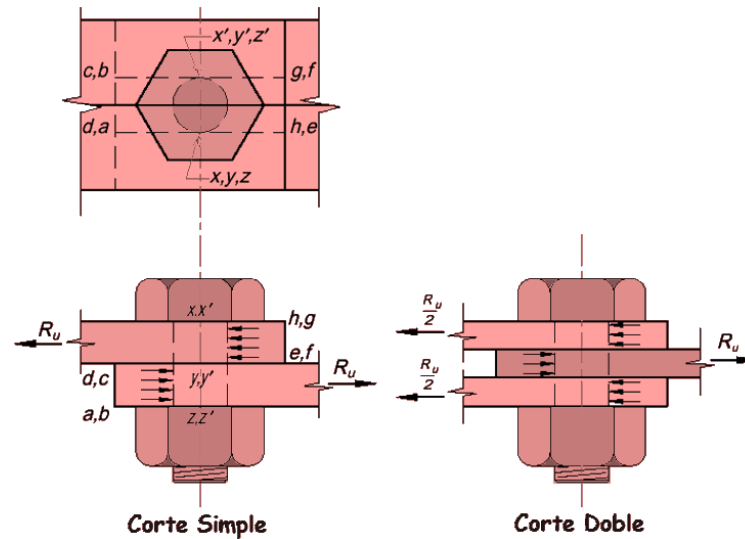


Figura 7.8 Uniones de corte simple y doble con tornillos AR.

Este medio de unión se empleará siempre con arandelas bajo la cabeza y bajo la tuerca y serán de espesores acordes a los tornillos empleados

- Diámetro del agujero = Diámetro de la espiga del tornillo + 1 ó 2 mm.
- Tornillos pretensados por apriete hasta 80% de límite de fluencia
- Momento de apriete: $M_a = k \cdot d \cdot N_0$

$$\left\{ \begin{array}{l} k \approx 0,18 \\ d : \text{diámetro del tornillo} \\ N_0 : \text{esfuerzo axial de pretensado} \end{array} \right.$$
- Esfuerzo de pretensado: $N_0 = 0,8 \cdot \sigma_e \cdot A_n$

Figura 7.9 Disposiciones para tornillos de alta resistencia (MV-107. 1968)

CAPITULO 8

MANUFACTURA ADITIVA

8.1. Introducción

La tecnología de impresión 3D es el proceso por el cual, se hace un objeto tridimensional, casi de cualquier forma, a partir de un modelo 3D, básicamente bajo un proceso de adición de material. Es por eso que también se denomina manufactura aditiva. Esto es, El objeto es formado por la superposición de capas de material que se agregan una y una.

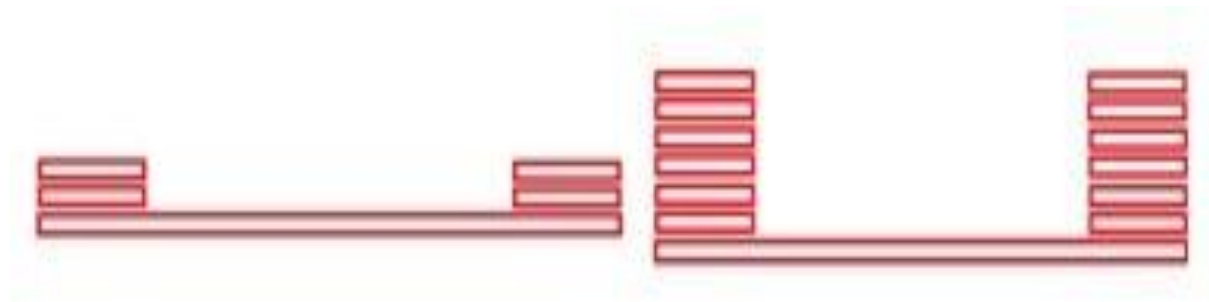


Figura 8.1. Sí, es sumar material por capas: Material + Material + Material = Sumar = Adicionar = ¡Objeto 3D!

En el fondo, ¿Es parecido a como se construye una casa?; ¿O un edificio?; ¿O un castillo de arena? Paso por paso, ladrillo a ladrillo, pared a pared, piso por piso, balde a balde... ¿Cuál es la innovación? Ah, que no hay innovación... Que el mundo viene "imprimiendo" hace mucho tiempo y nosotros desde chicos lo venimos haciendo cuando jugamos en la playa con arena, o los orfebres cuando hacen piezas de cerámica... ¿Entonces?

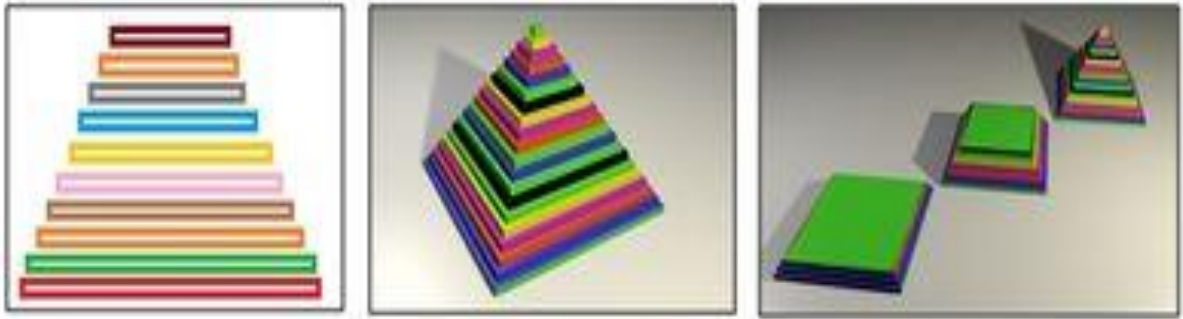


Figura 8.2.

Bueno, se trata de una explicación sencilla, algo aproximado, pero claro; esta explicación sencilla se podría mejorar comentando que la impresión 3d tiene algunos elementos que la caracterizan:

- Manufactura aditiva
- Diseños en 3d y datos informáticos.
- Tecnología.
- Nuevos materiales.
- Posicionamiento preciso.
- Robótica.
- Sensores de posicionamiento.
- La conjunción / combinación de estos factores.

La impresión 3D se ha visto difundida en los últimos años. Constantemente vemos noticias resaltando nuevas maravillas de esta tecnología emergente, pero ¿Qué se puede hacer con la impresión 3D exactamente? ¿Es posible usarla no solo para prototipos, también para producción?

La invención de la impresión 3D apunta a dos objetivos principales: Reducir el tiempo necesario para obtener la primera versión de un producto y eliminar varias restricciones de los métodos de producción tradicionales. Por ejemplo, la impresión 3D permite producir geometrías complejas o partes interconectadas sin requerir de ensamblado. También es posible imprimir objetos individuales así como pequeñas cantidades, rápidamente y a bajo costo. Esta tecnología también ayuda a reducir la pérdida de material de producción.

