

1 CONFORMACIÓN EN ESTADO SEMISÓLIDO

La conformación de materiales en estado semisólido puede considerarse como un proceso intermedio entre la conformación por moldeo y la conformación en estado sólido. La conformación de aleaciones de aluminio en estado semisólido es un proceso híbrido que incorpora elementos de varias técnicas clásicas de conformado. Permite libertad en el diseño del molde y en la velocidad de producción de la fundición así como una calidad metalúrgica y unas propiedades mecánicas superiores a las de la fundición en molde permanente o en fundición inyectada [Lou95]. Los componentes

conformados por Thixoforming pueden tener secciones tan delgadas como los obtenidos por squeeze-casting, pudiéndose aplicar a piezas con paredes de 1 mm [Das04].

El interés de estas técnicas radica en la necesidad de producir nuevos componentes con menos defectos y a un coste inferior, y se fundamenta en las propiedades reológicas de los materiales cuando coexisten una fase líquida y una fase sólida esferoidal.

1.1 ANTECEDENTES

Los principios para la aplicación industrial del conformado en estado semisólido fueron expuestos por primera vez por M.C. Fleming y D.B. Spencer en 1972 [Fle72] [Kir94][Pat72]. En 1972 se descubre, de forma accidental, este proceso en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), durante el estudio del desgarro en caliente o “hot tearing”. Dicho proceso consiste en el control de la pseudoplasticidad del material cuando se mantiene a la temperatura adecuada en estado semipastoso (aproximadamente 60% sólido/40% líquido). En estas condiciones, la viscosidad decrece con la velocidad de deformación, dependiendo de las condiciones de agitación del material, y su tixotropía depende de la tensión de cizalladura y del tiempo de la misma. La viscosidad del lodo semisólido se incrementa con el aumento de la fracción sólida y decrece con la esferoidización y disminución del tamaño de los glóbulos sólidos [Bas01]. La estructura resultante consiste en partículas globulares dispersas en una matriz de líquido próximo a la composición eutéctica.

Para este estudio, Spencer y otros [Spe72] utilizaron un viscosímetro tipo Couette y una aleación Sn-15%Pb. Este viscosímetro consiste en dos cilindros concéntricos. El cilindro exterior gira continuamente en un rango de velocidades que puede variar desde 0,4 hasta 1000 rpm [Fle91]. La aleación se vierte en estado fundido en el espacio existente entre los dos cilindros. Al mismo tiempo se hace girar el cilindro exterior para producir fuerzas de cizalladura y se deja enfriar la aleación. Estos investigadores midieron la viscosidad de la aleación en función de la fracción de sólido presente y según la velocidad de agitación. Durante los experimentos se observó que

la viscosidad de la aleación disminuía con la agitación, lo cual se atribuyó a la estructura globular producida durante el experimento. Es decir, la viscosidad disminuye al aumentar las fuerzas de cizalla que actúan sobre el material [Fle76].

Posteriormente Joly y otros [Jol76] publicaron un estudio más exhaustivo sobre la reología de las aleaciones parcialmente solidificadas. En sus experimentos mostraron que la viscosidad era, también, muy sensible a la velocidad de enfriamiento, además de a la velocidad de cizalladura: bajas velocidades de enfriamiento y altas velocidades de cizalladura hacen disminuir la viscosidad para una fracción de sólido dada. No obstante, semisólidos producidos a diferentes velocidades de cizalladura iniciales, muestran diferente comportamiento: altas velocidades iniciales dan lugar a viscosidades aparentes menores.

En cuanto al comportamiento mecánico, la estructura dendrítica semisólida, para una fracción sólida de 0,4, tiene una resistencia a cizalla (shear stress) de aproximadamente 200 kPa, mientras que una estructura no dendrítica (globular) muestra, con la misma fracción sólida, menos de 0,2 kPa, es decir tres órdenes de magnitud menos [www1].

A pesar de estos antecedentes sobre la conformación en estado semisólido, no es hasta 1990 cuando la industria toma conciencia de las potenciales ventajas que pueden ofrecer estos fenómenos.

El comportamiento semisólido o tixotrópico se caracteriza porque el lingote puede mantener su forma, pero cuando se le aplican fuerzas de corte se deforma. Así un lingote semisólido mantiene su forma y puede, al mismo tiempo, ser cortado con un cuchillo, tal y como se muestra en la Fig. 1.1. Otros materiales, tanto naturales como sintéticos, tienen un comportamiento análogo: grasas animales, grasas lubricantes etc.

El proceso de conformado de materiales en estado semisólido puede dividirse en dos tipos. Cuando la aleación sometida a velocidades de cizalladura es conformada directamente para obtener una pieza o un lingote, se denomina *Rheocasting*. Como consecuencia de la reversibilidad de las propiedades tixotrópicas adquiridas por la aleación, el lingote de Rheocasting puede calentarse a la temperatura adecuada y recuperar las características tixotrópicas. Por lo tanto, una aleación solidificada con estructura no dendrítica (de Rheocasting) puede calentarse hasta la temperatura de

estado semisólido y conformarse mediante un proceso de forja (*Thixoforging*) o inyección (*Thixocasting*). Un esquema explicativo se muestra en la Fig. 1.2.

En los últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías de conformado en estado semisólido (SSM): New Rheocasting, Sub Liquidus Casting, etc (véase Apartado 1.3).



Figura 1.1. Corte de un lingote de Rheocasting [Jor02].

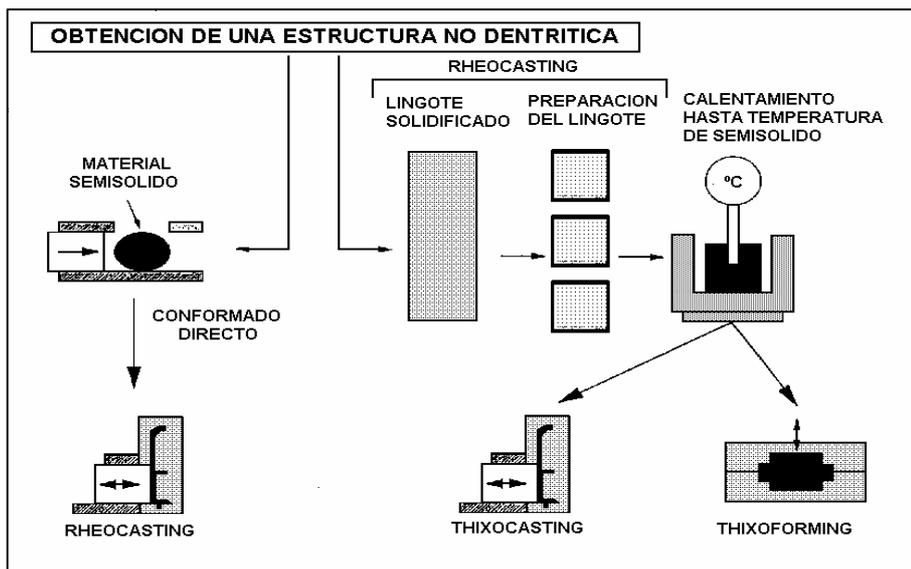


Figura 1.2. Esquema de los procesos de Thixoforging [Val96].

1.2 OBTENCIÓN DE LINGOTES CON ESTRUCTURAS NO DENDRÍTICAS

Después de los trabajos de Spencer [Spe72], se han realizado numerosos estudios para desarrollar nuevas técnicas de producción de lingotes con estructura no dendrítica [Liu98]. Los mayores esfuerzos se han localizado en tres áreas:

- 1.- Agitación mecánica o electromagnética [Pat81], o tratamiento intensivo mediante vibraciones supersónicas durante la solidificación [Gab92] [Dob96].
- 2.- Refusión parcial de aleaciones deformadas [Ken88] u obtenidas por “spray compaction” [Kir89].
- 3.- Enfriamiento controlado durante el proceso de solidificación [Hal00][Hag02].

Los métodos del segundo tipo tienen altos costes de producción y, además, durante el recalentamiento se produce el crecimiento de grano. Por otra parte, el método supersónico tiene el inconveniente de producir un mayor tamaño de grano. Por todo ello, los métodos de agitación electromagnética han sido los más utilizados en la fabricación de lingotes para Thixoforming. Sin embargo, la fabricación del lingote en la propia fundición a partir de aleaciones convencionales, por enfriamiento lento, hasta alcanzar el estado semisólido, presenta ventajas económicas, tal como sucede en el procedimiento New Rheocasting [Hal00] [Wab00].

En las páginas siguientes se describen los métodos más importantes de conformación de lingotes.

1.2.1 Procesamiento del líquido

Los principales métodos para lograr lingotes con estructuras no dendríticas mediante agitación del líquido se ilustran esquemáticamente en la Fig. 1.3 [Ken88].

El método de la Fig. 1.3a consiste en un lecho de fusión en el que se agita mecánicamente el metal líquido durante el proceso de enfriamiento, utilizando cámaras de vacío, o en atmósfera inerte para reducir el aire atrapado. Este método se

utilizó en las primeras investigaciones desarrolladas en el MIT (Institute Technology of Massachussets) para la fundición de metales y la fabricación de materiales compuestos.

En el caso de la Fig. 1.3b, se trata de una máquina de “rheofusión” continua. Se utilizó en el MIT para el desarrollo de procesos en metales de bajo punto de fusión, en aleaciones de cobre y en aceros. Es un método en el que: (a) se obtiene fácilmente una elevada cizalladura, (b) se disminuye la presencia de aire atrapado mediante la agitación bajo la superficie del metal y (c) la velocidad de enfriamiento es elevada, para lograr una fina estructura de grano.

Estos métodos de agitación mecánica presentan ciertos inconvenientes [Kir94]: (1) las aleaciones con elevado punto de fusión son muy agresivas y pueden dañar el crisol que las contiene, (2) contaminación de la mezcla por la escoria atrapada en el líquido, (3) baja productividad y (4) dificultad en el control del proceso.

Para solucionar los problemas derivados de la agitación mecánica directa se han desarrollado métodos de agitación electromagnética. Estos métodos (Fig. 1.3c) consisten en un batido electromagnético energético de las fundiciones durante la solidificación.

Estos procesos permiten la producción a gran escala, utilizando parámetros tecnológicos bien establecidos y aplicables a metales de elevada temperatura de fusión tales como aceros [Fle91]. Permiten producir lingotes continuos con estructura no dendrítica y tienen la ventaja de que sólo existe contacto físico entre el metal y el recipiente.

Uno de estos métodos es el MHD (Magneto Hidrodinamic Stirring) [Pat84]. Este método genera una elevada cizalladura mediante un campo de rotación electromagnético en un molde de fundición de colada continua. La agitación se produce en el fondo del contenedor del líquido que, previamente, se ha filtrado y desgasificado para eliminar la contaminación [Mul96]. Se obtiene una microestructura de grano fino, con un tamaño aproximado de 30 μm y distribuido uniformemente.

La transmisión de calor a través de la pared del molde se controla con una envoltura de agua, alrededor, que produce refrigeración.

Con este método se han conseguido lingotes de aluminio adecuados para el Thixoforging.

El MHD desarrollado por Alusuisse ha llegado a conseguir barras de aluminio de hasta 75 mm de diámetro y un tamaño de partículas no dendríticas alrededor de $100\ \mu\text{m}$ [Kir94].

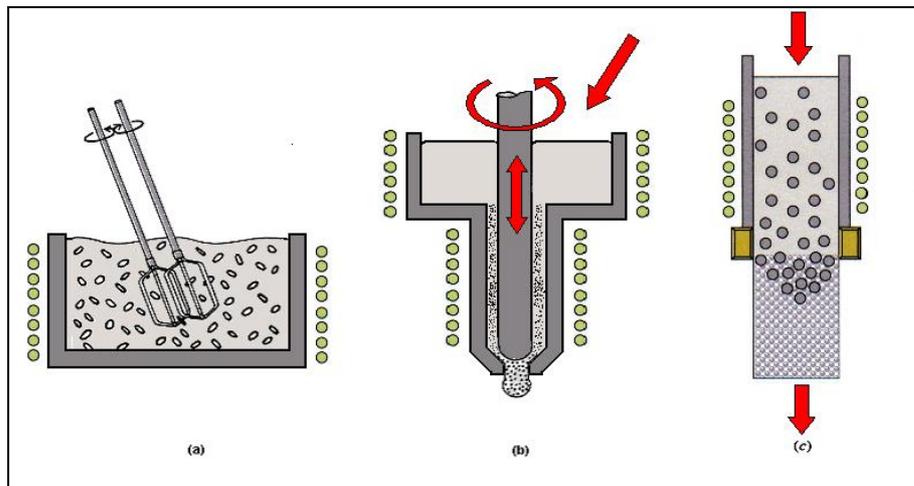


Figura 1.3. Métodos de obtención de estructuras no dendríticas por agitación del líquido: a) agitación mecánica del líquido, b) agitación mecánica y proceso continuo, c) agitación electromagnética y proceso continuo [Fle91].

Pechiney [Plu98] ha patentado un proceso de agitación electromagnética para producir aleaciones de aluminio con una estructura esferoidal fina [Pat91]. El proceso utiliza un motor lineal para calentar el extremo de una colada continua [Pat88]. Es una técnica similar a la agitación durante la colada continua de aceros y se basa en el principio de las bombas electromagnéticas (Fig. 1.4a). Mediante campo eléctrico trifásico se crea un campo magnético móvil que se desplaza a lo largo de la bobina de inducción.

Ello produce un movimiento en el caldo, que retrocede dentro de la cámara, en dirección opuesta a la alimentación del molde. Las dendritas de aluminio se rompen lejos del frente de solidificación, en la zona fría, y recirculan, retrocediendo a la zona caliente de alimentación del metal líquido, donde experimentan una refusión parcial y

son esferoidizadas antes de volver a la corriente, hacia la zona fría, redepositándose en la capa sólida.

Un método alternativo a la tecnología MHD es el SSP (Single Slug Production). La estructura globular se produce de la misma manera que en el método MHD. Un campo magnético produce la agitación de la masa fundida. El crecimiento de la estructura dendrítica se destruye por efecto de las fuerzas de cizalladura generadas por el flujo [Mul96]. Se utiliza un molde de grafito precalentado y se coloca un disco de cobre refrigerado por agua en la parte inferior del molde. Al mismo tiempo, se aplica presión en la parte superior para evitar la macroporosidad. La ventaja principal del método es que el lingote puede ser inmediatamente procesado utilizando el mismo sistema de calentamiento. Se procesan lingotes de 76 mm de diámetro y 120 mm de longitud.

Los métodos de agitación electromagnética más corrientes a escala industrial son el vertical y el horizontal [Gab96] [Bla96]. En la Fig. 1.4 se ilustran los distintos tipos de agitación y en la Fig. 1.5 se esquematizan las ventajas y desventajas, según Niedermaier y Langgartner [Nie98], de los distintos métodos.

El método horizontal tiene la ventaja de mayor eficacia económica, mientras que el método vertical tiene su ventaja en los grandes diámetros. Desde un punto de vista tecnológico, la diferencia esencial entre ambos métodos estriba en el efecto de gravedad en relación con la dirección de la colada.

El proceso llamado de agitación helicoidal es una combinación de la agitación vertical y la horizontal. Mediante la tecnología de colada horizontal con agitación helicoidal se obtienen diámetros de hasta 100 mm de buena calidad.

Mientras que la agitación vertical ha sido empleada sólo en aplicaciones de colada continua vertical, la agitación helicoidal se usa tanto en colada vertical como en colada horizontal.

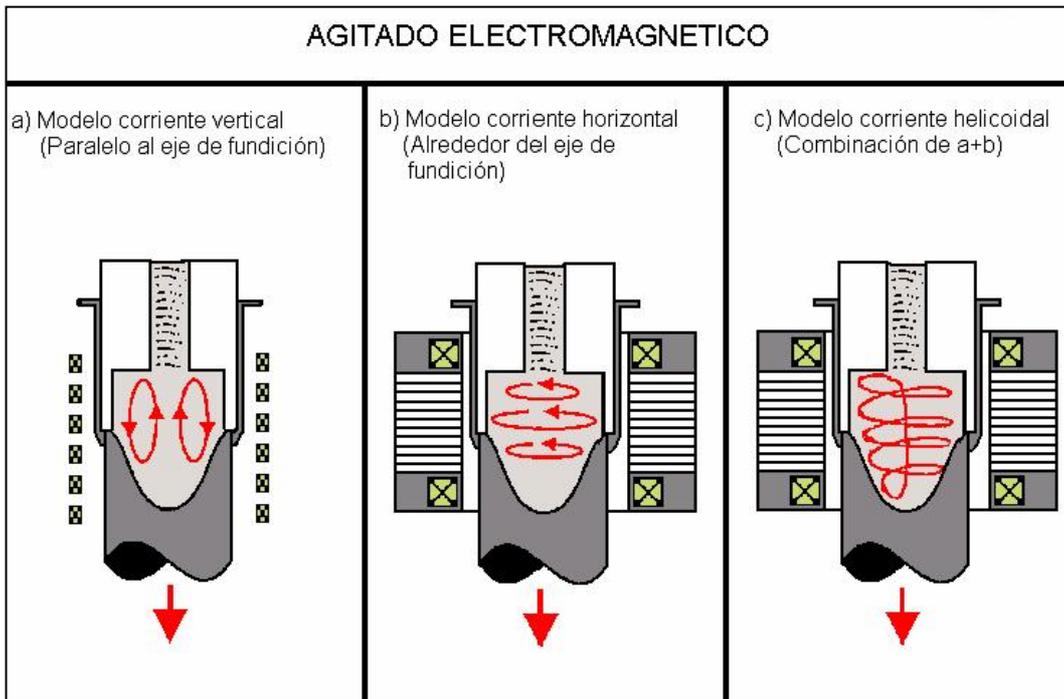


Figura 1.4. Modos de agitación electromagnética en la producción de lingotes para Thixoforming: a) agitación vertical, b) agitación horizontal y c) agitación helicoidal [Nie98].