La impresión 3D puede producir diferentes objetos sin la necesidad de usar herramientas específicas o múltiples herramientas. Así es como la impresión 3D aumenta la flexibilidad en el flujo de producción y ayuda a reducir los gastos industriales. Además, debido a que no hay necesidad de montar una línea de producción, también ayuda a reducir los tiempos significativamente, permitiéndole innovar y fabricar más rápido. Mientras que los métodos tradicionales de fabricación están orientados a la producción de miles o millones de unidades, la impresión 3D es el método más idóneo para objetos "a pedido" o personalizados

En resumen, la impresión 3D posibilita a cualquier persona a fabricar objetos cuando quiera o necesite. Es un proceso de fabricación fantástico para los creativos que desean materializar su imaginación, brindando la posibilidad de producir y vender sus creaciones salteando varias de las típicas etapas de producción y distribución. La impresión 3D también es útil para reproducir objetos que no se consiguen más, por ejemplo para reparar una vieja máquina en que sus repuestos fueron descontinuados.

La impresión 3D ha estado ganando protagonismo en las noticias en los últimos años. Sin embargo, la fabricación aditiva está lejos de ser una tecnología completamente nueva, ya que viene siendo usada en ambientes profesionales por casi 30 años.

Nuevas impresoras 3D aparecen cada vez más seguidas en las noticias, principalmente debido a la gran apertura que estas tecnologías tuvieron hacia el público general. Luego de mucho tiempo restringidas a profesionales y al prototipo industrial, hoy en día la impresión 3D permite al público general imprimir partes y productos finales. Las impresoras 3D se dividen usualmente en 2 categorías: Impresoras hogareñas e impresoras profesionales. Esta distinción no es siempre así: Algunas compañías usan impresoras hogareñas para las primeras etapas de prototipo así como el público a veces accede a impresoras profesionales en talleres de fabricación "FabLabs" o mediante servicio en línea de internet.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la tecnología de impresión suele ser significativamente diferente entre ambas clases de impresoras. La mayoría de las impresoras accesibles para el público general son del tipo FDM (del inglés "Fused Deposition Modeling" o "Modelado por deposición de material fundido", el cual típicamente es un filamento) mientras que las impresoras profesionales pueden imprimir en múltiples materiales y con mayor precisión.

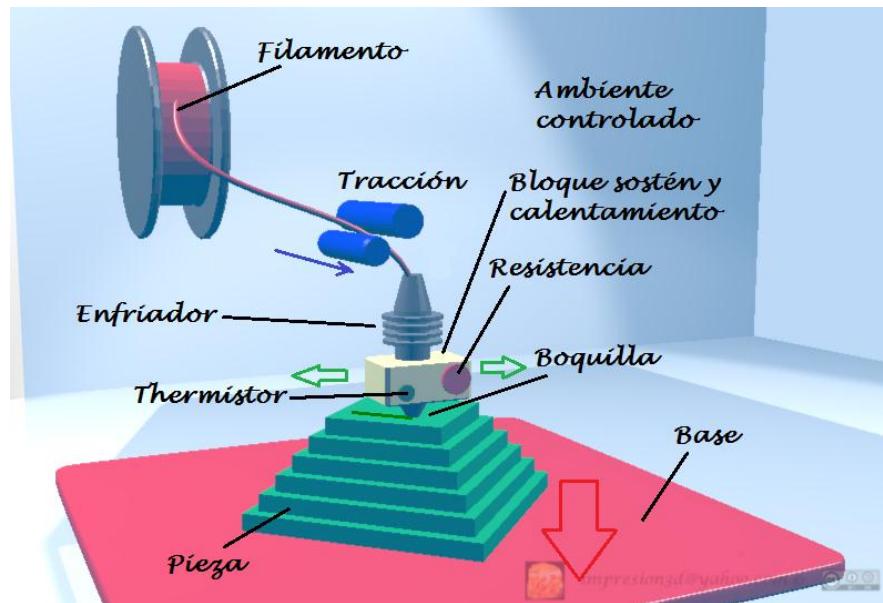


Figura 8.3. Impresión 3D (http://reprap.org/wiki/File:Esquema_FDM_Rev03.png)

Más allá de las increíbles historias que vemos en las noticias a menudo, la impresión 3D ya ha generado un cambio en los procesos de fabricación de varias industrias, medicina dental, aeroespacial, aeronáutica civil y militar, joyería.. Cuanto más trabajamos en tecnologías de impresión 3D, imás nos damos cuenta como casi todas las industrias se beneficiaran de la impresión 3D

8.2. Historia de la impresión 3D

La tecnología de impresión tridimensional tiene sus inicios a finales de los ochentas, cuando la empresa "Mitsubishi Motors" propone la idea de usar fotopolímeros¹ para producir capas que a su vez pudieran ayudar en la creación de figuras, dicha tecnología fue nombrada como "Prototipado Rápido" o "RP" por sus siglas en inglés. Se le conocía así porque el proceso era originalmente concebido como un método más

rápido, efectivo y menos costoso para la creación de prototipos industriales en el desarrollo de nuevos productos.

La primera patente para tecnología RP de la que se tiene constancia fue para el Doctor Hideo Kodama (figura 8.4) del "Instituto Municipal de Búsqueda Industrial de Nagoya" en Japón en el año de 1981. Desafortunadamente para el Doctor Kodama las especificaciones de su invento no fueron debidamente rellenas, por lo que no pudo disfrutar de los derechos de su descubrimiento (lo cual no deja de llamar la atención ya que él era abogado en asuntos de patentes).

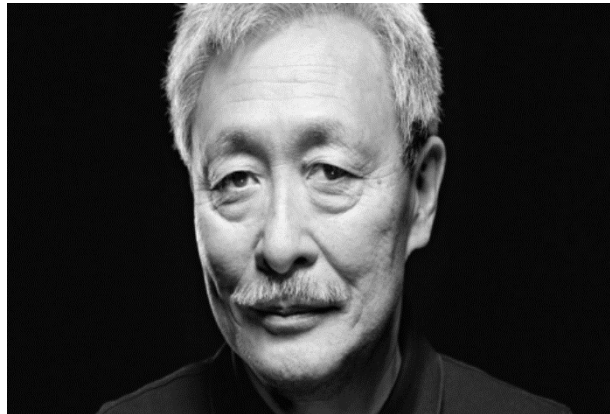


Figura 8.4. Doctor Hideo Kodama, precursor no reconocido de la tecnología RP. Fuente: www.elfilamento.com

Es debido a lo anterior que, para términos prácticos, se considera que los orígenes de la impresión 3D datan de 1986 cuando la primera licencia para un aparato de Estereolitografía o SLA (proceso mediante el cual se convierte con un láser un fotopolímero líquido en plástico sólido capa por capa), fue aprobada. Ésta perteneció a Charles "Chuck" W. Hull (figura 8.5), quien inventó dicha máquina en 1984. Hull es también el co-fundador, vicepresidente ejecutivo y el jefe del área de tecnología de "3D Systems", una de las más grandes y prolíficas empresas que operan dentro del sector de impresión 3D en estos días.

El primer sistema comercial de prototipado rápido de dicha empresa fue el "SLA-1" (figura 1.3), dicho aparato fue construido en 1986; el cual siguiendo rigurosas pruebas de calidad salió al mercado en 1988.