	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • Económico • Producción continua • Bajo coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> • Influencia de la gravedad
	<ul style="list-style-type: none"> • Solidificación simétrica • Sin limitaciones de diámetro 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción discontinua • Alto coste de inversión • Alto coste de producción

Figura 1.5. Ventajas y desventajas de la colada continua vertical y horizontal [Nie98].

Una posible mejora en la producción de lingotes puede ser el método SCR (Shearing-Cooling-Roll). En este método, el lodo semisólido se genera colando el metal líquido entre un cilindro giratorio y una zapata estacionaria de enfriamiento (Fig. 1.6) [Kir94]. La cizalladura en el intervalo de solidificación produce un lodo fino en aleaciones de

plomo y de aluminio, pero se desconoce el grado de contaminación producido por la adsorción de oxígeno.

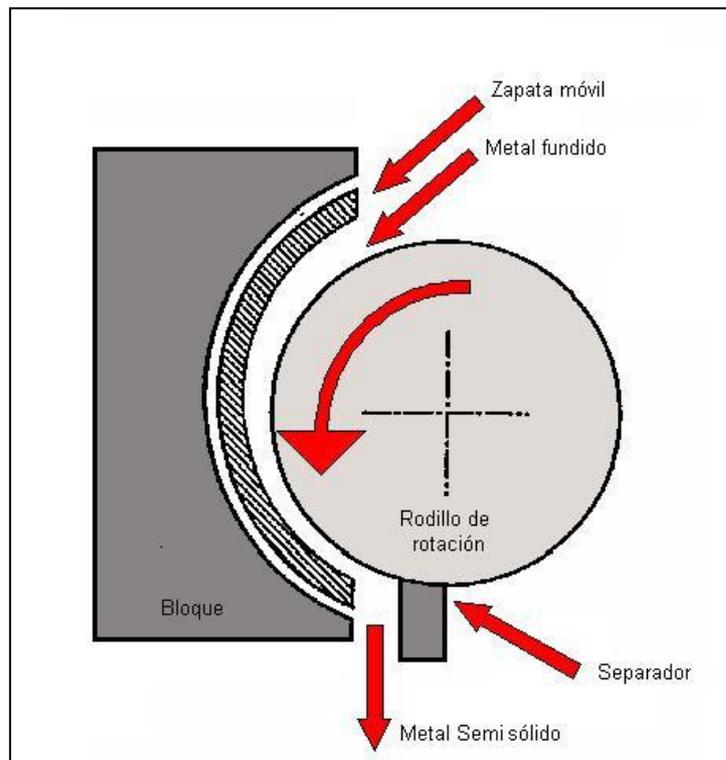


Figura 1.6. Esquema del proceso SCR [Kir94].

Se han realizado estudios que permiten aplicar las vibraciones supersónicas, de baja energía y alta frecuencia, al líquido, enfriándolo cerca de la temperatura liquidus [Liu98]. Así, la fase α de la aleación Al7Si0,4Mg puede esferoidizarse cerca de la temperatura liquidus en sólo 10 segundos. Parece que el mecanismo no es la rotura de dendritas, ya que, cuando se aplica tanto a 10 °C por encima de la temperatura liquidus, como entre 8 y 18 °C por debajo de dicha temperatura, durante 20 segundos, la microestructura permanece dendrítica. Cuando se analizan las curvas de enfriamiento, se observa que el subenfriamiento casi desaparece cuando se aplica la vibración supersónica a la temperatura liquidus, con lo que se reduce la barrera de nucleación de la fase α , lo cual puede favorecer la formación de estructura esferoidal. Análisis posteriores han demostrado que el mecanismo de fragmentación se basa en teorías acústicas. De todas formas, ya es conocido el efecto que tiene esta técnica en el afino de grano [Gab92] [Dob96].

También se pueden producir estructuras no dendríticas a partir del líquido sin agitación. En algunos sistemas, los afinadores de grano adicionados antes de la colada (por ejemplo, titanio-boro en las aleaciones aluminio-silicio), pueden ser potentes supresores del crecimiento de las dendritas y, al recalentar estas aleaciones al estado semisólido, se genera un material thixotrópico. Esto ha sido investigado por numerosos autores [Kir94] [Ken88]. Aunque se han producido algunas estructuras en aleaciones de aluminio usando grandes cantidades de afinadores, parece ser que hay dificultad en obtener tamaños de grano menores de 100 μm .

Actualmente [Ape04], se está trabajando en una técnica denominada SiBloy, en la que se utiliza una aleación madre silicio-boro como afinante de grano. A diferencia de los afinantes tradicionales (aluminio-titanio; aluminio-titanio-boro; aluminio-titanio-carbono), el efecto afinante tiene lugar por una reacción química "in situ", que tiene lugar a la temperatura liquidus, y que provoca la precipitación en el seno del líquido de partículas de AlB_2 . De esta forma el afino es muy efectivo, y no se ve afectado por el tiempo de calentamiento ni por recalentamientos posteriores.

Un método también reciente en la preparación de lingotes es el New Rheocasting, en el que, mediante enfriamiento lento y control de temperaturas, se obtiene un lodo semisólido que puede ser inyectado directamente [Hal00] [Bas00] [Wabu00].

1.2.2 Procesamiento del sólido

El método más conocido de procesamiento en estado sólido es el método SIMA (Strain Induced Melt Activated) [Pat83]. En este método, la aleación obtenida por colada continua se extruye en caliente. Posteriormente, se somete a un proceso de deformación en frío, induciendo gran cantidad de dislocaciones, que son las responsables del cambio de la fase α primaria a la estructura globular, durante el calentamiento al estado semisólido [You94]. El calentamiento se mantiene el tiempo suficiente para que, por crecimiento isotérmico de las ramas dendríticas, se obtenga una estructura globular. El inconveniente surge si queremos obtener una estructura fina, ya que el tamaño de grano es demasiado grande. El método SIMA se utiliza

habitualmente para diámetros de pocos centímetros [Fle91]. Otra desventaja es el alto coste asociado a la etapa de forja.

También se pueden producir estructuras similares por el simple calentamiento de una estructura dendrítica, en el intervalo de temperaturas semisólidas, durante un tiempo suficiente para obtener estructuras tixotrópicas [Ber97] [Ber00] [Ber01]. Se conoce como Semi-Solid Thermal Transformation (SSTT). Estas estructuras suelen tener un tamaño de grano inicial demasiado grande, que puede controlarse mediante la adición de afinantes (titanio-boro). Con las aleaciones A356 y A357 se han conseguido tamaños inferiores a 150 μm , calentando a 588 °C, con tiempos que oscilan entre 0,1 y 30 minutos. En estos casos, el grano crece y se esferoidiza siguiendo, posiblemente, el mecanismo de maduración propuesto por Oswald [Zha03] [Zoq02].

1.2.3 Spray casting

Los procesos de *spray casting*, como el método Osprey o el Spray Forming, [Sie01], producen estructuras no dendríticas. En estos casos el metal líquido es atomizado por un gas y depositado en estado semisólido en un colector enfriado [Kir94]. Se ha demostrado que al recalentar los materiales producidos en estas condiciones, se genera un material thixoconformable [Val96].

El proceso Osprey, patentado en 1989, se utiliza para obtener: (a) barras de elevado diámetro de materiales muy reactivos (aluminio, magnesio) [Lia94], (b) materiales que requieren altas temperaturas de fabricación, Ni_3Al , titanio, etc. [Lia94], (c) fundiciones férricas [Lea93], o aleaciones hipereutécticas de aluminio-silicio [Hab94], y (d) materiales compuestos. Esta técnica impide la reacción entre las partículas y la aleación fundida, al ser corto el período de tiempo que están en contacto en estado líquido [Lea88] [Sri92] [Leh94].

Una de las aplicaciones del método Osprey es la producción de aleaciones aluminio-silicio convencionales. Entre estas aleaciones se encuentran las hipereutécticas de aluminio-silicio, con contenidos de silicio superiores al 20% [Vale96] [Val97].

El proceso consiste en la pulverización de un material fundido, mediante un gas de argón o nitrógeno, en gotas de 20 micras de tamaño medio. Tras esta atomización, el material se deposita inmediatamente en un sustrato o colector (Fig. 1.7).

Se trata de un proceso de solidificación rápida, aproximadamente entre 10^3 y 10^6 °Ks⁻¹. La extracción de calor comprende las tres etapas siguientes [Pat87]:

- *Enfriamiento en vuelo:* La aleación dirigida hacia el colector a gran velocidad y en forma de gotas muy finas sufre un enfriamiento muy rápido por convección ($10^3 \div 10^6$ °Ks⁻¹). La solidificación es homogénea y el resultado es una estructura dendrítica muy fina.
- *Enfriamiento en la deposición:* Al sustrato llegan gotas líquidas, semisólidas y sólidas. Una vez depositado, el material se enfría por conducción a través del sustrato y por convección a través del líquido ($\approx 10^2$ °Ks⁻¹).
- *Enfriamiento tras la deposición:* Se realiza por conducción con el material ya depositado y a través del sustrato ($10^0 \div 10^1$ °Ks⁻¹).

A la superficie del colector llegan gotas de diferentes tamaños. Esto implica que se encontrarán a diferentes temperaturas. La velocidad de enfriamiento tiene una relación directa con el tamaño de las gotas atomizadas, pudiéndose distinguir los tres tipos de tamaños siguientes:

Gotas grandes: Su tamaño es de unas 300 μm , y su cuantía es pequeña, aunque representan una cantidad de masa y volumen importantes. Llegan en estado líquido.

Gotas de tamaño intermedio: Constituyen la mayoría de las partículas que llegan al sustrato. Se encuentran en estado semisólido

Gotas pequeñas: Su tamaño es aproximadamente de 10 μm . A la temperatura de atomización del gas, se depositan en estado sólido. Presentan una microestructura dendrítica muy fina. Solidifican a una velocidad de 10^3 - 10^5 °Ks⁻¹, por nucleación homogénea. Estas partículas muy finas producen nucleación heterogénea, por choque, con las gotas grandes, las cuales se encuentran subenfriadas, debido al rápido enfriamiento del gas. Las partículas intermedias solidifican aproximadamente a 10^2 - 10^3 °Ks⁻¹, desde el estado semisólido, y tienen una estructura dendrítica menos fina que la de las gotas más pequeñas (3 μm frente a 1 μm).

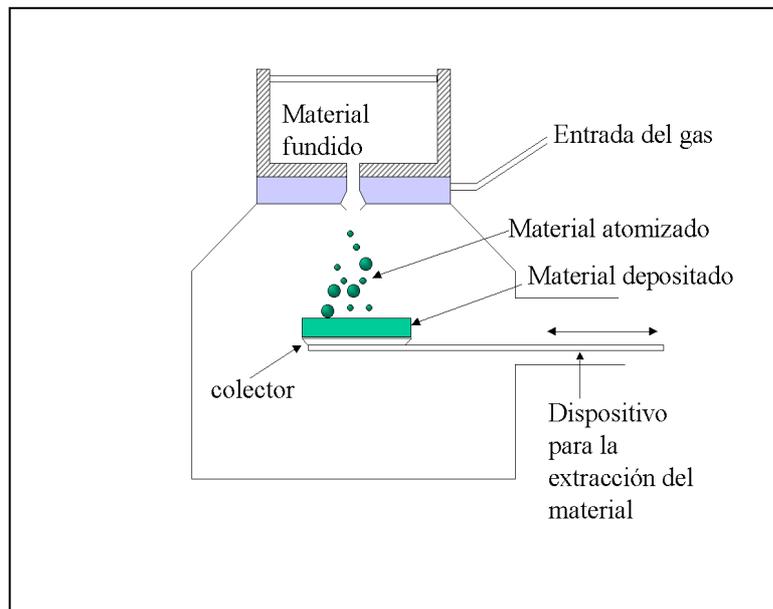


Figura 1.7. Proceso Osprey [Val96].

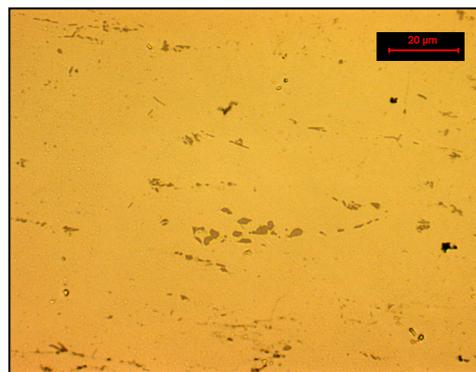


Figura 1.8. Micrografía de una aleación C416, obtenida por el proceso Osprey tratada térmicamente [CDAL, informe privado].

La obtención de la estructura globular es consecuencia de una evolución de la microestructura (Fig. 1.8). Algunos autores sugieren que su aparición es el resultado de la fragmentación de las ramas dendríticas, debido al choque de las gotas con el sustrato, y a la multiplicación de lugares de nucleación de los granos [Lav92]. Otros autores consideran que los mecanismos que gobiernan la aparición de los granos equiaxiales son el engrosamiento de las ramas dendríticas secundarias y el crecimiento y coalescencia de las ramas primarias [Lia92]. Con esta técnica se obtienen barras de composición y estructura muy homogénea y con unos diámetros mínimos de 60 mm.

Esta técnica se aplica para recubrir chapas de acero con aluminio y obtener lingotes de estructura muy homogénea.

1.2.4 Análisis de los diferentes métodos propuestos

Cabe destacar, según Tzimas y colaboradores [Tzi98], que las microestructuras producidas por los métodos MHD, SIMA y Spray Casting difieren notablemente. El “spray casting” produce granos perfectamente equiaxiales, de pequeño tamaño y de composición y estructura muy homogéneas. Esto proporciona unas buenas propiedades mecánicas del producto final [Mat89] [Lea93].

El calentamiento isotérmico de una aleación, al estado semisólido, por el método SIMA, produce un crecimiento muy rápido de los granos, deteriorando las propiedades mecánicas del lingote conformado [Pat83].

El método MHD exhibe una microestructura inicial no uniforme. En el perímetro del lingote predomina la microestructura dendrítica, requiriendo un tiempo significativo de mantenimiento en estado semisólido antes de la conformación (del orden de algunos minutos), con objeto de promover la esferoidización, e incrementar la fluidez de la aleación.

El tiempo de mantenimiento tanto en el método SIMA como en la producción de lingotes por Spray Casting es mucho menor, ya que no es necesario esferoidizar y se limita a obtener un caldo uniforme [Mat89].

En general, la microestructura obtenida por el método MHD exhibe menos equiaxialidad en los granos, comparado con la de los métodos SIMA y Spray Casting, y, por tanto, menor fluidez. Con un 50% de líquido, el lingote semisólido obtenido por MHD presenta una reducida fluidez, debido a la presencia de dendritas en la superficie, lo que permite al material mantener su forma durante el calentamiento y la carga en la máquina de inyección. Los lingotes obtenidos por Spray Casting y SIMA pueden deformarse bajo su propio peso con porcentajes de líquido inferiores al 50%.

Finalmente, cabe comentar el coste bruto del material, sobre la base del método de producción, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas tecnológicas de cada método. Las patentes protegen los tres métodos de producción y las correspondientes licencias. SIMA requiere maquinas convencionales de producción de metal, pero la producción se ve limitada debido al tamaño de los lingotes. No es un método apropiado para la obtención de lingotes. MHD requiere la utilización de procesos de agitación electromagnética, instrumentos comunes en la producción de diversas aleaciones y, por lo tanto, altamente fiables. El valor de la fracción de volumen de líquido con la temperatura puede utilizarse como un primer criterio para la selección de la aleación [Tzi98]. Finalmente, el Spray Casting requiere manipulación y aparatos especiales para trabajar con gas a temperaturas elevadas. Es una operación de producción de grandes lingotes, que requieren una preparación previa, para obtener el tamaño apropiado, antes de darles forma, lo que aumenta el coste del proceso.

1.3 PROCESOS DE CONFORMADO DE COMPONENTES EN ESTADO SEMISÓLIDO

En el apartado anterior se han expuesto los métodos para obtener lingotes con una estructura no dendrítica. Estos métodos se denominan Rheocasting y son el punto de partida de diferentes procesos de conformación en estado semisólido (SSM): Thixoforming, Compocasting, Thixomolding, New Rheocasting, Sub Liquidus Casting y Semi-Solid Rheocasting a escala industrial y otros en diferentes niveles de desarrollo a escala piloto. En los apartados 1.3.1 a 1.3.7 se describen estos procesos

1.3.1 Thixoforming

Los procesos de conformado en estado semisólido por Thixoforming se realizan mediante la inyección en un molde del material en estado pastoso, utilizándose para

ello un máquina similar a la de la fundición inyectada (Thixocasting), o mediante el prensado en una matriz (Thixoforging). Un esquema de estos procesos se muestra en la Fig. 1.9.