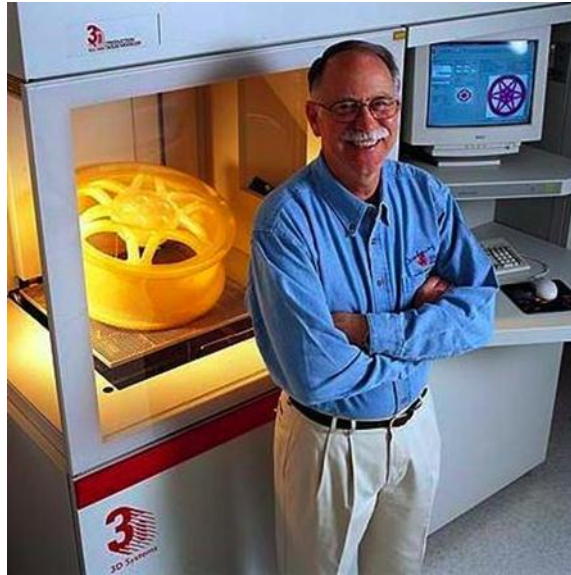


Figura 8.5. Charles "Chuck" W. Hull inventor de la Estereolitografía.

Fuente: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102825479-breve-historia-de-la-impresion-3d>



Figura 8.6. Máquina SLA-1 inventada por Charles "Chuck" Hull en 1987 y actualmente exhibida en "National Inventors Hall of Fame" de Virgina, EU. Fuente: www.3dprint.com

Sin embargo el SLA-1 no fue el único modelo desarrollado por ese entonces: en 1987 Carl R. Deckard, un trabajador de la Universidad de Texas, postuló la patente para el proceso conocido como "Sinterización Selectiva por Láser" o SLS por sus siglas en inglés (Selective Laser Sintering); proceso que consistía en el uso de un láser para sinterizar (fusionar y solidificar) polvo de plástico. La patente fue aprobada dos años después y vendida a DTM Inc, empresa que fue posteriormente adquirida por 3D Systems.

En el año de 1989 Scott Crump (figura 8.7), co-fundador de Stratasys Inc., registró la patente para un nuevo proceso al que llamó "Modelado por Deposición Fundida" o FDM por sus siglas en inglés (Fused Deposition Modelling), el cual consistía en la deposición en capas de finos hilos de material por medio de una boquilla móvil cuya temperatura debía encontrarse por encima del punto de fusión de dicho material.



Figura 8.7. *Scott Crump, co-fundador de Stratasys Inc. e inventor reconocido de la tecnología FDM. Fuente: <http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?releaseid=845980>*

La licencia de esta tecnología fue aprobada en 1992 y aún está en manos de Stratasys Inc. pero también es ampliamente utilizada por otros usuarios; tal es el caso de la comunidad de miembros del proyecto "RepRap" (Replicating Rapid-prototyper) que la denominaron como "Tecnología de Fabricación con Filamento Fundido" (Fused Filament Fabrication) con la finalidad de disponer de una terminología que pudieran utilizar legalmente sin limitaciones.

El objetivo del proyecto "RepRap" es reducir drásticamente el coste de las máquinas de prototipado 3D con software libre y de código abierto, además de abaratar el precio de objetos a costes casi de 0,02dólares por centímetro cúbico.

Durante el año de 1990 se pudo ver el surgimiento de la primera máquina "Stereos" (figura 8.8) de mano de la compañía alemana "EOS GmbH", cuyo fundador fue el Dr. Hans Langer. El "Sinterizado Directo de Metal por Láser" o DMLS (Direct Metal Laser Sintering) desarrollado por dicha compañía es a menudo confundido con el "Sinterizado Selectivo por Laser" anteriormente mencionado; sin embargo mientras este último utiliza como base el polvo de plástico, de cerámica o de vidrio, el DMLS hace uso de polvo de metal.

Hoy en día, los sistemas EOS son reconocidos a nivel mundial gracias a su alta calidad en los ámbitos de prototipado e impresión 3D.



Figura 8.8. Primera máquina "Stereos" de la compañía EOS GmbH fabricada en 1991

Fuente: www.eos.info

Otros importantes procesos de prototipado rápido que surgieron en esa época fueron:

- "Laminado por Capas" o LOM (Laminated Object Manufacturing): Patentado originalmente por Michael Feygin, en el cual, capas finas de material se cortan de la manera deseada y posteriormente se unen entre sí.
- "Fotopolimerización por Luz Ultravioleta" o SGC (Solid Ground Curing): Patentado por Pomerantz et al. Esta tecnología trabaja con resinas fotosensibles a los rayos UV; cada capa se solidifica en una operación a partir de la utilización de máscaras creadas con tinta electrostáticas en una placa de vidrio.
- "Manufactura con Partículas Balísticas" o BPM (Ballistic Particles Manufacturing): Patentado por William Masters. Proceso en el cual uno o varios cabezales móviles arrojan un chorro de material plástico, cerámico, metal o cera, hacia una superficie; un elevador mueve la pieza a formar

verticalmente, mientras que otro cabezal uniformiza el ancho. La operación se repite en forma parecida a otros procesos, depositando capas de material una sobre otra.

Los 90's y los años 2000 fueron años de una intensa actividad comercial, así como testigos del nacimiento de grandes compañías: "Sanders Prototypes" (más tarde "Solidscape") y "ZCorporation" se crearon en 1995, "Arcam" se estableció en 1997, "Objet Geometries" se fundó en 1998, "MCP Technologies" introdujo la tecnología SLM en el año 2000, "EnvisionTEC" se creó en el 2002, "Exone" por su parte se estableció en el año 2005 como una empresa separada de "Extrude HoneCorporation", mientras que "Sciaky Inc" fue pionera en los procesos basados en los haces de electrones patentada como tecnología para soldadura.

A mediados de los 90's el sector comenzó a presentar signos de diversificación con dos áreas específicas que están mucho más claramente definidas hoy en día. En primer lugar fue el desarrollo de la impresión 3D en usos sumamente específicos para grandes empresas que podían permitirse el lujo de pagar los altos costos de este servicio; estos eran sistemas caros, orientados a producciones de alto valor (de ingeniería y fabricación realmente complejas).

La segunda área recae en el esfuerzo de las empresas por intentar expandir ésta tecnología a un nuevo sector de usuarios con recursos más limitados. Es aquí donde surge una guerra de precios acompañada de mejoras cada vez más y más amplias en resolución de la calidad de impresión, velocidad y materiales; con lo cual surge una nueva terminología para denominar a la tecnología hasta entonces conocida como

Prototipado Rápido: Mecanizado Rápido (Rapid Tooling), Moldeado Rápido (Rapid Casting) y Manufacturado Rápido (Rapid Manufacturing); los cuales más tarde evolucionarían a un término generalizado "Manufactura Aditiva" o "AM" (Additive Manufacturing).

En el 2007 el mercado vio por primera vez un sistema capaz de obtener modelos tridimensionales por menos de 10,000 dólares de la mano de la empresa 3D Systems. Este acontecimiento marcó la diferencia y punto de inflexión para lograr que esta clase de impresoras pudieran algún día estar al alcance de todos. El fenómeno "RepRap" empezó a volverse medianamente popular, comenzando a dar los frutos que el Doctor Bowyer plantó allá por el 2004: Un sistema que permitiera auto-replicar impresoras 3D, abierto a todo público.

Sin embargo, no sería sino hasta el 2009 cuando aparecería la primera impresora 3D de precio por debajo de los 5000 dólares; ésta fue la "BfB RapMan 3D" (figura 1.6), la cual ha sido seguida muy de cerca hasta el día de hoy por una serie de impresoras con características similares. La dicotomía destacable en este asunto es que mientras el fenómeno "RepRap" ha dado lugar a un sector completamente nuevo, el espíritu de esta comunidad consiste principalmente en el desarrollo de impresoras de sistema abierto (open source), manteniendo a raya la comercialización.

A lo largo del año 2012, y gracias al apoyo de la página de financiamiento "Kickstarted", se fueron introduciendo en el mercado nuevos procesos de impresión 3D como: "B9Creator", un prototipo open source (diseño, piezas, software y firmware a disposición pública para quien desee fabricar la suya propia) de alta resolución y bajo coste desarrollado por B9Creations que hacía uso de fotopolímeros

endurecidos con luz como material de fabricación; así como también "Form 1", una impresora que utilizaba la tecnología de "estereolitografía" con resinas fotopolímeras de acrilato, disponible en dos tonalidades: clara y gris; y que garantizaba una impresión más fácil desde el software hasta la impresión final. Entre otros ejemplos más, los cuales contaron con una gran aceptación por parte del público

A partir del 2014 se ha visto un crecimiento y consolidación cada vez más significativos en lo referente a ésta tecnología siendo incluso aclamada como la segunda, tercera e incluso la cuarta revolución industrial por algunos. Lo que no se puede negar es el impacto que la impresión tridimensional está teniendo en el sector industrial y el enorme potencial que conlleva en sí misma.

8.3. Los procesos más comunes de Fabricación Aditiva

La **Fabricación Aditiva** siempre comienza con un modelo 3D generado por software CAD (Computer Aided Design), figura 8.9. Este archivo servirá a modo de plano para la impresora, al definir los perímetros y guías del material al ser depositado capa a capa. La impresora 3D usa la información del archivo 3D para crear delgadas capas de material, típicamente más delgadas que 150 micrones. Una vez que todas las sucesivas capas han sido creadas, el proceso de FA se considera finalizado. Dependiendo de la tecnología empleada, el formato del material inicial puede variar entre filamentos, polvos o líquidos.

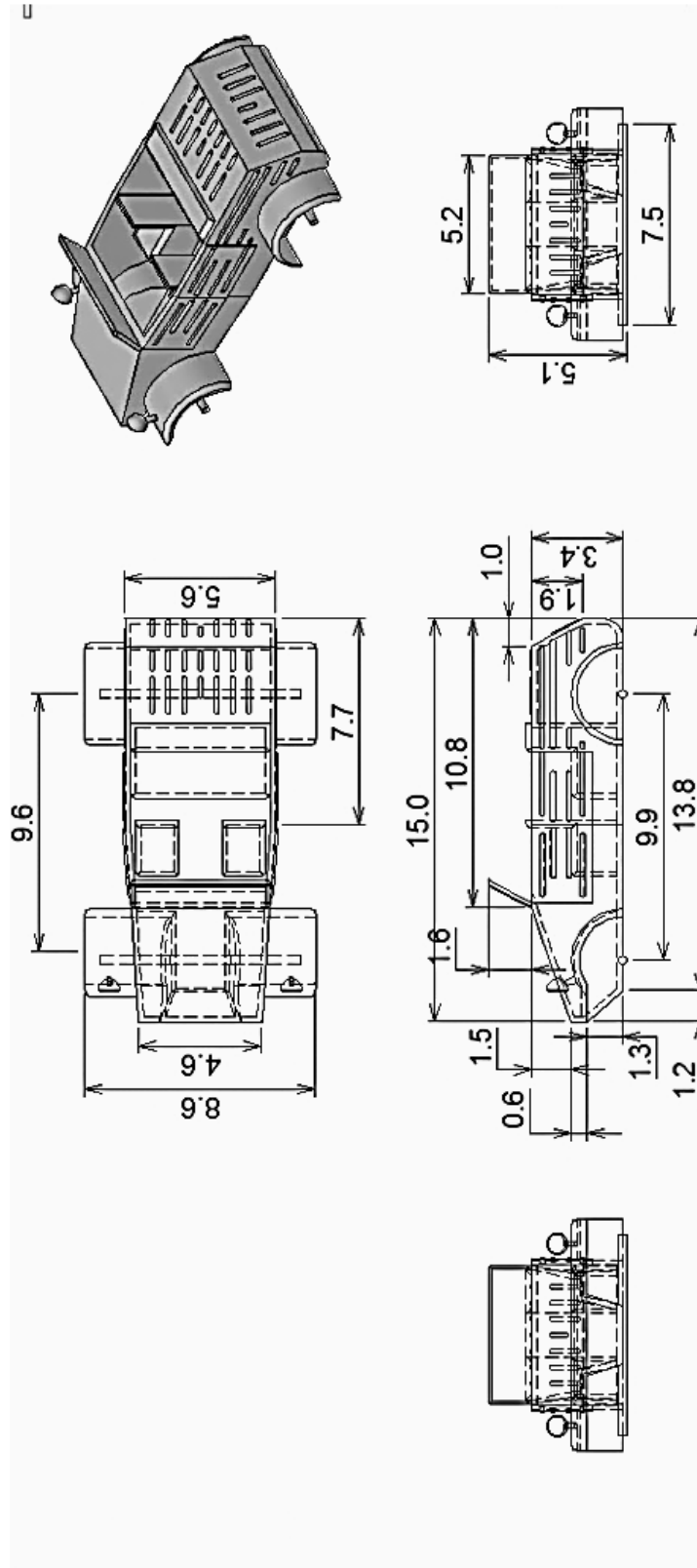


Figura 8.9 Dibujo CAD del modelo a imprimir.

8.3.1. Sinterizado Láser Selectivo (SLS)

La tecnología SLS (Sinterizado Selectivo por Láser) funciona compactando mediante un láser el material consumible, habitualmente polvo de poliamida. El láser incide sobre una fina capa de polvo fundiendo sólo el área de la pieza sin tocar el resto del polvo, el cual sirve de sustento para la propia pieza y sus zonas en voladizo. Cuando señalamos que no toca el resto del polvo, no es totalmente exacto ya que el calor del cercano láser afecta al material que no va a compactarse. Asimismo, estas cubas de material en polvo pasan por un proceso de calentamiento ya que la cámara de trabajo está a una temperatura cercana a la de fusión del material. Debido a estas condiciones del entorno de trabajo, la poliamida que no se ha solidificado no se puede reutilizar eternamente ya que se van descomponiendo algunas fracciones del polímero y se degradan alguno de los aditivos. Cada vez que se ponga la maquina en marcha hay que introducir un porcentaje de material nuevo sin utilizar e incluso tras haber trabajado 15-20 ciclos es necesario sustituir la cuba de material completa.

Esto puede explicar el alto interés de los proveedores de servicios que trabajan con estas tecnologías en llenar la cuba al máximo y optimizar este desperdicio de material. Por otra parte, si bien el kilogramo de polvo de poliamida es económico comparándolo con otros materiales de prototipado, hay que tener en cuenta la producción de piezas prevista a la hora de elegir tecnología ya que el material que echamos a la basura no es poco.