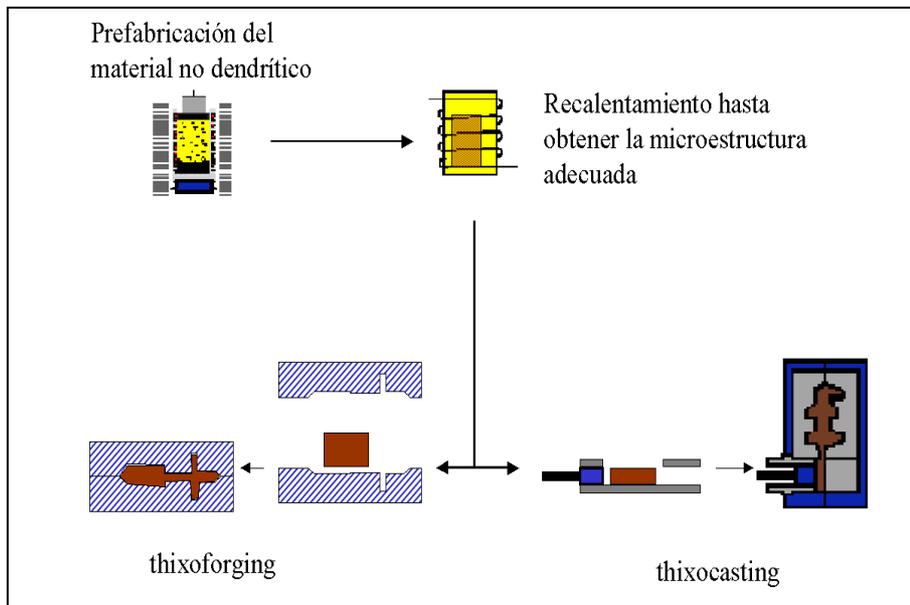


Figura 1.9. Secuencia de los procesos de fabricación por Thixoforging.

Se pueden distinguir dos etapas en el proceso de Thixoforging, el calentamiento del lingote al estado semisólido y su introducción en el molde o matriz. La primera etapa, común a ambos procedimientos, tiene por objeto la refusión parcial del lingote. En el caso de las aleaciones aluminio-silicio el intervalo de trabajo en el estado semisólido se indica en la Fig. 1.10.

Se pueden utilizar una gran variedad de métodos de calentamiento mediante transferencia de calor por radiación o convección, por ejemplo hornos calentados con mecheros de gas o resistencias eléctricas. Sin embargo, es difícil evitar gradientes elevados de temperaturas en el calentamiento rápido producido con estos medios. Por ello el método más utilizado es el calentamiento por inducción, con el que se consigue una rápida y uniforme refusión parcial del material [Kir94] [Jun01].

Cuando el material alcanza el grado de calentamiento óptimo, es preciso transferirlo rápidamente a la máquina para su conformación. Esta operación la suelen realizar equipos automáticos.

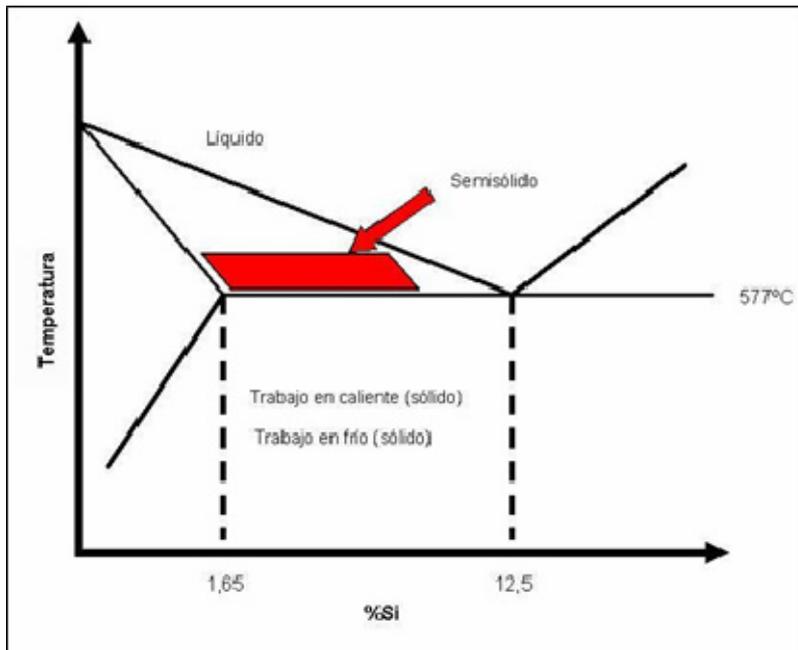


Figura 1.10. Diagrama de fases de las aleaciones aluminio-silicio donde se indica el intervalo de trabajo en los procesos de conformación por Thixofoming.

1.3.1.1 Thixoforging

Se utilizan lingotes procedentes de estructuras solidificadas mediante agitación electromagnética, o por alguna de las otras técnicas de Rheocasting, recalentados al estado semisólido. La solidificación completa tiene lugar a presiones de 10 a 100 MPa, lo que conduce a piezas exentas de porosidad y fisuras [Cho99]. Se utilizan principalmente aleaciones de las series 2000, 6000 y 7000 [Sue96]. Un esquema de este proceso se detalla en la Fig. 1.9.

Existen variantes de los procesos, como el *Thixoforging en cámara al vacío*, o en *atmósfera controlada* [Kap93], que permiten reducir la formación de óxidos a elevadas temperaturas.

Se ha diseñado y construido una máquina capaz de inyectar perfiles de aleación parcialmente fundida dentro de matrices cerradas [Kap93], que permite el control y la medida de la velocidad de inyección y la presión final en la matriz (Fig. 1.11).

El diseño incorpora una cámara caliente que produce la fusión parcial de aleaciones en condiciones de vacío. Esta máquina se ha utilizado para establecer las condiciones óptimas del proceso en la producción de forjas integradas.

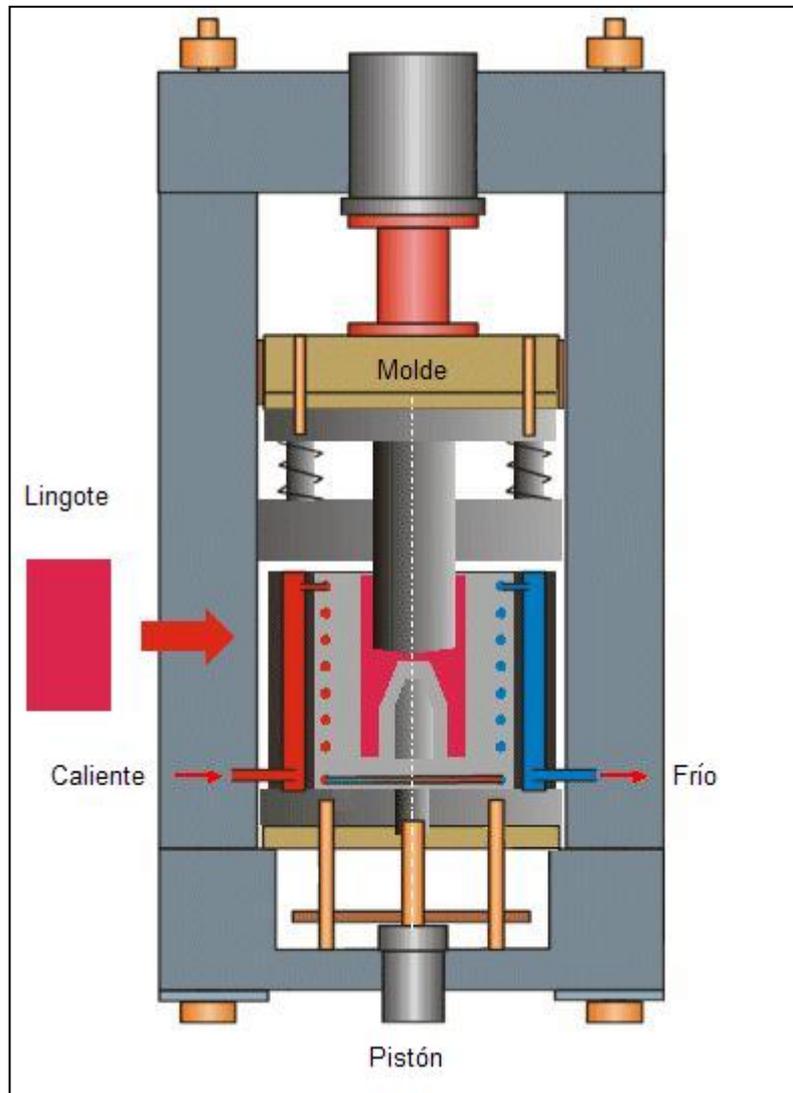


Figura 1.11. Máquina para Thixoforging [Kap93].

Conformación en estado semisólido

Los trabajos realizados han demostrado la viabilidad del Thixoforging, en aleaciones de elevado punto de fusión, tales como acero para herramientas y estelitas. La superficie final y la precisión de la reproducción de la matriz son excelentes.

La presión se controla por ordenador permitiendo al operador seleccionar:

- velocidades de transferencia de parte del material a la matriz
- velocidades del martinete durante la inyección de la mezcla en la matriz
- tiempo de permanencia de la carga final de la forja

En la Universidad de Sheffield se han realizado estudios con la aleación A357 para optimizar las condiciones óptimas de forja en términos de velocidad, carga y tiempo, que permiten obtener un material libre de porosidad [Kap93]. Se han obtenido componentes con un excelente acabado superficial y buenas propiedades [Gul00].

En la Tabla 1.1 se muestran las propiedades mecánicas de algunas aleaciones conformadas por forja y por Thixoforging. Este proceso no está tan desarrollado como el de inyección en estado semisólido y la presencia de porosidad, óxido atrapado etc. provoca que las propiedades mecánicas aún no alcancen los valores óptimos que se le prevén [Fan02] [Chi96].

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas [Kaz00].

Aleación	Proceso	Estado	Rp _{0,2} /MPa	Rm/MPa	A/%	Rp _{0,2} /MPa
A 2024 Al-4Cu-1Mg	Thixoforging	T6	277	366	9	-
	Forja	T6	393	476	10	-
A 6061 Al-1Mg-0,5Si	Thixoforging	T6	290	330	8	104
	Forja	T6	275	310	12	95
A 7075 Al-5,6Zn-2,5Mg-1,6Cu	Thixoforging	T6	421	496	7	135
	Forja	T6	505	570	11	150

Frente al proceso de forja, el Thixoforging tiene las siguientes ventajas y desventajas [Kap93]:

- Viabilidad en aleaciones con elevado punto de fusión.

- Facilidad para ser utilizado en las aleaciones de fundición aluminio-silicio, por su intervalo de solidificación ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Buena reproducción de la forma de la matriz.
- Larga vida de la matriz, debida a las bajas temperaturas de conformación y al corto intervalo de tiempo de permanencia en el molde.
- Coste elevado de los lingotes de Rheocasting.
- Tamaño limitado de los lingotes (diámetro).
- Elevado coste del diseño especial que requiere la estampación.
- Elevadas inversiones en equipos.
- Se requiere un personal cualificado.
- Las propiedades mecánicas son algo inferiores a las de la forja convencional.

1.3.1.2 Thixocasting

Los actuales procesos de Thixocasting (TC) se realizan con lingotes de Rheocasting, que son recalentados hasta la temperatura de estado semisólido, bajo el control de una computadora, y transportados por los brazos de un autómatas a la operación de inyección y posterior extracción (Fig. 1.12).

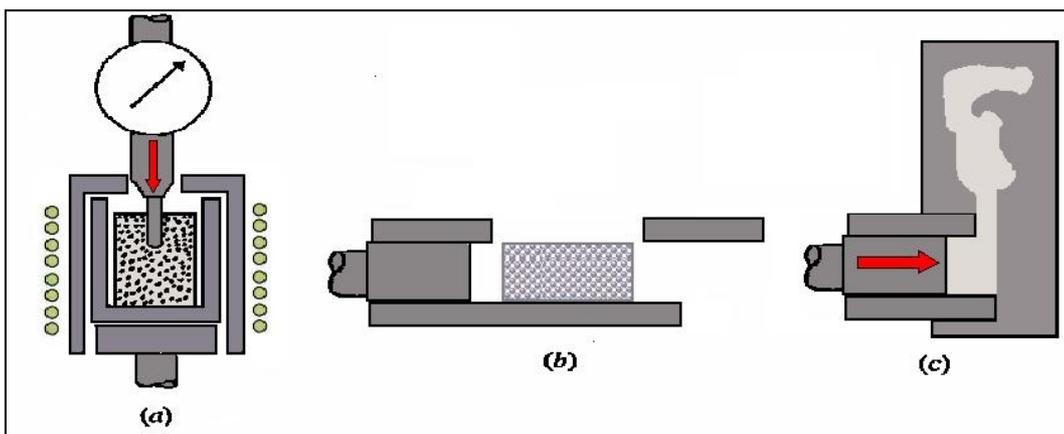


Figura 1.12. Proceso de conformado por Thixocasting: a) Calentamiento hasta el estado semisólido, b) Inserción del material en estado semisólido en la máquina de inyección, c) Fundición inyectada [Fle91].

Algunas empresas, como Bühler, han diseñado máquinas para estos procesos (Fig. 1.13). En este caso se trata de la adaptación de una máquina de inyección a presión, y el material se prepara en un horno adjunto [Kenn88].

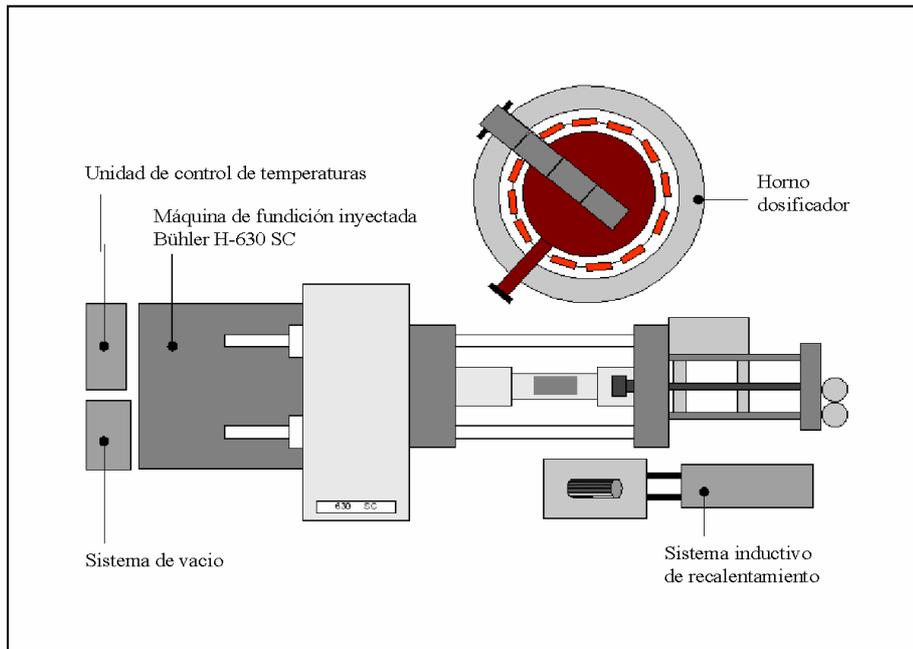


Figura 1.13. Esquema del proceso adaptado por Bühler [Mül98].

I. Ventajas del Thixocasting

Las ventajas del proceso de conformación por Thixocasting, comparado con el procedimiento convencional de la fundición inyectada, son las siguientes [Val96]:

- Al eliminar el proceso de fusión total, se evita la emisión de gases perjudiciales para la atmósfera o el operario.
- Reducción de la temperatura de trabajo: la temperatura del lingote es más baja que la temperatura líquida, 100 °C por debajo de la producción tradicional. Ello conlleva un ahorro energético, que puede llegar al 65% respecto al moldeado tradicional (Tabla 1.2).
- Menor temperatura de inyección.
- Obtención de componentes con menos defectos, debido tanto a la eliminación de impurezas, escorias y fundentes, como a la reducción de las temperaturas de

trabajo, con lo que las distorsiones térmicas y las contracciones de solidificación son inferiores.

- Menor cantidad de lubricante en los moldes, a causa de la reducción de temperaturas.
- Menor porosidad gaseosa, debido a que el fluido penetra en el molde con flujo laminar.
- Reducción de la contracción durante la solidificación (rechupe).
- Tiempos de solidificación más cortos.
- Rápido arranque y parada (alrededor de 1 hora).
- Mayor duración de los moldes. Al ser menor la temperatura del proceso, se reduce notablemente el deterioro de los mismos, incrementándose su vida en un 20%.

Tabla 1.2. Consumo energético para la conformación de aleaciones de aluminio.

	Moldeo por gravedad	Moldeo por inyección	Thixocasting
Temperatura de colada, °C	740	700	580
Energía térmica utilizada, J/g	637	595	288

Mediante la técnica del Thixocasting se pueden producir piezas de igual o mayor complejidad que por fundición inyectada.

II. Inconvenientes del Thixocasting

Los inconvenientes de la conformación por Thixocasting son los siguientes [Chi00] [Fle00] :

- Elevado coste de la materia prima (lingote de Rheocasting).
- Elevado coste del horno de inducción para el recalentamiento de los lingotes.
- Elevado coste de los controles "no destructivos".
- Elevada relación entre el peso del material de partida y el componente acabado, debido a la cantidad de material de rechazo.
- Restricción en la composición de la aleación.

III. Microestructura de un componente de Thixocasting

La microestructura de una aleación conformada por Thixocasting consiste en glóbulos de fase α , rodeados de un microconstituyente eutéctico modificado y muy fino (Fig. 1.14a). En el interior de los granos α se distinguen islas de eutéctico de dos tipos: unas con la misma apariencia que el que rodea a la fase α y otras de un eutéctico ocluido mucho más fino. Estas formas eutécticas, en el interior de los granos de α no aparecen en los materiales conformados por Rheocasting (Fig. 1.14b).

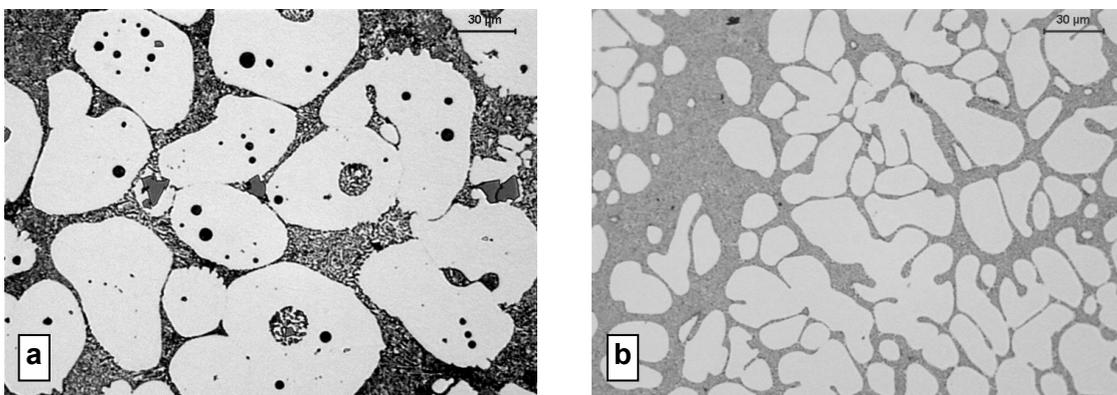


Figura 1.14. Microestructura de la aleación A357 conformada por: a) Thixocasting y b) Rheocasting.

Un parámetro muy importante, para caracterizar la microestructura de las aleaciones en estado semisólido, es la cantidad de líquido atrapado y ocluido dentro de los glóbulos. Este líquido no afecta al comportamiento del lodo semisólido, pero reduce la fracción efectiva de volumen que actúa como lubricante, según el diagrama de equilibrio. En consecuencia, la viscosidad del lodo semisólido es más alta de lo que se esperaba. Por tanto, es necesario considerar el líquido retenido (atrapado u ocluido).

En las aleaciones aluminio-cobre, se observa claramente que el líquido ocluido forma esferoides, y solidifica de una manera anómala, constituyendo la fase θ , Al_2Cu [Sue98]. Contrariamente, el líquido que no está realmente ocluido, solidifica en formas más globulares, y forma parte de la estructura continua interdendrítica. Los parámetros que influyen en la aparición de líquido ocluido en las aleaciones en estado semisólido no son bien conocidos.

Algunos autores [Ahr03] [Lac96], han estudiado esferoides similares, que aparecen entre las dendritas, en las aleaciones aluminio-cobre-magnesio-silicio solidificadas directamente (Fig. 1.15). Se han estudiado mediante SEM y EDX, y parecen contener un eutéctico multifásico. El mapping EDX de estas inclusiones esféricas revela una microestructura de roseta, en la que las láminas de silicio y aluminio emergen del centro hacia la periferia. El hierro y el magnesio enriquecen la periferia de los esferoides al precipitar partículas ricas en hierro y magnesio.

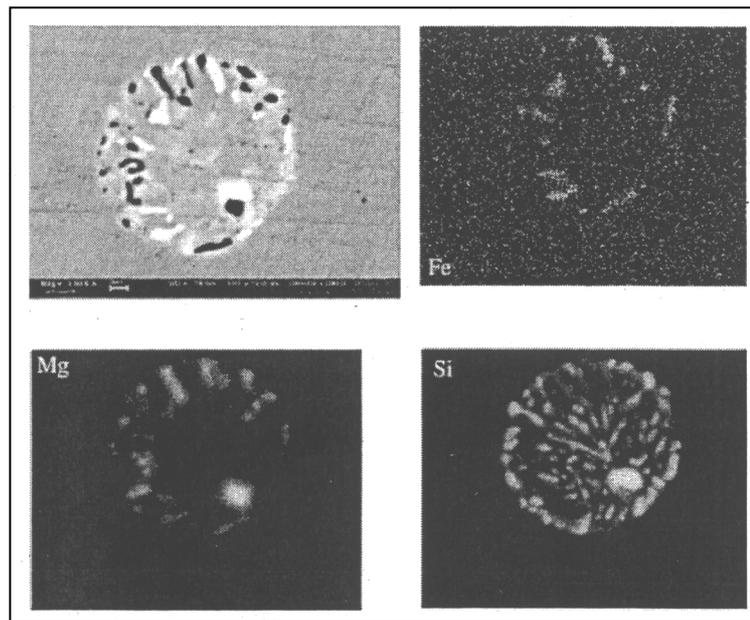


Figura 1. 15. Imagen SEM y mapas de hierro, magnesio y silicio de los esferoides de una aleación AlCuSiMg [Ahr03].

IV. Defectos de las piezas conformadas por Thixocasting

El proceso de Thixocasting ofrece innegables perspectivas de mejora en lo que respecta a la libertad de diseño, producción, compactación y propiedades mecánicas de los componentes. En el trabajo de Loué [Lou95], se han puesto de manifiesto las correlaciones entre la microestructura inicial, la microestructura y la reología del metal semisólido después del calentamiento, y la formación de defectos de moldeo durante las tres etapas del proceso. Se ha observado que los materiales conformados en estado semisólido tienen una gran capacidad de reproducir por refusión a la temperatura de semisólido, la microestructura y la distribución inicial de las fases.

En la Tabla 1.3 se indican los defectos típicos del proceso de Thixocasting así como sus posibles causas [Lou95] [Ken88]. Estos defectos están clasificados en orden descendente de influencia sobre las propiedades mecánicas (especialmente en el alargamiento a rotura).

Tabla 1.3. Defectos típicos del Thixocasting y sus posibles orígenes [Lou95][Ken88].

Tipo de defectos	Posible origen
Capa de óxido	Inyección de capa oxidada del lingote
	Unión de frentes de lodo oxidados
	Reología del lingote insuficiente
	Velocidad de la inyección demasiado alta
Segregación del eutéctico	Aplicación tardía de la presión final
	Velocidad de la inyección demasiado baja
	Sección demasiado delgada
Coalescencia de cristales de silicio	Refundido incompleto
	Sólido eutéctico excesivamente recalentado
Porosidad de contracción	Masa aislada de metal
	Molde demasiado frío
	Aplicación tardía de la presión final
	Velocidad de la inyección demasiado baja
Relleno incompleto de la matriz	Bajo nivel de temperatura
Microporosidades gaseosas	Elevada velocidad de inyección
Burbujas en la superficie	Contaminación de la superficie de la matriz
Solapes	Fusión incompleta
	Oxido atrapado

Las capas de óxido, de diferentes orígenes, son los defectos más perjudiciales de este proceso. Hay que evitarlos para que se puedan obtener componentes con propiedades mecánicas elevadas. Un adecuado diseño de la cavidad del molde y del sistema de alimentación permite la eliminación parcial de estos óxidos.

En lo que respecta al resto de defectos, es necesario un control de la relación entre microestructura y reología del lodo durante el calentamiento, para llevar a cabo un correcto llenado del molde y la fabricación de un componente con elevadas propiedades mecánicas.

A continuación se describen los principales defectos resumidos en la Tabla 1.3.

Capa de óxido

Los defectos más perjudiciales son las capas de óxido formadas durante el llenado del molde o arrastradas al interior del componente a partir de la capa exterior del lodo. El sistema de alimentación debería, por lo tanto, diseñarse para prevenir la inyección de la capa de óxido del lodo en el canal de entrada.

Las capas de óxido formadas durante el llenado del molde son más difíciles de controlar. Inevitablemente, el frente de material metálico se cubre con una capa de óxido durante el llenado del molde. Cuando dos flujos de material metálico se unen, estas capas no se eliminan de un modo natural, pues la viscosidad es mucho mayor que la tensión superficial, al contrario de lo que ocurre en la colada de un metal totalmente líquido. La Fig. 1.16 muestra un ejemplo de este defecto, conocido como unión fría.

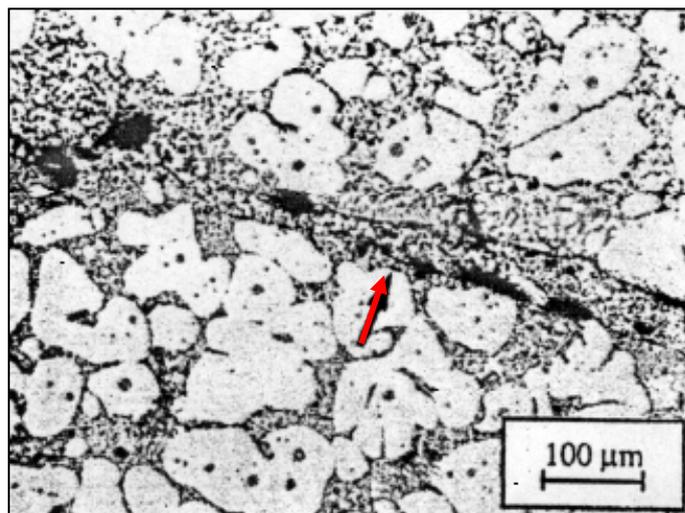


Figura 1.16. Capa de óxido formada durante el relleno de cavidad del molde (la flecha indica las capas de óxidos de metal) [Lou95].

Las capas de óxido pueden eliminarse utilizando un rebosadero bien posicionado. Este problema de unión de flujo de material metálico (línea de soldadura, línea de unión de flujo) hay que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar el molde.

Otra causa de la formación de la capa de óxido es el aire atrapado durante el llenado del molde. El origen del aire atrapado puede ser un mal comportamiento reológico del lodo, o bien ser debido a que el lodo estaba demasiado frío, o a que la microestructura después del recalentamiento no era la adecuada (factor de forma demasiado elevado). En ambos casos, la fracción efectiva de líquido es demasiado baja para asegurar un flujo homogéneo del metal semisólido. Incluso cuando el comportamiento reológico del lodo sea correcto, puede ocurrir que haya quedado gas atrapado, al haber utilizado una velocidad de inyección demasiado elevada, provocando con ello un flujo turbulento e inestable.

Para garantizar un frente laminar en el llenado del molde, se recomienda una máquina de inyección de alta presión, con un control del perfil de la cantidad inyectada en bucle cerrado. La última causa de aire atrapado u ocluido en el proceso clásico de inyección de alta presión es muy conocida, y se produce cuando la capacidad de las salidas de aire resulta insuficiente, o cuando están mal posicionadas.

Segregación del eutéctico

Las segregaciones de eutéctico constituyen otra familia de defectos típicos. Se pueden distinguir dos posibles causas:

La primera, responsable de la segregación subsuperficial, está relacionada con un retraso en la aplicación de la presión después del llenado del molde. Durante esta demora, el componente sufre una ligera contracción a partir de las paredes del molde. Una vez se aplica la presión de alimentación final, el líquido remanente, de composición eutéctica en las aleaciones A356 y A357, puede romper en algunos puntos la capa solidificada del componente, y rellenar el hueco que existe entre el componente y la pared del molde. La piel inicial del componente se encuentra así atrapada en el propio componente, lo que conduce a la formación de ampollas (blisters) durante la etapa de puesta en solución correspondiente a un tratamiento térmico posterior (Fig. 1.17).

La segunda causa posible de la segregación eutéctica es un llenado del molde demasiado lento, en ocasiones incrementada por la inyección de un lodo relativamente frío o por la inyección en un molde relativamente frío. Al final del llenado del molde, los frentes de metal se encuentran demasiado fríos, como para que se produzca de nuevo una completa soldadura o unión. La zona de soldadura se rellena entonces con líquido eutéctico, una vez se aplica la presión de alimentación final. De nuevo, para evitar este defecto, resulta muy importante el llevar a cabo un buen diseño del molde, así como la mejora del perfil de la masa inyectada.

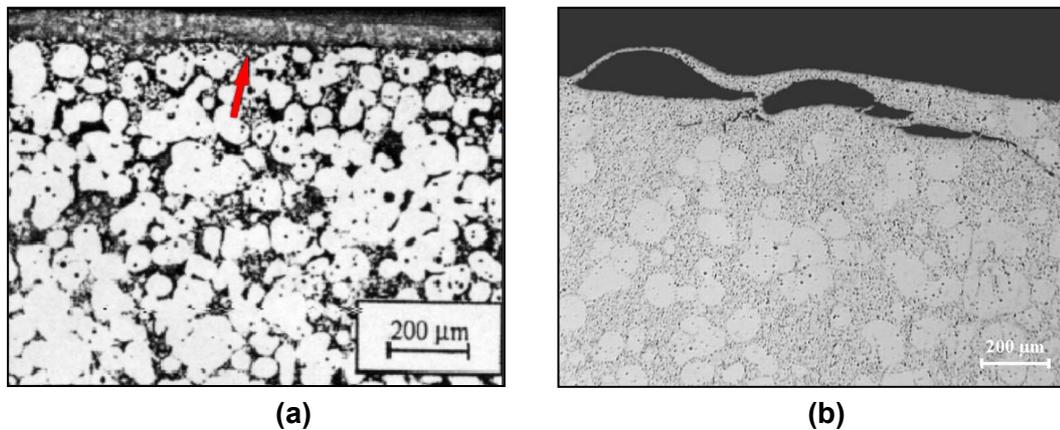


Figura 1.17. (a) Segregación de eutéctico de subsuperficie, atrapando la piel de óxido de superficie inicial de la parte conformada [Lou95], (b) piel de óxido indicada por una flecha- y dando lugar a la formación de ampollas durante la puesta en solución en un posterior tratamiento térmico.

Coalescencia de cristales de silicio

Este defecto es extremadamente perjudicial para las propiedades mecánicas. En el caso que se encuentren coalesciendo gruesos cristales de silicio en un componente, se tiene que verificar el nivel y homogeneidad del recalentamiento y asegurarse de que la fase eutéctica se ha fundido de nuevo completamente.

Porosidad de contracción

El último defecto, menos perjudicial que los anteriores, es menos usual en el proceso de Thixoforming (Fig. 1.18). Como en todos los procesos de moldeo, se tiene como meta el conseguir buenos componentes (moldeo en arena, moldeo en molde permanente, inyección a baja presión y Squeeze Casting), por lo que se deben respetar las reglas elementales para evitar la porosidad de contracción, aunque la

contracción sea menor que la que se produce durante la solidificación de una aleación completamente líquida (alrededor de una 6 o 7% de volumen [Gab93]).

La inyección en un molde relativamente frío, la inyección a baja velocidad, o un retraso considerable en la aplicación de la presión de alimentación final aumentan la formación de porosidad de contracción. También se debe mantener un espesor del lingote (galleta), como mínimo igual al diámetro del diafragma, y limitar su enfriamiento por el pistón.

En los procesos de solidificación a alta presión, la diferencia entre las densidades, antes y después de un tratamiento térmico, puede obtenerse midiendo la porosidad en el componente. En la Tabla 1.4 se pone de manifiesto la baja porosidad de los componentes de Thixocasting después de un tratamiento térmico a 530 °C.

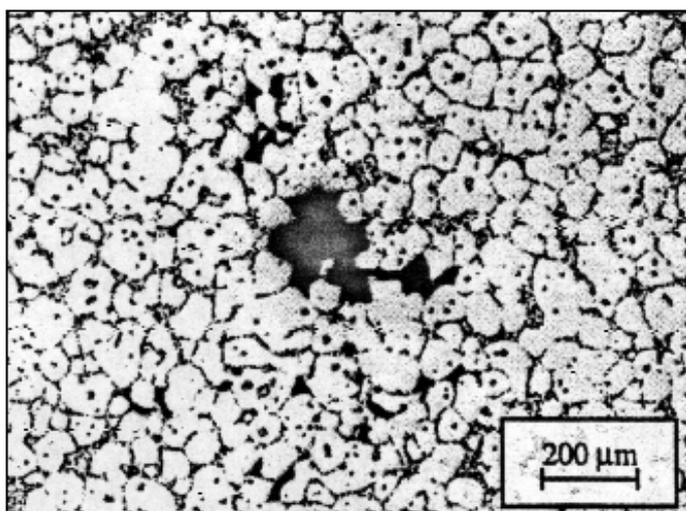


Figura 1.18. Porosidad [Lou95].

Tabla 1.4. Cálculo de la porosidad [Gab93].

Proceso	Componente	Aleación	Densidad / g.cm ⁻³ (estado bruto de colada)	Densidad / g.cm ⁻³ (tratamiento a 530 °C)	Incremento porosidad, %
Inyección a presión estandar	Típico para este proceso	A239	2,696	2,642	1,0 - 3,0
Thixocasting	Portaequipajes	A356	2,683	2,681	< 0,1

El análisis cualitativo de los gases presentes y la comparación semicuantitativa de las concentraciones se ha realizado por termogravimetría, combinada con espectrometría de masas, utilizando muestras del interior de los componentes [Gab93]. Los gases que escapan de los componentes se registran en función de la temperatura. El único gas que se encontró en componentes de Thixocasting fue el hidrógeno. Se detectaron concentraciones en torno a 0.1 ml/100 g utilizando un método standard de extracción caliente. Este valor corresponde a la concentración de hidrógeno presente en los lingotes de inyección (DC-casting).

Estas medidas directas e indirectas de porosidad permiten concluir que los componentes obtenidos por Thixocasting presentan bajo nivel de porosidad.

Relleno incompleto de la matriz

Bajos niveles de temperatura pueden ocasionar un enfriamiento prematuro.

Burbujas en la superficie.

Se producen por la contaminación de la superficie de la matriz con sustancias lubricantes y fluidos hidráulicos. Se eliminan disminuyendo la contaminación y la velocidad de entrada del metal.