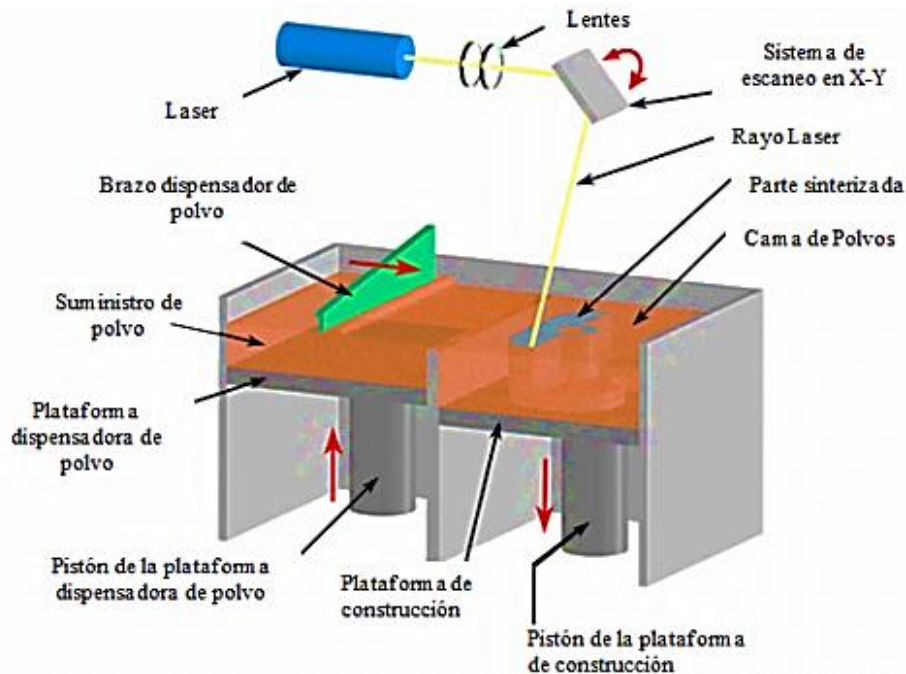


Figura 8.10. Los diferentes componentes de una impresora de Sinterizado Selectivo por Laser (SLS) Fuente: <http://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

Mientras que en la figura 8.11 se observa la producción de una pieza por este medio.

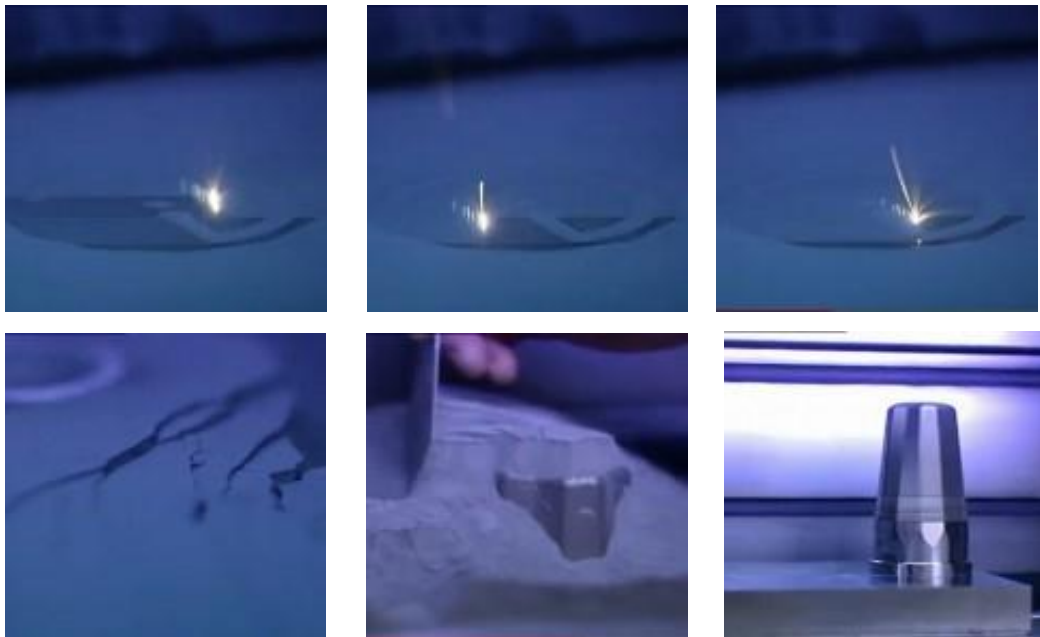


Figura 8.11. Proceso de Sinterización Selectiva por Láser Fuente: <http://www.youtube.com/watch?v=xVNKAYt7LZM>

8.3.2. Fotopolimerización (SLA)

Consiste en un proceso químico en el que se usan resinas líquidas que se solidifican con luz ultravioleta. Dicho proceso consiste en colocar el insumo líquido en un balde especial y proyectar la luz capa por capa en el patrón de cada corte transversal del objeto controlado con la ayuda de deflectores (eje x,y) que son espejos de alta precisión ubicados sobre los galvanómetros. El rayo láser recorre la superficie de resina líquida en función del modelo 3D numérico transmitido a la impresora. Una vez solidificada la capa actual, el balde debe bajar para empezar a proyectar la siguiente capa. Existen también variaciones en las donde el balde queda en la misma posición y lo que se mueve es la plataforma que sostiene el objeto.

El principal exponente de este proceso es la **Estereolitografía** (SLA- Stereolithograph apparatus), la cual hace uso resinas acrílicas o epóxicas y material ABS, de todas las tallas y de una geometría compleja con una gran precisión. A diferencia del proceso de deposición de material fundido, es necesario un post-tratamiento al horno para terminar la polimerización y aumentar al máximo la resistencia del material, luego se limpia la pieza con un solvente.

En la figura 8.12. se encuentran los componentes de una impresora SLA:

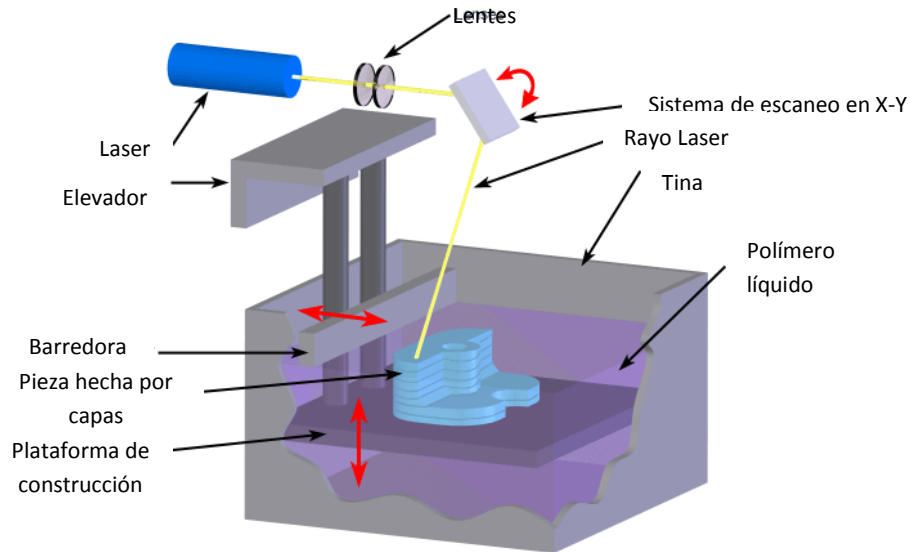


Figura 8.12. Los diferentes componentes de una impresora por Estereolitografía (SLA) Fuente: <http://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

Mientras que en la figura 8.13. se observa la producción de una pieza por este medio.