Solapes y uniones frías

Ocurren por una fusión incompleta de dos superficies metálicas en contacto, o por una película de óxido que queda atrapada (como ya se ha explicado anteriormente). Pueden evitarse cambiando las condiciones del flujo metálico y mejorando las salidas de aire.

V. Propiedades mecánicas de los componentes conformados por Thixocasting

Debido a la baja velocidad de inyección, y a la alta viscosidad del material comparada con la del líquido, no hay aire atrapado en las piezas conformadas en estado semisólido. Ello permite realizar tratamientos térmicos, lo que provoca una notable mejora de las propiedades mecánicas. Así, se encuentran ejemplos en la bibliografía, tal y como se puede ver en la Tabla 1.5 [Lou95] y [Sue98].

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de piezas de Thixocasting [Lou95] [Sue98].

Componente	Aleación	Tratamiento	Rp _{0,2} /MPa	Rm/MPa	A /%
Tubo de combustible	A356	F	105	220	9-11
Manillar bicicleta	A356	T6	260	325	11-14
Probeta de ensayo	A357	T6	290	345	9-11

Estos autores han realizado análisis fractográfico de las probetas de tracción de la aleación A356, en estado bruto de colada y con T6, para determinar los mecanismos de deformación y fractura de los materiales de Thixocasting. Estos análisis indican que, en las muestras sin tratar, los glóbulos de la fase α presentan deformación plástica, y cierta decohesión alrededor de las bolas de eutéctico atrapado, y que la fractura tiene lugar tanto a través del eutéctico como de los glóbulos.

El material tratado con T6 muestra comportamiento diferente a causa de la presencia de muchas y gruesas partículas de silicio y glóbulos α más duros que el material sin tratar. En este caso, la deformación plástica produce, inicialmente, la fractura en torno a las partículas de silicio, y finalmente la ruptura de la muestra.

Científicos de la empresa Honda [Ide98], han realizado un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de componentes de la aleación ALTHIX 865 (5,76 %Si, 2,90 %Cu y 0,35 %Mg) conformados por Thixocasting, Squeeze Casting y forja en caliente y con tratamiento T6. Así, los componentes obtenidos por conformación semisólida tienen valores de resistencia a tracción, límite elástico y alargamiento, intermedios entre los obtenidos por Squeeze Casting y forja en caliente. El límite elástico está muy cerca del valor obtenido por la forja en caliente, lo cual sugiere que la calidad interna de los productos de Thixocasting está próxima a la de la forja en caliente.

Kirkwood comparó las propiedades de componentes A356 conformados por distintas técnicas, y concluyó que los componentes obtenidos por Thixocasting con tratamiento T6 tienen mejores características mecánicas que los componentes conformados en

molde permanente, y próximas a las de los obtenidos por forja. La ductilidad de las muestras de Thixocasting es particularmente notable [Kir94].

Se ha realizado un estudio bibliográfico comparativo de las propiedades mecánicas de distintas aleaciones de aluminio conformadas por distintas técnicas que se resume en las Tablas 1.6 y 1.7 [Gab93] [Kir94] [You00] [Kaz00] [Bas00].

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio de moldeo.

Aleación	Proceso	Tratamiento	Rp _{0,2} /MPa	Rm/ MPa	A/%	HB
A356 (Al-7Si-0,3Mg)	TC[You00]	T6	225	300	12	90
	TC[Kir94]	T6	256	300	11	...
	TC[Gab93]	T6	240	320	12	105
	TC[Gab93]	T7	260	310	9.0	100
	TC[You00]	T5	170	260	15	89
	TC[Kir94]	T5	180	225	5-10	80
	PM[Kir94]	T6	186	262	5.0	80
	SQC[You00]	T6	225	300	12	90
	PM[Kaz00]	T6	205	280	10	-
A357 (Al-7Si-0,5Mg)	TC[Bas00]	T6	290	358	10	100
	TC[Gab93]	T6	260	330	9	115
	TC[Gab93]	T7	290	330	7.0	110
	TC[Bas00]	T5	210	290	10	90
	PM[Bas00]	T6	296	359	5.0	100
	PM[Kir94]	T5	145	200	4.0	...

*SQC squeeze casting; PM molde permanente; TC Thixocasting

Tabla 1.7. Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio de forja [Kir94].

Aleación	Proceso	Tratamiento	Rp _{0,2} /MPa	Rm/ MPa	A/%	HB
2017(Al-4Cu-Mg)	TF	T4	276	386	8.8	89
	W	T4	275	427	5,3	105
2024(Al-4Cu-1Mg)	TF	T6	277	366	9.2	...
	W	T6	393	476	10	...
	W	T4	324	469	19	120
2219(Al-6Cu)	TF	T8	310	352	5.0	89
	W	T6	260	400	8.0	...
6061(Al-1Mg-Si)	TF	T6	290	330	8.2	104
	W	T6	275	310	12	95
7075(Al-6Zn-Mg-Cu)	TF	T6	421	469	7.0	135
	TF	T6	361	405	6.6	...
	W	T6	505	570	11.0	150

* TF Thixoforging ; W forja

De los datos de las Tablas 1.6 y 1.7 se deduce que un simple tratamiento de envejecimiento, con temple en proceso, proporciona una mejora en las propiedades. De todas formas, es difícil realizar una comparación precisa de las propiedades en los tratamientos T6. Por ejemplo, la mayor temperatura de envejecimiento en el T7 (sobreenvejecimiento), comparado con el T6, provoca un aumento del límite elástico y una pérdida de ductilidad. Las aleaciones para forja no han sido muy estudiadas en condiciones de Thixocasting, pero todo indica que no se llega a las altas resistencias y ductilidades que estas aleaciones son potencialmente capaces de alcanzar en piezas forjadas.

En la Fig. 1.19 se ilustra la mejora en las propiedades mecánicas que ofrece el conformado por Thixocasting respecto otros procesos, en la aleación A356. En dicha figura se muestran los valores de límite elástico y alargamiento típicos de la inyección a presión, molde permanente por gravedad (metálico o coquilla), moldeo en arena y

Thixocasting. Las curvas delimitan los límites superiores típicos que se obtienen con estos procesos.

En conclusión, se puede afirmar que los valores de la resistencia bajo carga monotónica del Thixocasting son constantes y mayores que los valores obtenidos con los procesos de moldeo, tales como moldeo en arena, moldeo en molde permanente o inyección (Tabla 1.6).

Otros estudios sobre el efecto de los tratamientos térmicos T4, T5, T6 y T7, en las aleaciones aluminio-silicio más utilizadas en Thixocasting, son los de Gabathuler y otros [Gab93]. Estos investigadores tomaron muestras de las zonas más gruesas de unos componentes (sección transversal aproximada de 20-30 mm) y realizaron ensayos de tracción en estado bruto de colada y bajo condiciones de tratamiento térmico. Las dimensiones de las piezas fueron: 9 mm de diámetro, 100 mm de longitud, 6mm de diámetro de la parte analizada. Los resultados para estas aleaciones AlSi7Mg0.3 (A356) y AlSi7Mg0.6 (A357) se muestran en la Tabla 1.8.

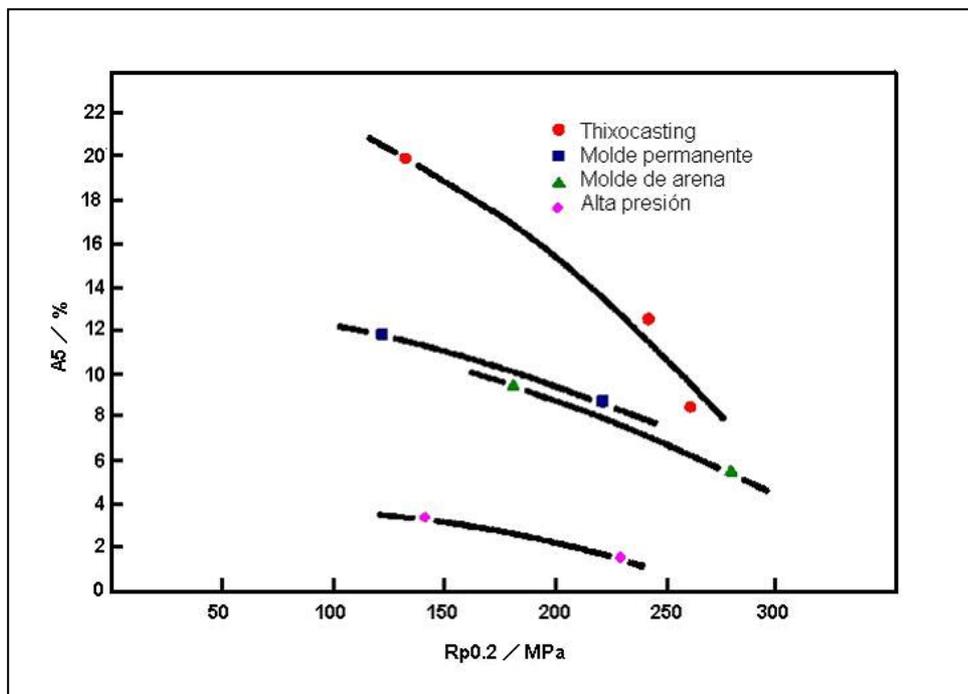


Figura 1.19. Propiedades mecánicas de piezas de Thixocasting A356 comparadas con otros procesos [Gab93].

Tabla 1.8. Propiedades mecánicas en función de los tratamientos térmicos [Gab93].

	AlSi7Mg0.3 (A356)				AlSi7Mg0.6 (A357)			
	Rp _{0.2} /MPa	Rm /MPa	A /%	HB	Rp _{0.2} /MPa	Rm /MPa	A /%	HB
Estado bruto de colada	110	220	14	60	115	220	7	5
T4: 520 °C/2h, H ₂ O, 20 °C/96h	130	250	20	70	150	275	15	85
T5: 180 °C/4h, enfriada al aire	180	255	5 - 10	80	200	285	5 - 10	90
T6: 520 °C/2h, H ₂ O, 160 °C/7h	240	320	12	105	260	330	9	115
T7: 520 °C/2h, H ₂ O, 205 °C/1h	260	310	9	100	290	330	7	110

Con la aleación AlSi7Mg0.3 se puede conseguir una elevada ductilidad con un alargamiento a rotura de hasta un 20% (T4), así como una elevada resistencia (T6 o T7). La aleación AlSi7Mg0.6 permite incluso obtener valores de resistencia más elevados (Rp_{0.2} hasta 290 MPa), pero con un alargamiento a rotura algo inferior. Las desviaciones standard son notablemente bajas: Rp_{0.2} y Rm: ±10 MPa; A%: ±2%; dureza: ±5 HB.

El tratamiento T5 conduce a alargamientos a rotura que dependen del espesor del componente: para componentes con un espesor de más de 10 mm, el alargamiento está en torno al 5%. Para componentes más delgados, el alargamiento puede alcanzar hasta un 10%.

Algunos autores han propuesto un índice de calidad que permita interpretar mejor la relación de parámetros tales como la composición, la microestructura o el proceso de fundición, con las propiedades mecánicas [Bas01]. Así, el índice de calidad (Q) para la aleación AlSi7Mg se define como:

$$Q = R_m + 150 \log (\% A) \quad (1.1)$$

donde R_m es la resistencia a la tracción (MPa); %A es el alargamiento en porcentaje.

Los autores han utilizado el índice de calidad se para evaluar las propiedades de la aleación A357 conformada por Thixocasting y tratada con T6.

Estos autores concluyen que el tamaño de glóbulos de fase α tiene influencia en Q: al disminuir el tamaño de glóbulo se produce un incremento de Q. Este resultado está corroborado por otros autores [Plu95] [Stu98] [Shi96]. Esta relación es similar a la que existe entre el espaciado entre los brazos dendríticos y las propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio-silicio-magnesio de fundición: mientras que el límite elástico no se ve prácticamente afectado, la resistencia a tracción y la ductilidad incrementan cuando disminuye el espaciado entre brazos dendríticos.

La medida de las propiedades de fatiga de la aleación A356 con T6 se muestra en la Fig. 1.20 [Gab93]. Se observa una notable mejora en la resistencia a la fatiga de los componentes de Thixocasting frente a otras técnicas convencionales, lo cual se atribuye a una microestructura fina y uniforme. El proceso de inyección muestra los valores más elevados de resistencia a fatiga, mientras que el moldeo en arena, con una microestructura más grosera, da los valores más bajos [Gab93] [Dav00].

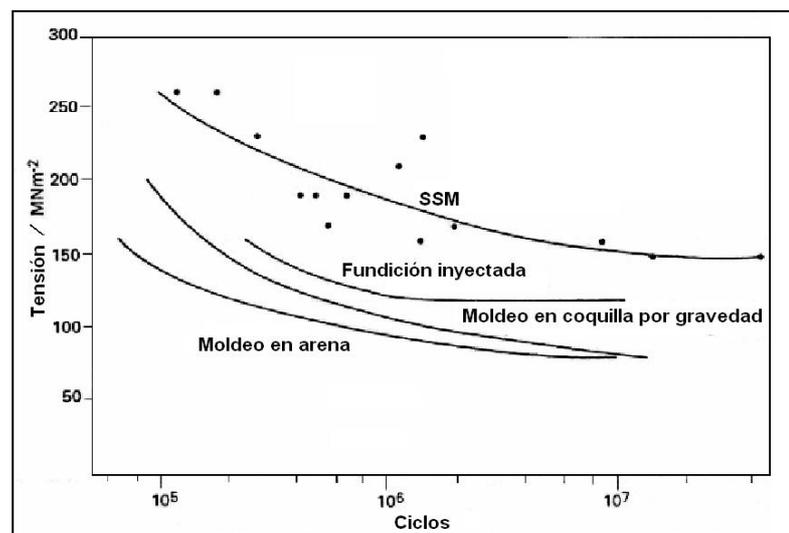


Figura 1.20. Comportamiento a fatiga de la aleación A356 conformada por Thixocasting, comparada con otros procesos [Gab93].

VI. Soldadura de componentes conformados por Thixocasting

Algunos investigadores han realizado ensayos de soldadura en componentes A357 obtenidos por Thixocasting [Gab93]. Las muestras, tomadas del canal de alimentación, se mecanizaron en forma de pequeñas láminas, y se soldaron juntas mediante el

procedimiento MIG, o bien se unieron a una aleación AlSi0.5Mg0.5 (AA6106). Se utilizó como varilla de aportación AlSi5. Las radiografías y el análisis microscópico indicaron que existe una pequeña porosidad en la soldadura. La estructura era fina, homogénea y de la calidad requerida para conseguir unas buenas propiedades de la unión.

Estos mismos autores realizaron ensayos de tracción (dimensiones de las probetas: 220 mm de longitud, 4 mm de espesor, cabeza de 27 mm y porción analizada de 20 mm). Los resultados se indican en la Tabla 1.9.

Los valores de límite elástico son muy similares a los obtenidos en las muestras sin soldar, pero los valores de alargamiento son mucho más bajos. Esto es debido al hecho de que el alargamiento ocurre de manera localizada cerca de la soldadura y no es homogéneo a lo largo de toda la probeta. Las diferencias entre la soldadura Thixocasting-Thixocasting y Thixocasting-perfil no son significativas.

La elevada calidad de la soldadura y la baja desviación standard, demuestra claramente que el proceso de Thixocasting es idóneo para la soldadura con arco.

Tabla 1.9. Propiedades de la soldadura [Gab93].

Combinaciones de soldadura	Tratamiento térmico	Rp _{0.2} /MPa	Rm /MPa	A ₁₀ /%	Dureza HB
Thixocasting - perfil**	Estado bruto de colada	125±10	200±20	2.0±1.0	65
Thixocasting - Thixocasting ^C	Estado bruto de colada	120±10	190±20	2.5±0.5	65
Thixocasting - perfil**	T4	145±10	220±20	3.0±1.0	80
Thixocasting - Thixocasting*	T4	145±10	210±20	4.0±1.0	70

*A357

**AA6106

1.3.2 Compocasting

El Compocasting es el resultado de mezclar partículas cerámicas con un metal en estado semisólido para un posterior proceso de forja o fundición [Fle91].

En una investigación sobre Rheocasting realizada en el MIT, se detectó que las mezclas semisólidas, por su elevada y controlada viscosidad, son excelentes materiales de comienzo para el proceso de Compocasting. Se encontró que algunas partículas cerámicas, por ejemplo el SiC, al añadirlas a las mezclas semisólidas, se mantenían en suspensión, y que estos lodos presentaban un comportamiento thixotrópico. Investigaciones realizadas por Moon [Moo90], han demostrado que se puede añadir partículas al metal líquido, y que la mezcla semisólida mejora la mojabilidad y la dispersión.

En la Fig. 1.21a se muestra la viscosidad frente a la velocidad de cizalladura para una aleación de Al-6,5 %Si con fracciones del volumen del 10, 20 y 30% de SiC.