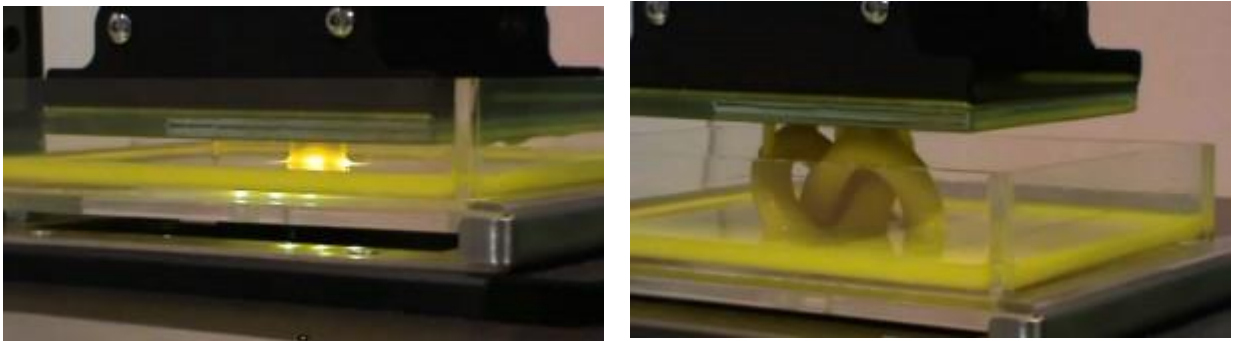


Figura 8.13. Proceso de impresión por Estereolitografía

Fuente: <http://www.3ders.org/articles/20130320-robot-factory-develops-new-high-resolution-3dprinter.html>

8.3.3. Chorro de pegamento multicolor

Chorro de pegamento, también conocido como impresión 3D a todo color o Impresión en polvo con chorro de tinta es un proceso de **fabricación aditiva** popular debido a que permite imprimir a todo color.



Figura 8.14.

8.3.4. Modelado por deposición fundida (FDM)

Conocidas también como de "Modelado por Deposición Fundida" o FDM son aquellas en las que una serie de capas de material termoplástico (ABS, Policarbonato, PPSF y ULTEM, entre otros) y cuya presentación viene regularmente a modo de carrete de filamento, es extruido sobre la mesa de trabajo por medio de un cabezal térmico de impresión (cuyo funcionamiento es muy similar al de una pistola de silicón).

El proceso comienza con el calentamiento de la máquina a aproximadamente 200 °C, temperatura necesaria para la fusión del material. Una vez la máquina se calienta, un filamento plano de material que mide desde 0,08 pulgadas a 0,038 pulgadas de ancho (0,20 mm a 0,97 mm) y 0,05 pulgadas de alto (0,13 mm), es extruido hacia la plataforma a través del cabezal que tiene la capacidad de desplazarse en los 3 ejes

- x, y, z. La plataforma desciende de un nivel cada vez que una capa es aplicada, hasta finalizar la impresión del objeto.

En la figura 8.15. se encuentran los componentes de dicha impresora, mientras que en la 8.16 observamos la producción de una pieza por este medio.

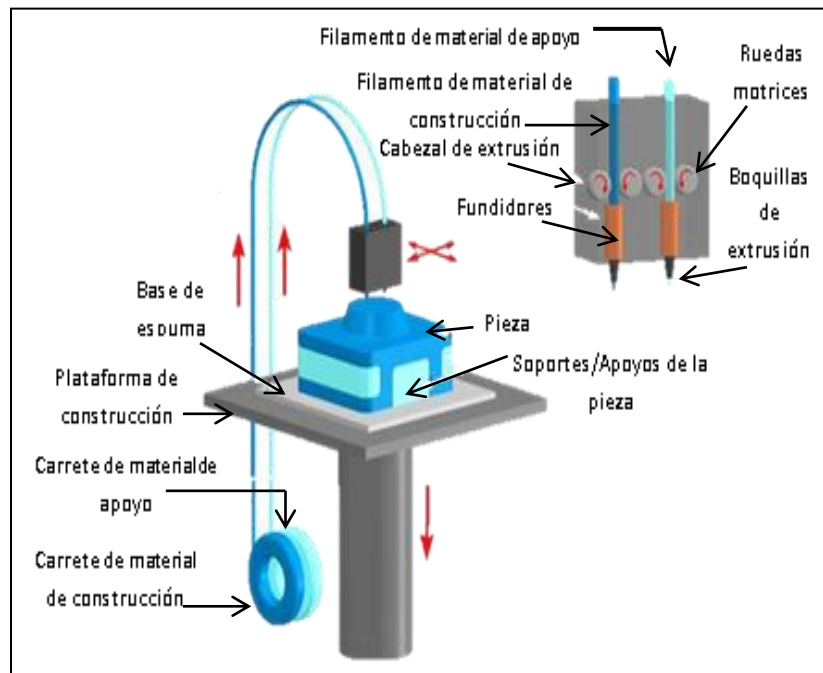


Figura 8.15. Los diferentes componentes de una impresora de modelado por deposición fundida (FDM)



Figura 8.16. Proceso de creación de un álabe por medio de la impresión FDM

Fuente: www.stratasys.com

8.3.5. Polyjet

La impresión 3D PolyJet es similar a la impresión por inyección de tinta, pero en vez de inyectar gotas de tinta en papel, las impresoras 3D PolyJet inyectan capas de fotopolímero líquido curable en una bandeja de construcción.

El proceso es simple:

1. Preprocesamiento: El software construcción-preparación calcula automáticamente la colocación de fotopolímeros y material de apoyo a partir de un archivo CAD 3D.
2. Producción: La impresora 3D inyecta y cura al instante con UV pequeñas gotas de fotopolímero líquido. Las finas capas se acumulan en la bandeja de construcción para crear un modelo o pieza 3D con precisión. Cuando las salientes o formas complejas requieren apoyo, la impresora 3D inyecta un material de soporte extraíble similar al gel.
3. Retiro del soporte: el usuario retira fácilmente los materiales de soporte a mano o con agua. Los modelos y las piezas están listos para manipularlos y usarlos al sacarlos de la impresora 3D, sin necesidad de un curado posterior.



Figura 8.17. Ejemplo de impresión Polyjet

En la figura 8.18 se muestra una comparativa general entre las tecnologías FDM y Polyjet

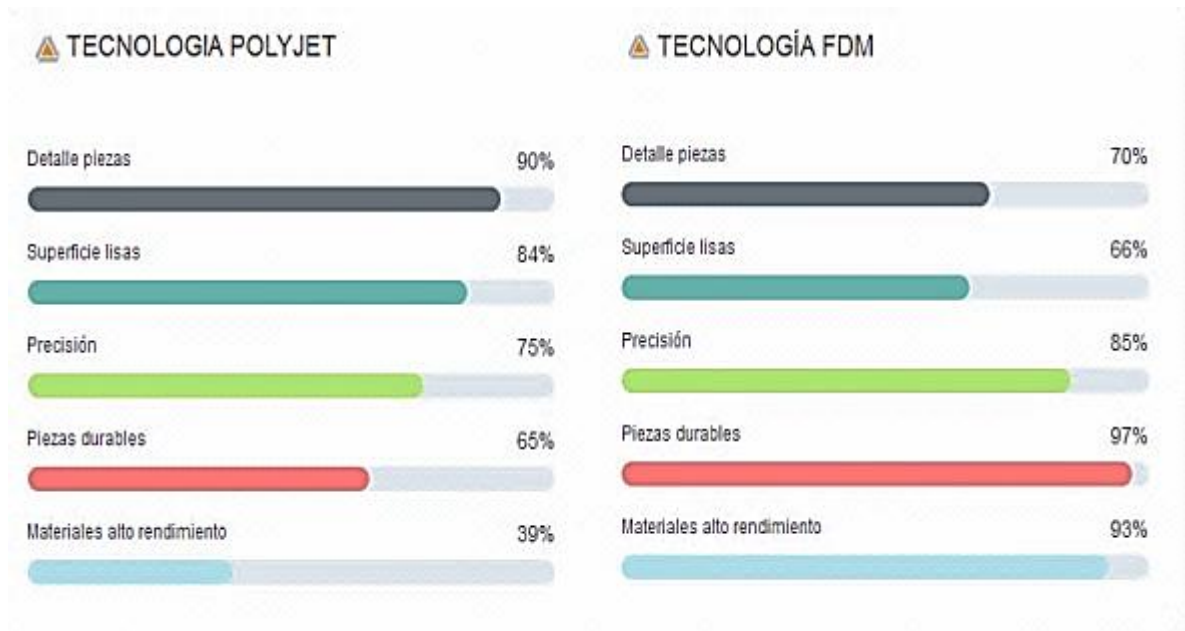


Figura 8.18. Comparativa general éntrelas tecnologías FDM y Polyjet

8.3.6. Sinterizado Directo de Metal Láser (DMLS)

El sinterizado directo de metal por láser es confundido a menudo con el sinterizado selectivo por laser (SLS), pero en realidad no se trata de la misma técnica de impresión 3D. Este proceso, conocido en inglés bajo el nombre de DMLS (Direct Metal Laser Sintering), fue patentado por ERD y EOS (Alemania) en 1994, incluso las primeras investigaciones comenzaron en los años 70.

Mientras que el proceso SLS utiliza como material de base el polvo de plástico, de cerámica o de vidrio, el DMLS utiliza el polvo de metal. Encontramos generalmente materiales metálicos como el acero, el cobalto-cromo, el aluminio, el titanio o incluso el inconel. La resistencia de las piezas obtenidas es hoy en día comparable a la de las técnicas de fundición o de mecanizado. El sinterizado directo de metal por láser

es una de las raras tecnologías de fabricación aditiva que es utilizada al nivel de la producción industrial.

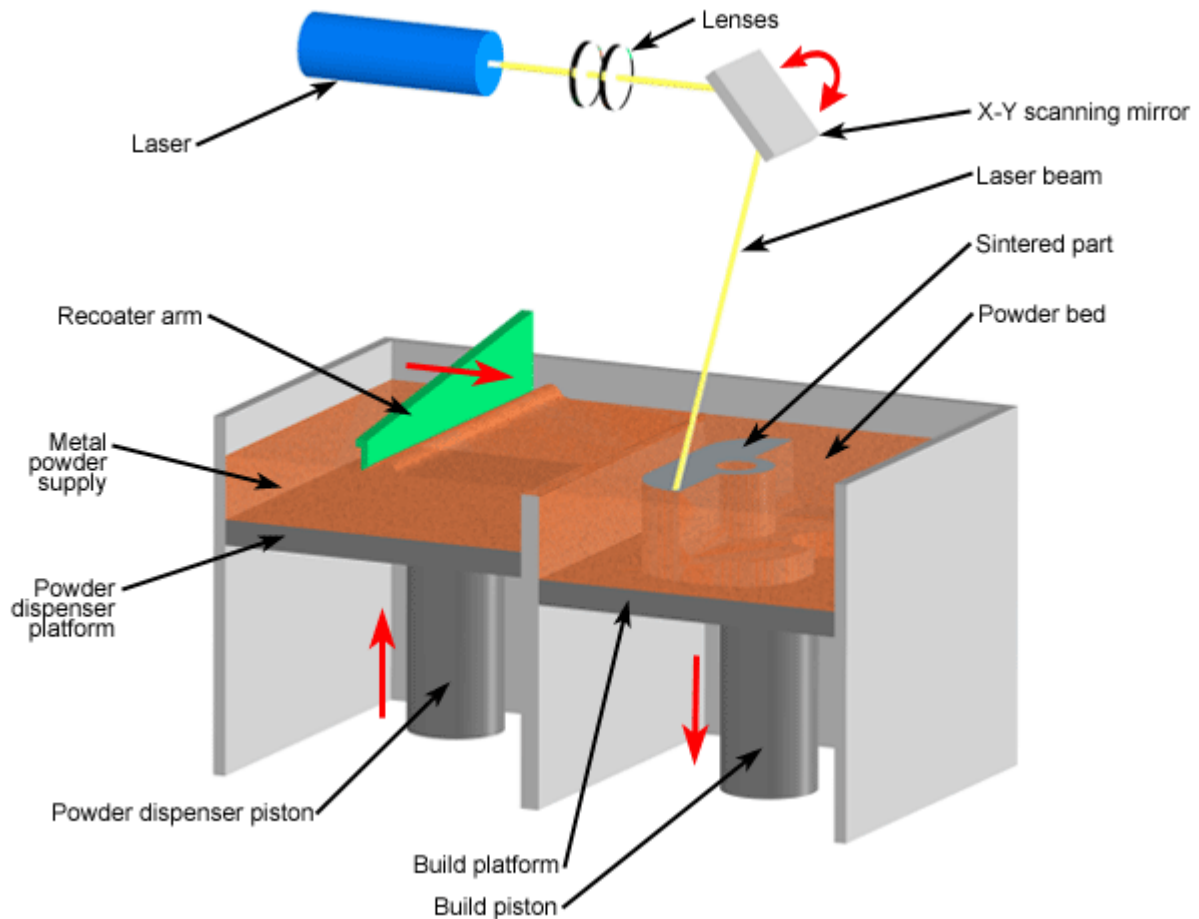


Figura 8.19. Esquema del proceso de sinterizado directo de metal por láser (DMLS)

Como toda técnica de impresión 3D, la concepción de una pieza comienza con la creación de un modelo 3D con la ayuda de un software como Autocad o Solidworks. La etapa siguiente, realizada por el software de la impresora, consiste en dividir el objeto en una multitud de capas de espesor fijo. En el caso del sinterizado directo de metal por láser, el espesor de la capa varía entre 20 y 100 micrones.

La plataforma en la que se realiza la impresión está compuesta de 2 recipientes, cada uno activado por un pistón. El primero es recubierto de polvo metálico mientras que el segundo se encuentra vacío y situado al nivel de la plataforma. El proceso de impresión empieza añadiendo una fina capa de polvo (de una altura máxima determinada por el software de la impresora) en el recipiente vacío. El láser de fibra óptica (del orden de 200/400 W) fusiona el polvo metálico. Una vez que la materia se consolida, una segunda capa de polvo es aplicada con la ayuda del sistema de pistones, y así sucesivamente hasta la creación completa de la pieza.

Esta tecnología es muy utilizada en la industria aeroespacial, automotriz y médica (para los implantes dentales) y de forma general para el prototipado y la fabricación de herramientas.