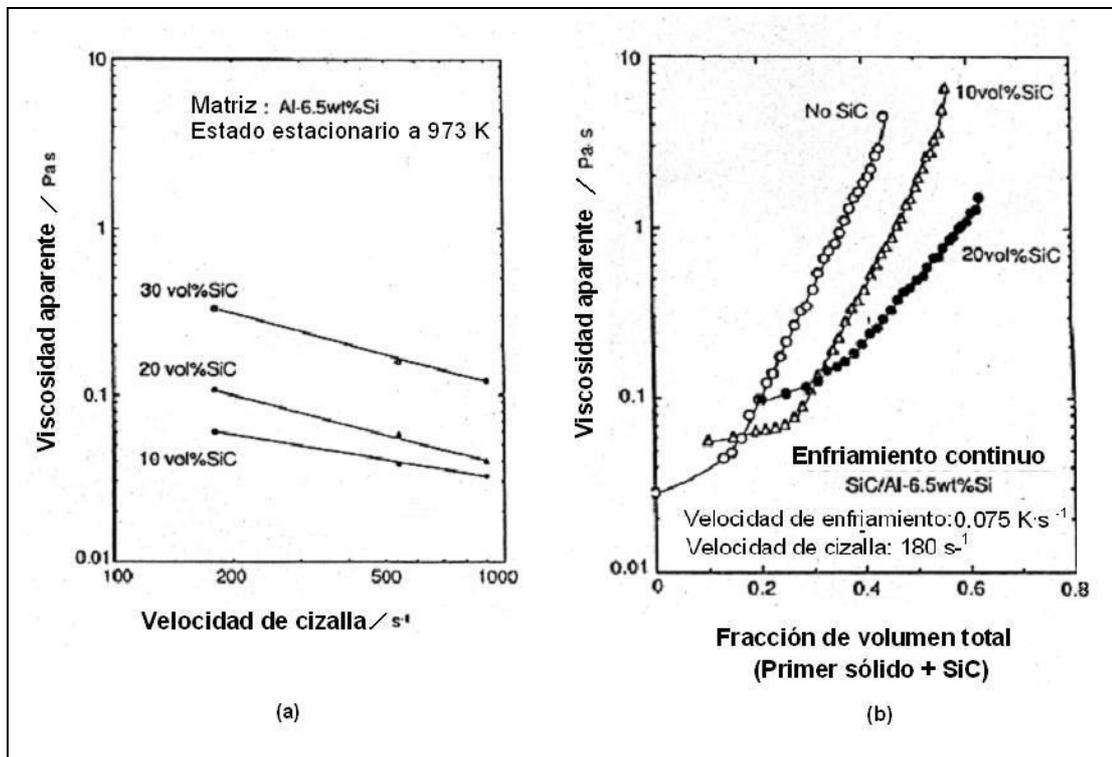


Figura 1.21. Efecto de la velocidad (a) y del volumen de fracción sólida (b) en la viscosidad aparente [Fle91].

La Fig. 1.21b muestra la viscosidad durante el enfriamiento, en el rango semisólido, para una aleación sin carburo de silicio y con 10 y 20% en volumen de SiC.

Se ha demostrado que la viscosidad aparente de una mezcla compuesta de partículas cerámicas, y metal en estado semisólido, es menor que la mezcla equivalente que no las contiene. Esto es posible porque las partículas cerámicas impiden a las partículas metálicas juntarse y coalescer. Esta conclusión se corresponde con la observación de que la tixotropía y la pseudoplasticidad aumentan, en los lodos de aluminio, por la adición de SiC. La presencia de materiales cerámicos acelera la evolución morfológica de las partículas metálicas solidificadas hacia formas más esferoidales.

1.3.3 Thixomolding

El Thixomolding [Pas92][Car96], patentado por Down Chemical [Eri87], y desarrollado específicamente para las aleaciones de magnesio, consiste en un dispositivo similar a las máquinas de inyección utilizadas en la industria del plástico (Fig. 1.22).

La carga de la tolva se realiza con material peletizado, que es empujado hacia la zona de inyección por un tornillo sin fin. Las fuerzas de fricción generadas, y el uso de calefactores externos, provocan la fusión parcial y la obtención de estructuras no dendríticas. Finalmente, el lodo obtenido es inyectado en el molde.

Esta técnica realiza la producción del material thixotrópico en la propia máquina de inyección, por lo que disminuye notablemente el coste de producción. El inconveniente que presenta es el precio de la maquinaria y su mantenimiento.

En 1998 Down Chemical vendió 40 de estas máquinas, que se unieron a las 37 anteriores, y produjeron 10 millones de componentes para la industria del automóvil en USA, Canadá, Japón, Suecia y Alemania. Hoy día, este proceso se utiliza principalmente en la fabricación de aparatos electrónicos de consumo, y en segundo lugar en la industria automovilística [Leb02].

De todas formas, parece que este proceso está limitado a bajas fracciones de sólido, a aleaciones de magnesio, y a aleaciones de bajo punto de fusión [Fle00].

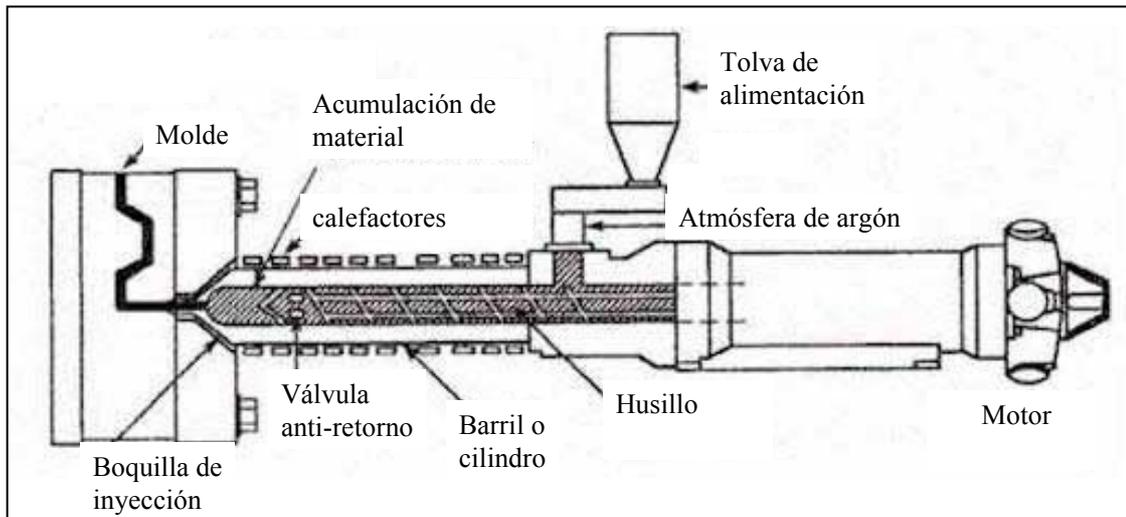


Figura 1.22. Esquema de la máquina *Thixomolding* [Car96].

1.3.4 New Rheocasting

UBE patentó en 1996 una nueva forma de conformado en estado semisólido [Pate96], el proceso New Rheocasting NRC [Ada98] [Kau99] [Kauf00] [Luk02].

Esta técnica combina la tecnología del Vertical Indirect Squeeze Casting con una nueva manera de procesar el material globular precursor. Todo el líquido fundido se coloca en un horno caliente y se cuele en un carrusel de crisoles especialmente diseñado, bombeando el aluminio desde el horno de mantenimiento. Los crisoles se enfrían mediante chorros de aire homogéneamente distribuidos en su entorno.

La estructura globular se obtiene controlando el enfriamiento del lingote durante el proceso de solidificación. En la etapa final del carrusel, se alcanza el estado semisólido, y la temperatura se homogeneiza en todo el crisol mediante un horno de inducción. Un brazo robotizado coge la lingotera e, invirtiéndola, deja caer el lingote en la máquina NRC y a continuación se inyecta.

En la Fig. 1.23 aparece una fotografía de la máquina de UBE. El esquema de este proceso está en la Fig. 1.24. En la Fig. 1.25 se presenta un esquema del control de temperatura.



Figura 1.23. Máquina de New Rheocasting UBE HVSC PL-800 NRC en el laboratorio de LKR [Wabu00].

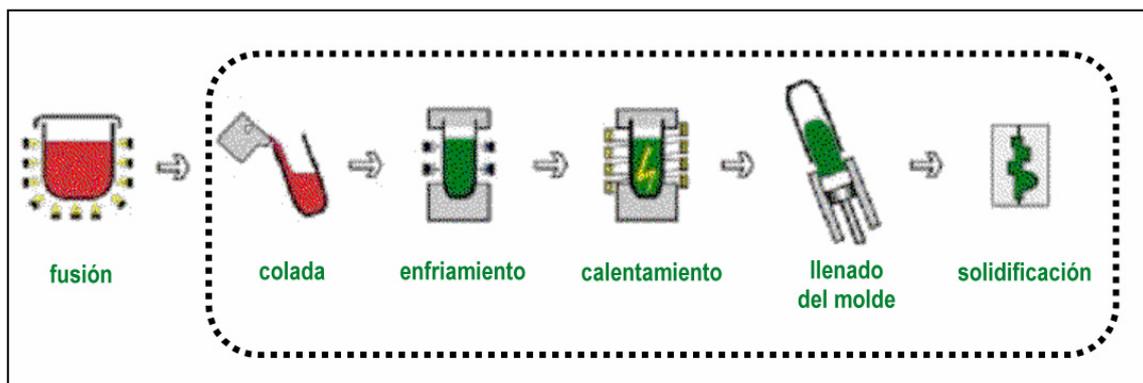


Figura 1.24. Etapas del proceso de New Rheocasting [Swiss Federal Ins. of Technology Zurich].

El llenado del molde es lento, y se realiza de abajo arriba, como en baja presión, lo que permite el flujo laminar, y que el aire sea expulsado fuera de la cavidad del molde y no quede atrapado.

La inyección de la máquina es vertical, no atrapa tantos gases y aire como ocurre en la inyección horizontal, se realiza un mejor control de la temperatura, y la solidificación de la aleación es más uniforme y concéntrica que en la inyección horizontal [Bor99].

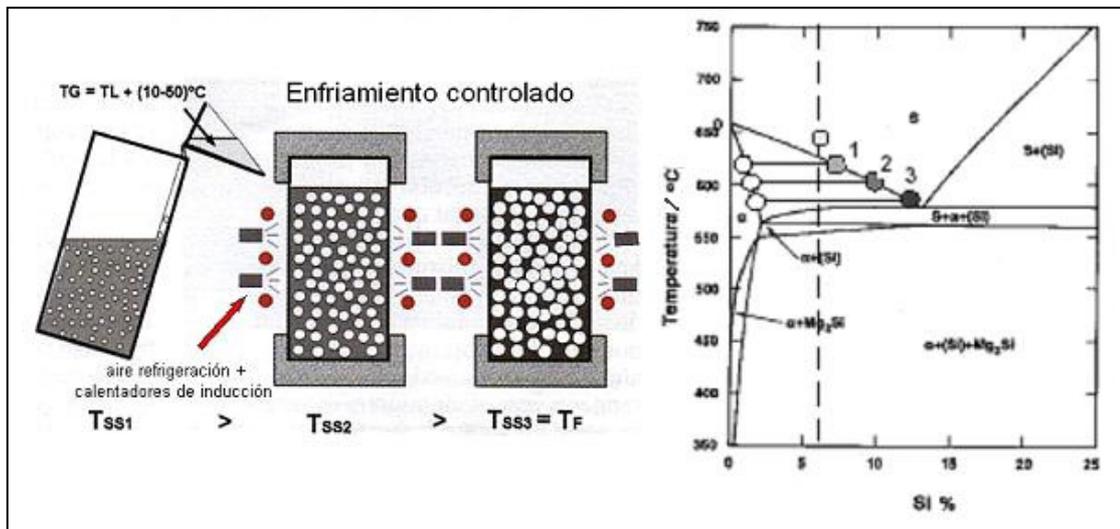


Figura 1.25. Esquema del proceso de control de T en el New Rheocasting, para una aleación AlSi7Mg0.3 T_L temperatura liquidus, T_G temperatura del horno de mantenimiento, T_{ss1} a T_{ss3} temperaturas semisólido durante el enfriamiento controlado, y T_f temperatura de inyección semisólida [Wabus00].

La velocidad de inyección es muy lenta (0,1 m/s) en comparación con la inyección convencional (4-5 m/s). Los canales de entrada del material son más gruesos. La composición del semisólido en el carrusel debe estar entre el 50-60% de fase sólida.

De todas maneras, hay estudios realizados donde las aleaciones AlSi8Cu2 y AlSi9Cu3 se han conformado por este método [Wab00], adaptando el porcentaje de fracción sólida mediante la adición de aluminio primario, con la correspondiente reducción de la proporción de los otros elementos [Wabu00]. Estas aleaciones, una vez tratadas térmicamente, han dado buenos resultados mecánicos, comparables con la A356.

Un esquema gráfico comparativo de los procesos de NRC y Thixocasting se muestra en la Fig. 1.26.

En la Fig. 1.27 se refleja la diferencia, tanto en el proceso, como en la microestructura final obtenida. Puede observarse que una diferencia evidente está en que los esferoides de eutéctico ocluido aparecen sólo en el Thixocasting.

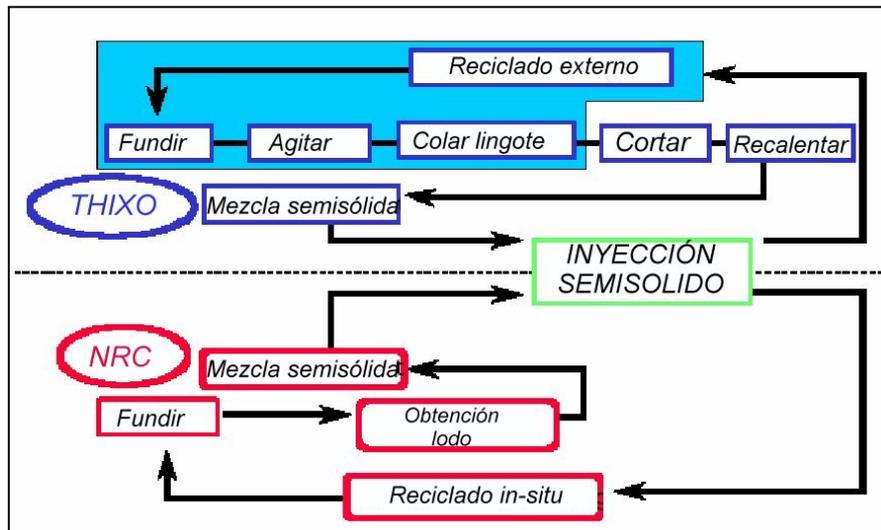


Figura 1.26. Comparación del método NRC y el Thixocasting [Kau00].

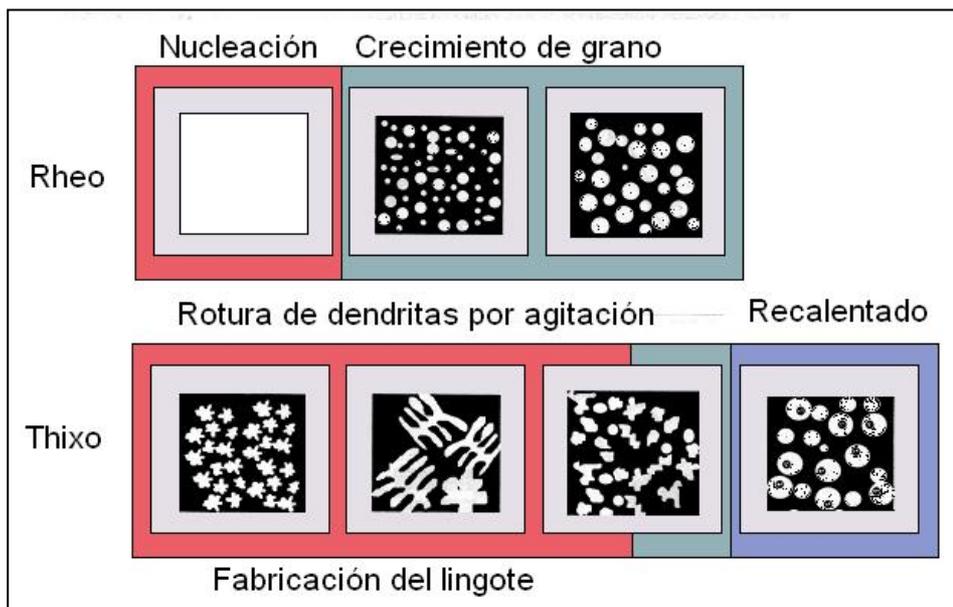


Figura 1.27. Diferencia entre NRC y Thixocasting [Bor99].

Este proceso tiene las siguientes ventajas respecto del Thixocasting [Bas00]:

- Evita el alto coste de los lingotes especiales, ya que, en este proceso, el caldo metálico semisólido, con una estructura α globular, se puede producir directamente a partir del metal líquido.
- Permite el reciclado de chatarra (virutas y deshechos de colada).

- Incrementa la flexibilidad en el tamaño de pieza, ya que no hay restricciones relativas a la relación longitud/diámetro del lingote.
- La modificación de las aleaciones puede realizarse “in situ”.
- Se puede preparar la fracción de fase sólida deseada para posteriormente llevar a cabo la conformación. En los lingotes se trabaja en un intervalo de fracción de fase sólida muy estrecho.

Para ayudar a eliminar la porosidad, puede utilizarse un sistema de vacío propio: *gas free system*. De esta forma, se consigue hasta 5-10 cc aire/100 g aluminio, mientras que en la inyección convencional se tiene entre 20-50 cc aire/100 g aluminio. La válvula de aire conectada al molde evacua el aire de dentro del molde y del contenedor de inyección, hasta que se cierra por el metal en el tramo final del llenado.

Los beneficios del sistema de vacío son los siguientes:

- Alta densidad estructural de la pieza.
- Piezas con alta resistencia a presión.
- Piezas soldables y tratables.
- Se pueden tratar térmicamente sin perjudicar la superficie.
- La fuerza de cerrado del molde es baja.
- La velocidad de inyección es más baja y la fuerza de inyección es más pequeña, y ello proporciona una vida más larga al molde y a la máquina.
- Hay menos rechazo.
- Permite hacer piezas que no pueden hacerse de otra forma.