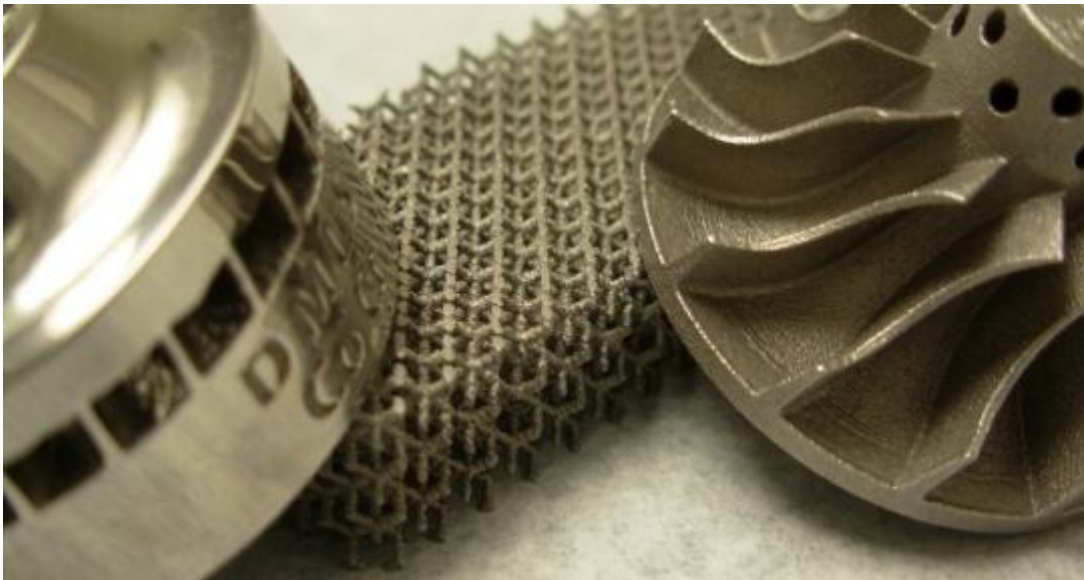


Figura 8.20. Piezas obtenidas mediante le proceso DMLS

En la tabla 8.1 se puede visualizar las principales características de cada tipo de impresión así como sus ventajas y desventajas. Sin embargo nunca hay que perder

de vista que el mejor tipo de impresión es aquel que cumple con las características que requiere el prototipo a imprimir.

Tabla 8.1. Ventajas, Desventajas y Características de cada tipo de impresión 3D

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fused Deposition Modeling (FDM)	<ul style="list-style-type: none"> • Muy aceptable precisión dimensional. • Escaso mantenimiento de máquina. • No se requiere personal excesivamente calificado. • Modelos flexibles. • Posibilidad de post acabados. • Fácil montaje por pegado. • No necesita post curado como otros procesos. • Variedad de materiales: ABS, PLA, PPSF, ULTEM Polimeros mixtos, etc. • Resulta simple el intercambio de materiales. • Fácilmente utilizable como impresora 3D de oficina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia mecánica: Es importante tener en cuenta los esfuerzos que se quieren aplicar a las piezas para evitar las direcciones que separen las capas. • No es bueno para detalles pequeños. • Terminación superficial algo rugosa. • No se pueden hacer paredes muy delgadas. • Construcción más lenta que SLA para piezas voluminosas.
Selective Laser Sintering (SLS)	<ul style="list-style-type: none"> • Piezas con materiales funcionales y variados. • Rapidez: capacidad para hacer muchas piezas a la vez (productividad). • Se pueden pegar partes de piezas construidas por separado. • Se pueden crear paredes muy finas. • Permite diferentes acabados superficiales, pintados, impermeabilizado. • Recomendable para series cortas de piezas pequeñas o medianas (sin acabado). 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones de la cámara: std 300x300x400 (EOS P700 700x380x580mm) • Deformación en piezas muy grandes: mejor fabricar la pieza dividida en partes y luego pegar. • Aspecto algo rugoso (espesor de capa a partir de 0,08 mm). • Precisión limitada por el tamaño de partícula del polvo. • Máquinas muy caras • Habitación necesaria para no llenar de polvo los alrededores. Necesidad de varias

	<ul style="list-style-type: none"> • Piezas más económicas (en general) que las fabricadas en SLA. • Libertad completa de diseño: no hay soportes, el polvo soporta la pieza. • Posibilidad de anidar piezas (unas dentro de otras). • Facilidad de pegado y tintado. • Altas temperaturas. • Resistencia química. • No hay post-curado. 	<p>estaciones de trabajo para mezclar material nuevo y usado y para chorrear piezas.</p>
<p>Estereolitografía (SLA)</p> <p>Estereolitografía (SLA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación de prototipos rápidos y complejos. • Excelente reproducción de los detalles y precisión de las piezas. • Rapidez. • Buen acabado superficial. • Se pueden pegar partes de piezas construidas por separado. • Se pueden crear paredes muy finas. • Permite diferentes acabados superficiales y pintados. • Existen diferentes materiales de fabricación: transparente, flexible, translucido. • Solamente se gasta el material usado para la pieza y sus soportes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilidad (en función de la resina que se utilice). • Necesidad de utilizar soportes para estabilizar superficies sobresalientes durante el proceso de fabricación de las piezas. • Ensayos mecánicos y térmicos no muy exigentes. • Espesor mínimo 0,6mm. • No es posible anidar piezas unas sobre otras durante la fabricación • Material sensible a la humedad y a la temperatura. • Coste del mantenimiento elevado • Coste inicial del volumen del baño • Máquinas muy caras • Necesidad de una sala aislada (sin UV y temperatura un poco controlada) • Necesidad de horno UV y estación de limpieza con alcohol.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Manufactura, ingeniería y tecnología. Kalpakjian Serope. Cuarta edición. PEARSON EDUCACION, México, 2002.*
2. *Optimización del Proceso de forja abierta para evitar Defectos Internos. Adrián Esau Contreras Hernández. Tesis de grado*
3. *Ingeniería de manufactura. Ulrich Scharer Sauberli, José Antonio Rico Mora, Joaquín Cruz Sánchez, Leónides Solares y Raúl Moreno Ponce. Editorial Continental S.A. de C.V. México. Primera edición.*
4. *Materiales y procesos de manufactura. John E. Neely y Richard R. Kibbe. Editorial Limusa. Primera edición.*
5. *Alrededor de las máquinas herramientas. Heinrich Gerling Ed. Reverté. Barcelona 1981.*
6. *Historias Metálicas. Diaz del Castillo R. Felipe. FES- Cuautitlán. 2019. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m3/Historias_metalicas_2019-1.pdf*
7. *Información que ayuda a los Ingenieros Diaz del Castillo R. Felipe.. FES- Cuautitlán. 2018. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m3/Informacion_que_ayuda_2018_2.pdf*
8. *Conformado mediante deformación plástica de materiales metálicos. Diaz del Castillo R. Felipe. FES- Cuautitlán.2018. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m8/Conformado_Metales.pdf*

9. Impresión 3D, una introducción. Diaz del Castillo R. Felipe. FES- Cuautitlán. 2018. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m9/IMPRESION%203D_UNA%20INTRODUCCION.pdf

CIBERGRAFÍA

- 1) <https://mineralmilling.com/es/tipos-de-defectos-de-fundicion-en-la-fundicion-de-arena/>
- 2) <https://www.dynacast.mx/fundicin-a-presion-en-camara-caliente>
- 3) <https://www.intouch-quality.com/blog/21-casting-defects-and-how-to-prevent-them-in-your-products>
- 4) <https://me-mechanicalengineering.com/casting-defects/>
- 5) <https://metalesferrosos.wordpress.com/2017/06/07/laminado-de-perfiles/>
- 6) <https://impresora-3d.online/resina-vs-filamento/>
- 7) <http://www.areatecnologia.com/herramientas/tuercas-y-tornillos.html>
- 8) <http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/roscas.htm>
- 9) <https://dmd.com.mx/2017/11/27/formado-de-metales/>