Algunos autores han comparado los resultados de los ensayos de tracción de aleaciones de aluminio AlMgSi1, obtenidas por esta técnica [Wab00], con los valores obtenidos para componentes de forja, donde se requiere como mínimo un límite elástico de 260 MPa y una resistencia a la tracción de 315 MPa. Estos valores se ven ampliamente superados por el New Rheocasting con T6 (350 y 380 MPa, respectivamente). De todas formas, un alargamiento mínimo del 8% que se obtiene por forja, no se ha conseguido con la técnica de New Rheocasting para esta aleación.

1.3.5 Sub Liquidus Casting

En el año 2001, la empresa THT Presses desarrolló en Estados Unidos la técnica del Sub Liquidus Casting (SLC[®]-THT). Esta técnica combina el diseño del equipo y la utilización de aditivos afinadores de grano, con un procesado simple del metal fundido mediante un cuidadoso control de temperatura. Se obtienen productos con características equivalentes a las de los productos conformados en estado semisólido SSM, a partir de lingotes de Rheocasting, y los costes son ligeramente superiores al moldeo convencional de alta presión [Jor02] [Jor03]. Este proceso utiliza una máquina compacta que se muestra en la Fig. 1.28 [Jor04].

Una máquina de 100 Tm, puede inyectar hasta unos 12 Kg de aluminio. Son máquinas de inyección vertical, y la partición del molde es horizontal. El material entra directamente del horno de mantenimiento o fusión a la máquina de inyección. El material líquido se introduce en la máquina de inyección a baja temperatura, próxima a la temperatura requerida para la conformación en estado semisólido y, en poco tiempo, mediante el control de la temperatura y la adición de afinantes de grano (TiB o SiB), se forma el lodo. Éste se introduce en la máquina por uno o varios canales de inyección [For03].

Las condiciones óptimas de temperatura de inyección están entre 1 y 2 °C por encima de la temperatura liquidus, aunque en la práctica se realiza a unos 5-10° C por encima de la temperatura de solidificación. Los mejores afinantes son titanio-boro (5/1) y SiB₂ [Jor03].

En la Fig. 1.29 puede verse con detalle el perfil de temperaturas del proceso.



a)

b)

Figura 1.28. a) Máquina THT 100T y b) cámara de inyección y pistón [Jor02].

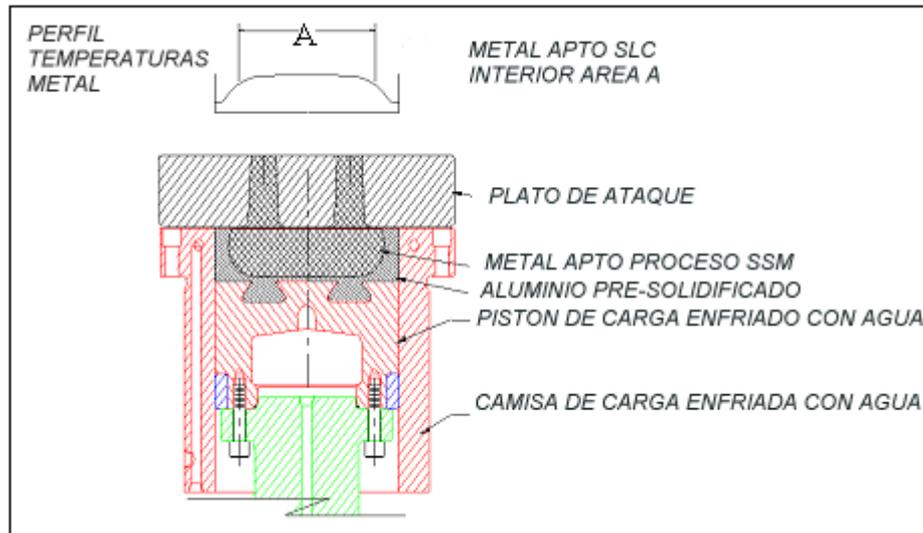


Figura 1.29. Esquema del proceso Sub Liquidus Casting [Jor02].

La máquina THT emplea un canal de inyección de gran diámetro y corto recorrido [www2]. Esto permite mayor productividad, y un control más estricto de la temperatura del metal, necesario para el procesado del lodo. Así mismo, reduce la velocidad de llenado, y de este modo se reducen drásticamente las presiones al final de cada inyección.

El concepto de THT-SLC no requiere un equipo de preparación previa del lingote ni un tiempo de procesado fuera de la máquina de moldeo.

Las microestructuras obtenidas con esta técnica son las propias de los procesos de SSM. Cuando en el proceso se utilizan afinadores de grano, se consiguen tamaños de glóbulo inferiores a 75 micras; cuando se realiza con super-afinadores de grano, se consiguen tamaños de hasta 25 micras. Las propiedades mecánicas, conseguidas en estos casos, son comparables e incluso superiores a las obtenidas cuando se utilizan lingotes MHD [Jors03].

1.3.6 Semi-Solid Rheocasting

Fleming propuso una variante del método SIMA para obtener estructuras no dendríticas [Fle01]. En la Fig. 1.30 se muestra un esquema del proceso.

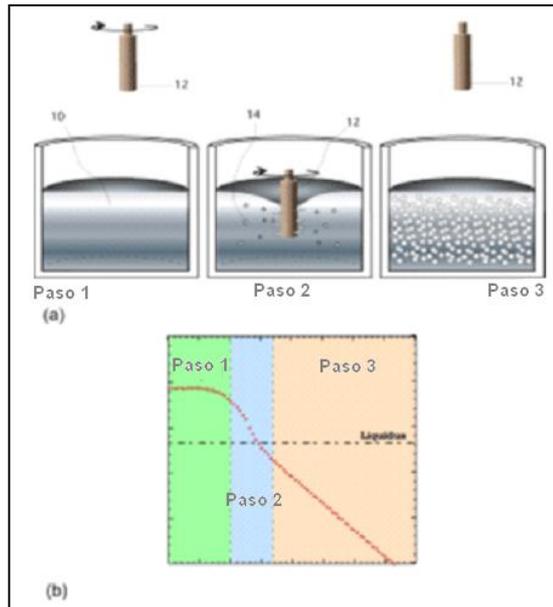


Figura 1. 30. Esquema de proceso SSR [www3].

Consiste en sumergir un cilindro de grafito dentro del caldo líquido, cuya temperatura supera ligeramente la temperatura liquidus. El caldo, al contacto con el cilindro, que se agita vigorosamente, se enfría unos pocos grados por debajo de la temperatura liquidus, iniciándose la solidificación. El rodillo se mantiene en el caldo durante intervalos de tiempo muy cortos, y la velocidad de agitación no debe superar las 60 rpm.

La parte más crítica del proceso está en la obtención del primer 1% en volumen de fracción sólida no dendrítica. La licencia para este procedimiento [Yur03] [Yur04], ha sido adquirida en 2002 por Idra Casting Machines, que ha desarrollado el equipo necesario para aplicarla, con el nombre SSR™, Semi-Solid Rheocasting [Pat02]. En la Fig. 1.32 se muestra una fotografía de una estación SSR™ [Yurk04].



Figura 1.31. Máquina de inyección de 1400 Tm con una estación SSR™ integrada [Yurk04].

1.3.7 Nuevos métodos en desarrollo

Otros métodos actuales son, el proceso basado en la “rampa con pendiente de enfriamiento” (CS, Cooling Slope) [Pat96], y el proceso basado en el ligero sobrecalentamiento de la fundición (LSC, Low Superheat Casting) [Haga02]. En la Fig. 1.32 se describen los dos procesos.

En el primer método, CS [Mot98], el metal pasa al estado semisólido cuando fluye hacia el molde por una pendiente refrigerada con agua. Es un equipamiento fácilmente adaptable a cualquier máquina convencional. El tamaño del lingote lo determina el peso del metal colado y el diámetro del molde [Haga02]. La fracción sólida se ve afectada por el tiempo de contacto entre el metal fundido y la rampa de enfriamiento, cuanto más tiempo mayor fracción sólida. Este tiempo de contacto aumenta con el aumento de la longitud de la rampa y la disminución de la pendiente. En los procesos convencionales de conformación en estado semisólido, la fracción sólida es del 50% y, en el presente caso, es un poco menor. El tamaño de los cristales primarios es más pequeño si se reduce la fracción sólida [Jir04].

El segundo método, LSC, utiliza un sobrecalentamiento del metal fundido de 5 a 40 °C. Los gérmenes se generan en la superficie inferior del molde de cobre, y la parte superior del molde debe insertarse en la inferior antes de que solidifique el metal. Como el sobrecalentamiento es bajo, los gérmenes cristalinos no se redisuelven, y si hay suficientes podrán crecer cristales primarios esféricos. Es un método tan sencillo como el anterior, sólo necesita un equipamiento especial del molde.

En los dos casos, la microestructura es similar a las obtenidas en los demás procesos, con cristales esferoidales, como en el convencional Thixocasting, pero más pequeños, resultado directo de la menor fracción sólida. Las propiedades mecánicas obtenidas con un tratamiento T6 son de 310 MPa de resistencia a la tracción y 18% de alargamiento en el CS, y 290 MPa de resistencia a la tracción y 12 % de alargamiento para el proceso LSC. Ambos procesos ahorran coste, energía y tiempo comparando con la ruta Thixoforming convencional [Haga02].

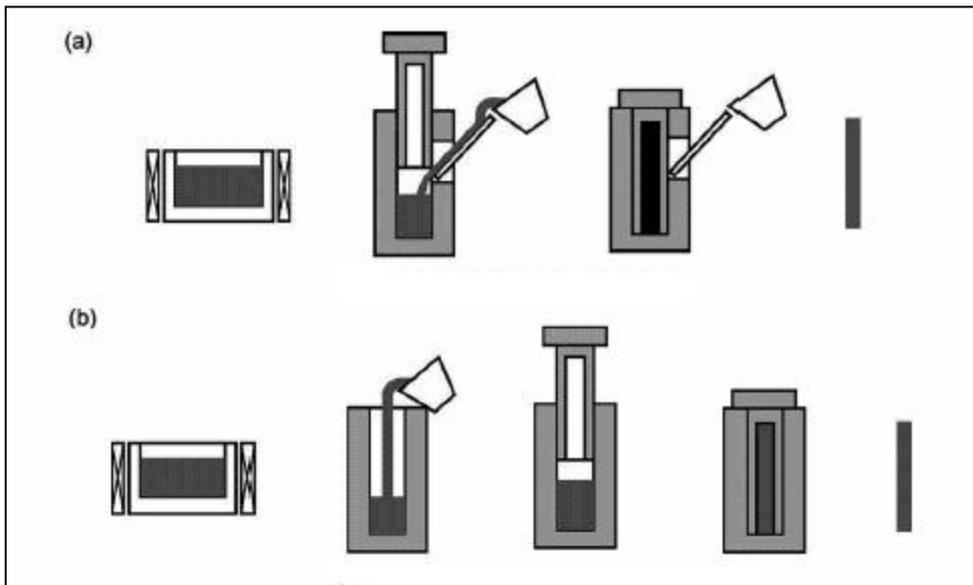


Figura 1.32. Dos tipos de procesos de Rheocasting: a)Proceso CS (Cooling Slope), b)Proceso LSC (Low Superheat casting) [Hag02].

En 2002, Alcan patentó un nuevo proceso denominado Swirled Enthalpy Equilibration Device (SEED) [Pate02] [Dou03]. Este método consiste en generar el lodo, a partir del líquido fundido, mediante la extracción de una cantidad controlada de calor (entalpía), drenando el exceso de líquido para obtener una masa compacta semisólida que pueda manejarse y conformarse bajo presión. Un esquema del proceso se presenta en la Fig. 1.33.

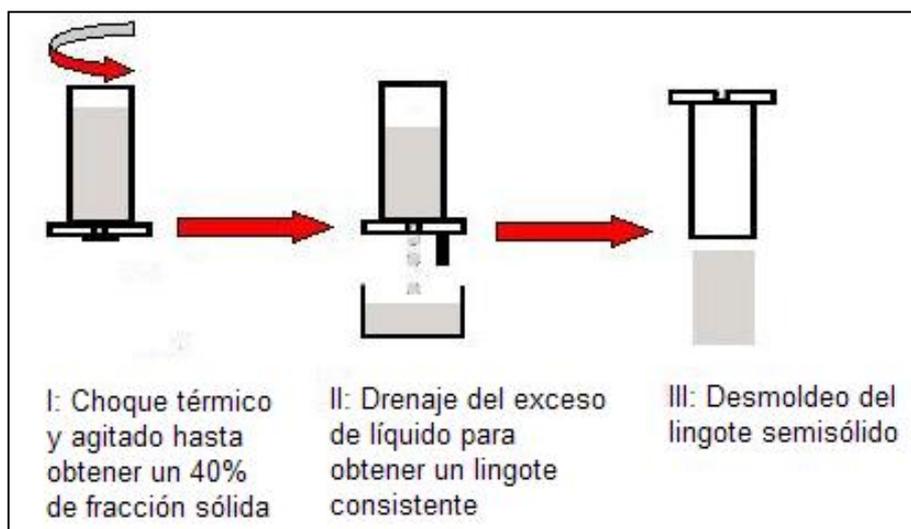


Figura 1.33. Esquema ilustrativo del proceso SEED [Dou03].

Con este método se hace menos crítico el control de la temperatura del material durante el proceso, y se dispone de un amplio rango de aleaciones que pueden ser procesadas con facilidad. Sin embargo, el drenaje del exceso de líquido puede dificultar la obtención de una aleación de composición definida.

En la Fig. 1.34 se muestra cómo varían la temperatura y la fracción sólida durante el proceso SEED. En la Fig. 1.35 se muestra la planta piloto de este proceso [Dou04].

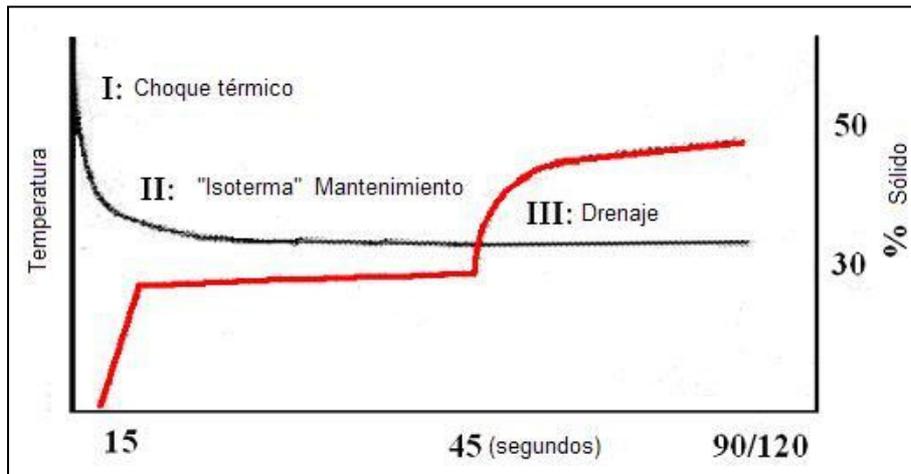


Figura 1.34. Evolución de la temperatura y de la fracción sólida durante el proceso SEED [Dou03].



Figura 1.35. Planta piloto y prototipo pre-industrial SEED [Dou04].

Otro método ha sido desarrollado en la Universidad de Worcester; es el Continuous Rheoconversion Process (CRP) [Ape04]. Consiste en mezclar dos aleaciones líquidas diferentes, con un determinado nivel de sobrecalentamiento, que al mezclarse dan lugar a una solidificación parcial, que conlleva a la formación de estructuras tixotrópicas. Con ello se obtiene una abundante nucleación en un proceso de

convección forzada. Exige un control del sobrecalentamiento, de la composición de los dos líquidos, y de la velocidad de extracción de calor del reactor. La convección forzada facilita la distribución homogénea de los núcleos de fase α en el seno del líquido, produciendo una nucleación homogénea.

En la Fig. 1.36 se muestra un esquema del proceso y en la Fig. 1.37 se ve un detalle de la máquina CRP [Pan04].

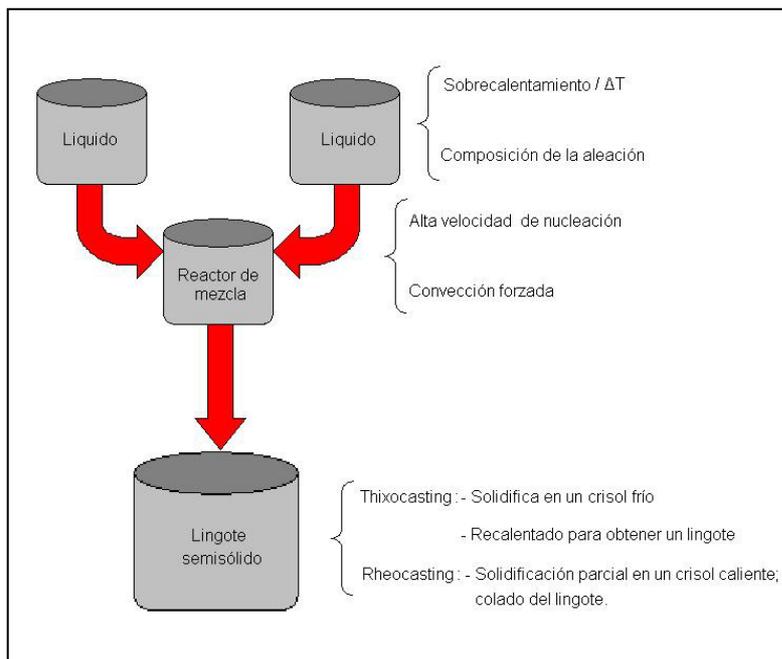


Figura 1. 36. Esquema del proceso CRP [Pan04].



Figura 1.37. Fotografía del mezclador CRP [Pan04].

1.4 COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN SSM

En la Fig. 1.38 se esquematiza el ciclo térmico que tiene lugar en los diferentes procesos SSM y en los procesos convencionales. La temperatura de inyección es prácticamente constante en los procesos SSM, y el enfriamiento de las piezas es muy rápido, mientras que en los procesos de Squeeze Casting, inyección a baja presión y moldeo en arena, el enfriamiento es continuo durante la etapa de inyección.

En las plantas de Thixocasting, no es necesario fundir el material; en todos los demás casos, se utilizan hornos de fusión y mantenimiento.



Figura 1.38. Comparación de los procesos de fundición [Vin03].

En la Fig. 1.39 se presenta un esquema que permite comparar las distintas etapas de los procesos de Thixocasting y los procesos de Rheocasting, diferenciando entre los que producen el lingote dentro de la máquina de inyección, como SLC y CS, y los que lo fabrican fuera, que son todos los demás.

En el proceso de Thixocasting es necesario comprar lingote de Rheocasting, y la chatarra se recicla fuera de la planta. En los otros casos el material se produce y recicla en la propia planta. Esto provoca un abaratamiento de costes en los procesos.

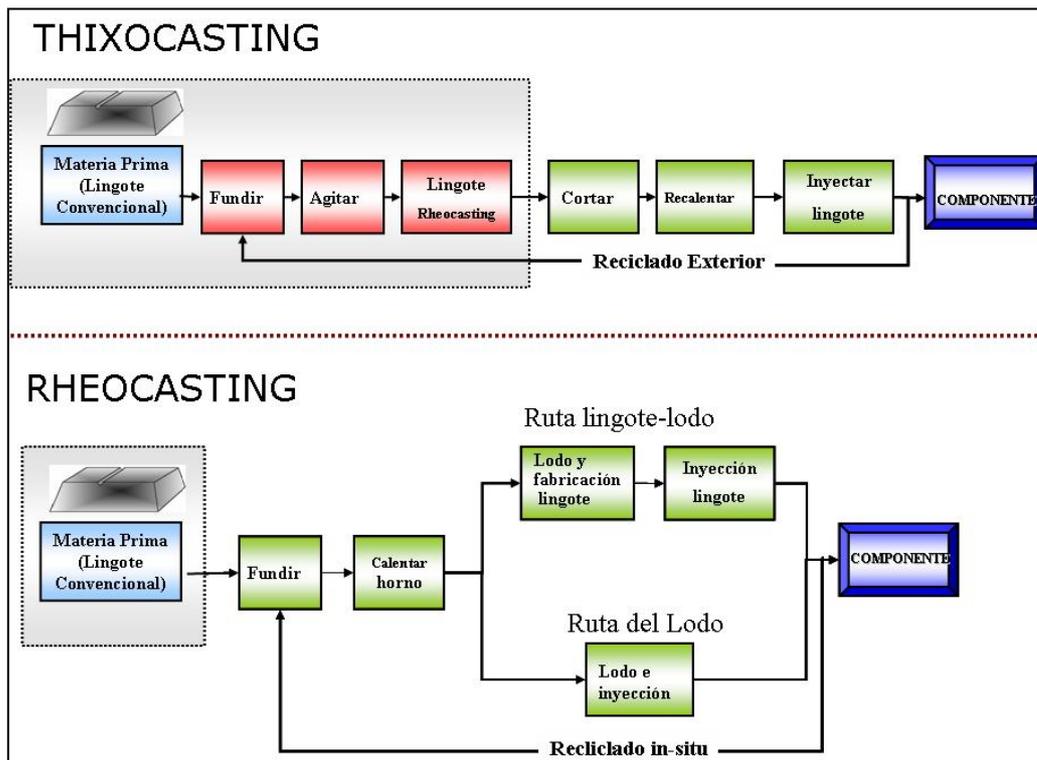
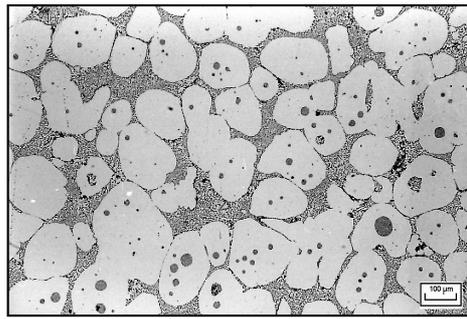


Figura 1.39. Comparación de las etapas en distintos procesos SSM [Forn04].

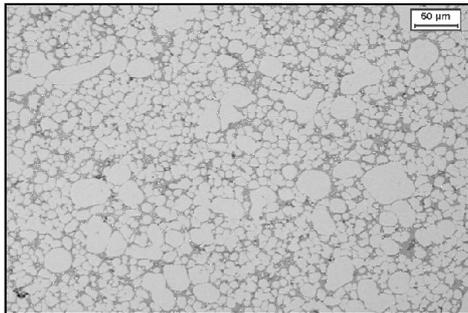
Las aleaciones más utilizadas para conformación de componentes de automóvil en estado semisólido son la A356 y la A357. Estas aleaciones tienen un relativo alto contenido de eutéctico, y ofrecen buenas propiedades mecánicas cuando son tratadas térmicamente [You96] [Chi96] [Mos96].

En cuanto a la microestructura de estas aleaciones (Fig. 1.40), las obtenidas por NRC y por SLC son similares a la del lingote de Rheocasting, mientras que la de Thixocasting contiene, dentro de las dendritas de fase α , el microconstituyente eutéctico atrapado, que ya se ha mencionado en el Apartado 1.3.1.

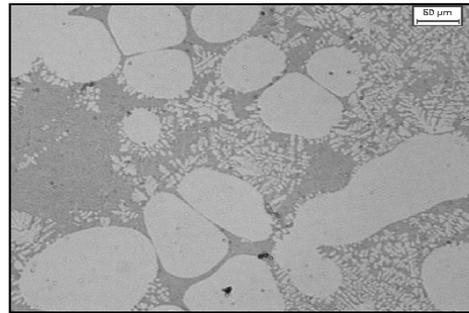
Las microestructuras de todos los métodos de Rheocasting tienen un aspecto similar a los mostrados para NRC y SLC.



a)



b)



c)

Figura 1.40. Micrografías de la aleación A357 conformada por:
a) Thixocasting, b) Sub Liquidus Casting y c) New Rheocasting [For03].

Finalmente, se ha realizado un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de estas aleaciones A356 y A357 conformadas por distintos métodos. En la Tabla 1.10 se indican los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo y los publicados por otros autores.

El coste del proceso es también un factor importante a estudiar en estos procesos. En la Tabla 1.11 [Jor00][Jor02], se muestra el coste de dos procesos de conformación en estado semisólido: Thixocasting (SSM) y Sub Liquidus Casting (SLC) y se compara con procesos convencionales. Puede apreciarse el abaratamiento de costes que representa el proceso SLC-THT.

Tabla 1.10. Propiedades mecánicas de la aleación A356 y A357 conformadas en estado semisólido.

Proceso	Aleación	Rp _{0,2} /MPa	Rm/Mpa	A/%
Thixocasting (CDAL)	A357 T5	210	298	10
Thixocasting [Jor02]		210	290	10
New Rheocasting (CDAL)		220	285	8
Molde permanente *		210	290	6
Thixocasting (CDAL)	A357 T6	320	368	7
Thixocasting [Jor02]		250	315	10
New Rheocasting (CDAL)		310	360	7
New Rheocasting [Bas00]		281	335	4
Squeezecasting [Jor02]		250	330	8
Molde permanente [Met87]		248	317	3
Molde permanente [Bas00]		296	359	5
Lingote de Rheocasting (CDAL)	A357	114	245	16
New Rheocasting [Bas00]		101-121	242-251	6.5-8.6
Thixocasting (CDAL)		121	254	15
Thixocasting [Bas00]		115-120	220	7-9
SLC®-THT[Jors03]	A356	120	235	12
Thixocasting [Kaz00]		110	220	14

Tabla 1.10 (continuación)

Proceso	Aleación	Rp _{0,2} /MPa	Rm/Mpa	A/%
Thixocasting (CDAL)	A356 T6	227	302	17
Thixocasting [Nad99]		225	300	12
Thixocasting [Jor02]		240	315	12
Squeezecasting [Nad99]		225	300	12
New Rheocasting (CDAL)		300	294	12
Squeezecasting [Jor02]		200	275	12
Molde permanente [Met87]		185	262	5
Molde permanente [Nad99]		205	280	10
SLC®-THT(CDAL)		288	339	6
SLC®-THT[Jors03]		260	340	12

- Norma EN 1706 (1998)

Tabla 1.11. Estudio de costes de varios procesos [Jor02].

Coste comparativo de procesos de fundición					
Coste de varios elementos* y Coste relativo final					
	Thixocasting	Inyección	Squeeze	Molde permanente	THT-SLC
Material	2,5	1	1,25	1,25	1,25
Herramientas	1	2	3	1,5	1
Capital	1,7	1,5	1,7	1,5	1
Proceso	1,2	1,1	1,3	1	1,1
Tratamientos Térmicos	1	NO	3	3	1
Mecanizado	1	1	1,2	2	1
Acabado	1	1,5	1	2	1
COSTE FINAL	2,1	1,2	2,4	2,2	1
1* el de más bajo coste alternativo; valores relativos en comparación con él					

Atendiendo a las diferencias en la tecnología de producción [Hal00], los factores más importantes son el sistema de calentamiento en el Thixocasting, y el de enfriamiento en el NRC. De forma esquematizada se puede indicar:

- SQC: horno de fusión y máquina de inyección
- TC: sistema de recalentamiento y máquina de inyección
- NRC: horno de fusión, sistema de enfriamiento y máquina de inyección.

El coste por unidad producida es un 20% más bajo en el SQC y NRC, que en el Thixocasting. Esto resulta del precio más elevado de la materia prima (un 40%) y del coste del reciclado (un 300%). Por otra parte, los procesos SLC permiten una notable reducción de los tiempos de intercambio de moldes

Estas diferencias dan lugar a una relación calidad-precio que se muestra en la Fig. 1.41, obtenida del trabajo de Hall y Kaufman [Hal00] y completada con los datos de la Tabla 1.10.

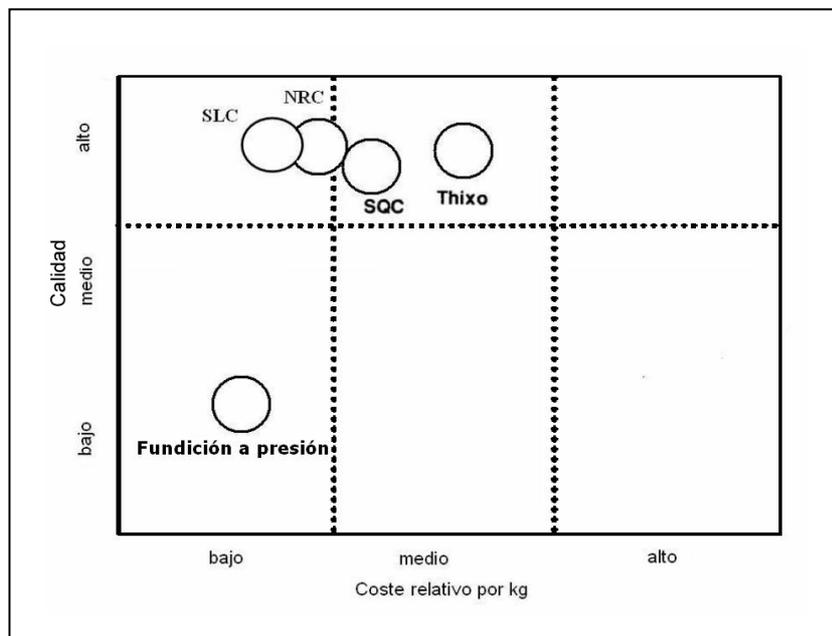


Figura 1.41. Relación calidad-precio en los procesos Thixo, SQC, NRC y fundición inyectada [Hal00].

1.5. VENTAJAS DE LOS PROCESOS SSM FRENTE A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES.

Aunque ya se han ido mencionando algunas de las ventajas de los procesos SSM [Fle94][Chi96][Fle00][Atk05], éstas se pueden agrupar en tres apartados: reducen la contaminación, elevan la calidad del producto y aumentan la rentabilidad.

La *reducción de la contaminación* se produce tanto en el entorno del trabajador como en el medio ambiente, por las siguientes causas:

- Los procesos automatizados, al igual que en la fundición inyectada, dan más seguridad al operario, que no se encuentra en contacto directo con el material semisólido.
- Reducen el material reciclable. Se eliminan parte de los alimentadores y mazarotas utilizados en la fundición.
- En algunos procesos se reduce la cantidad de lubricante empleado para cada componente.

Elevan la calidad del producto por:

- Obtención de piezas prácticamente acabadas ("*near-net-shape*") con formas relativamente complejas, y que ahorran operaciones posteriores de acabado.
- Propiedades mecánicas equivalentes o superiores a las obtenidas por fundición, pudiéndose fabricar piezas con espesores inferiores a los de forja, con el ahorro de material equivalente.
- Baja porosidad teórica.
- Excelente repetibilidad.
- Buen aspecto superficial.

El proceso es *rentable* frente a otras opciones por:

- Mayor flexibilidad en la producción.

- Tiempos de solidificación más cortos, lo que puede significar un aumento de productividad, respecto a la fundición por inyección.
- Reducción de las operaciones de acabado.
- Posibilidad de realizar tratamientos de envejecimiento, al contrario de lo que pasa con la fundición inyectada, sin porosidad, sin pérdida de ductilidad, ni tensiones residuales.
- Reducción del coste energético, especialmente en el Thixocasting.
- Válido para un variado tipo de aleaciones, por ejemplo, aleaciones aluminio-silicio hipereutécticas [Sah04] , aleaciones de un elevado punto de fusión como acero, cobalto o titanio [Kir96], e incluso para la fabricación de materiales compuestos [Kap01].

Según Pluchon y otros [Plu98], las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas por SSM son excelentes, especialmente el alargamiento y son independientes del grosor de las paredes de las piezas. Suelen ser mejores que cuando se obtienen por moldeo, aunque normalmente son inferiores a los obtenidos mediante procesos de forja.

Algunas de las piezas conformadas actualmente por Thixoforming son [Chi00] [Fle91] [Atk05]:

- Ruedas de automóvil.
- Cilindros de freno.
- Válvulas de freno antibloqueo.
- Calibres de freno de disco.
- Cajas mecánicas de bombas de dirección.
- Pistones de motor.
- Depósitos de gasolina
- Bastidores de compresores.
- Cajas que contienen airbag.
- Componentes de aire acondicionado.
- Válvulas que proporcionan frenos de dirección.
- Conectores eléctricos.
- Bielas.
- Tambores de freno.
- Rótulas de dirección.

- Llantas.
- Soportes de motor.
- Carcasas de motor.
- Balancines.
- Ejes de suspensión.
- Poleas.
- Componentes del ABS.
- Componentes del chasis.

1.6. PREVISIÓN SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS SSM

Generalmente, los componentes de aleaciones de aluminio para fundición se han producido por procesos de fundición tradicionales, coquilla, gravedad, arena e inyección. Sin embargo, el avance en la tecnología de la fundición inyectada, las mejoras en materiales para moldes y las excelentes características de las piezas obtenidas, han hecho que este último proceso sea muy utilizados en la producción de fundiciones de aluminio [Wan95]. El aumento de demanda en el proceso de fundición inyectada también se atribuye a su excelente relación calidad/precio.

El conformado SSM permite la fabricación de piezas de formas complejas que tienen mejor calidad que las que se hacen por fundición inyectada, con posibilidad de ser tratadas térmicamente, y capaces de competir con las producidas por forja. Esta calidad se debe tanto a la disminución de la contracción durante la solidificación de la aleación semisólida como a la ausencia de gases ocluidos [Ken88].

Según Flemings parece claro que el futuro inmediato de estas tecnologías SSM se desarrollará de acuerdo con las siguientes previsiones [Fle00]:

- Producción de componentes conformados con aluminio, magnesio y materiales compuestos con matriz de estos mismos elementos.

- El interés comercial estará básicamente centrado en componentes de las industrias automovilística y electrónica. En Europa y América la producción actual se está desarrollando básicamente en la industria automóvil, motocicletas y bicicletas, mientras que en Asia se producen componentes para la industria electrónica, especialmente con aleaciones de magnesio.
- La investigación de procesos continuará, con especial énfasis en aquellos donde se produzca directamente el lodo semisólido a partir del líquido (como SLC o New Rheocasting). Se necesitan vías más económicas de producción para producir el lodo original y transferirlo a la máquina de inyección [Fan02].
- Se diseñarán aleaciones específicas para los procesos SSM que permitirán la conformación de piezas utilizando mayores fracciones sólidas y mayores velocidades.
- Se seguirá investigando en el conocimiento del mecanismo que se denomina "Rheocasting" y se seguirán desarrollando modelos matemáticos que permitan simular la producción.

Los estudios y resultados obtenidos en la realización de este trabajo de investigación indican que los procesos SSM tendrán un considerable impacto industrial a corto plazo, especialmente en el diseño y producción de componentes para automoción, y acelerarán la sustitución de las fundiciones férricas por fundición de aluminio.