



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD
TÉCNICA DE UTILIZAR INSERTOS DE
ACERO CO-FUNDIDOS EN
COMPONENTES DE ALUMINIO**

Autor:

Ciria López, Diego

Tutor:

**Merino Senovilla, Juan Carlos
Departamento de Física de la Materia
Condensada Cristalografía y Mineralogía**

Valladolid, Septiembre 2015.

RESUMEN

En el trabajo se desarrolla el proceso de obtención de un componente híbrido con una matriz de aluminio que presenta un inserto de acero. Para ello se estudian diversas etapas del procedimiento, desde la concepción del producto que necesita la industria para cumplir sus necesidades hasta la validación del comportamiento de la pieza en su aplicación práctica pasando por todos los pasos intermedios de procesado, tratamiento térmico, acabado y protección. En cada etapa se estudiarán los posibles problemas a los que nos debemos enfrentar, las soluciones que conocemos de la industria actual y lo que se propone para mejorar el rendimiento, avalado con los respectivos cálculos, simulación o ensayos que sean necesarios. Finalmente se podrá tener una idea global de un procedimiento con aplicación industrial inmediata para fabricar componentes de aleación de aluminio reforzados localmente mediante insertos de un metal diferente.

Palabras clave: componente híbrido, co-fusión, colada con inserto, refuerzo de acero.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE.....	5
BLOQUE I: EXPOSICIÓN TEÓRICA	
1 INTRODUCCIÓN Y NECESIDAD DEL TRABAJO	11
2 ALEACIONES DE ALUMINIO MÁS COMUNES EN FUNDICIÓN	11
2.1 Aleaciones Aluminio-Silicio.....	14
2.2 Aleación de aluminio A356	19
2.3 Proceso de oxidación del aluminio líquido y sus consecuencias	21
3 NOVEDOSOS PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA. COSWORTH Y EPGS	23
3.1 Clasificación procesos de fundición.....	24
3.2 Moldeo en arena, <i>Sand Casting</i>	25
3.2.1 Procesos contra-gravedad con llenado controlado.	28
4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	35
4.1 Fases de un tratamiento térmico	36
4.2 Tratamiento térmico empleado y consecuencias.....	38
5 CORROSIÓN EN INSERTOS METÁLICOS.....	41
5.1 Corrosión general	41
5.2 Clasificación de los distintos procesos de corrosión	42
5.2.1 Clasificación según el mecanismo	42
5.3 Corrosión galvánica	45
5.3.1 Factores que influyen en la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica	47
5.3.2 Mecanismo de la corrosión entre aluminio y acero.....	50
6 COLOCACIÓN DE INSERTOS.....	51
6.1 Definición del inserto y situación en la industria actual	52
6.2 Colocación del inserto desarrollada en Cidaut. Similitudes con enfriadores .	56
6.3 Ventajas e inconvenientes del empleo de insertos co-fundidos	58
6.3.1 Ventajas que nos puede aportar la utilización de insertos	58
6.3.2 Inconvenientes que debemos que afrontar	58

BLOQUE II: INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

7	DEFINICIÓN APLICACIÓN PRÁCTICA	63
7.1	Simulación del proceso de Fundición. Análisis oclusión de gases	65
7.1.1	Atrapamiento de aire durante el llenado	67
7.1.2	Atrapamiento de aire consecuencia del uso de insertos	68
7.2	Comportamiento durante el tratamiento térmico	71
7.2.1	Cálculo de la profundidad de la ranura	72
7.3	Comportamiento frente a corrosión	73
7.3.1	Apriete en el acoplamiento mediante presión	73
7.3.2	Apriete mediante la co-fusión	75
7.3.3	Análisis de resultados y conclusiones	77
8	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	79
8.1	Pruebas experimentales para analizar la influencia de la geometría de la ranura en el inserto de acero. y calidad superficial del inserto de acero	81
8.2	Pruebas experimentales para analizar la influencia de la calidad superficial del inserto de acero	84
8.3	Análisis del gradiente térmico en la interfaz aluminio-acero. Investigación sobre la causa del defecto y variables a modificar	86
9	VALIDACIÓN FUNCIONALIDAD COMPONENTE	91
9.1	Montaje experimentación push-out	92
9.2	Resultados ensayos push-out	95
10	CONCLUSIONES	97
10.1	Definición geometría inserto	97
10.2	Desarrollo colada y proceso fundición	97
10.3	Comportamiento del conjunto durante el TT	97
10.4	Resistencia a la corrosión	98
10.5	Funcionalidad mecánica	98
11	LÍNEAS FUTURAS	99
11.1	Capa de cinc sobre el inserto de acero	100
11.2	Proceso Al-Fin	101
12	ESTUDIO ECONÓMICO	103
12.1	Costes directos	104
12.2	Costes indirectos	104

12.3	Cálculo de los costes totales	105
12.3.1	Cálculo costes directos	105
12.3.2	CÁLCULO DE LOS COSTES INDIRECTOS	111
12.4	Costes totales	112
13	BIBLIOGRAFÍA	113

BLOQUE I

EXPOSICIÓN TEÓRICA

1 INTRODUCCIÓN Y NECESIDAD DEL TRABAJO

En la industria de automoción principalmente prima la ligereza de los vehículos que conduce a una reducción del consumo de combustibles y por consiguiente disminuir las emisiones de CO₂. Y además se debe tener en cuenta que en el caso del vehículo eléctrico su gran limitación es la autonomía de las baterías. Por lo que una reducción de peso mejoraría también este aspecto. Para lograrlo se están sustituyendo piezas que tradicionalmente estaban fabricadas en acero con una densidad de 7.500 Kg/m³ a 20 °C por aleaciones ligeras, en su mayoría aluminio que tiene una densidad: 2.700 Kg/m³ a 20 °C.

Las piezas de aluminio de mayores solicitaciones se fabrican con procesos de forja, y fundición en baja presión sobre todo, aunque en los últimos años se han desarrollado procesos tecnológicamente avanzados que minimizan las desventajas de los procesos tradicionales tratando de obtener las máximas prestaciones posibles.

Entre estos avances se encuentran los procesos de fundición en molde de arena con llenado contra gravitatorio.

Este tipo de llenado evita que los defectos asociados a un llenado turbulento (atrapamiento de gases y óxidos) se produzcan, por lo que las piezas pueden ser tratadas térmicamente y así las prestaciones finales quedan optimizadas. Al ser procesos de moldeo en arena la versatilidad y complejidad geométrica son ventajas también a tener en cuenta. Además existe la posibilidad de fabricar piezas huecas.

Muchas de estas piezas van colocadas en conjuntos que utilizan rodamientos, ejes y elementos similares que para su ensamble, y la transmisión de cargas en esos puntos puede llegar a ser tan elevada que el aluminio deba ser reforzado con insertos de acero.

Estos insertos de forma general se colocan en una operación de inserción posterior a la etapa de fundido y mecanizado del alojamiento donde irán ubicados. Lo que se pretende en este estudio es analizar y encontrar una metodología que permita colocarlos en el molde de arena y que el aluminio fluya alrededor de ellos durante el llenado, para que pasen a formar parte de la pieza en el proceso de fundido y no en una etapa posterior.

Las condiciones de temperatura, calidad superficial y geometría, entre otras, más adecuadas serán determinadas con el desarrollo de este trabajo.

Además también se debe valorar el riesgo que supone para la corrosión galvánica el colocar en contacto íntimo dos metales disímiles con un potencial

eléctrico diferente. Esto podría suponer un riesgo para el aluminio que es más anódico. De esta manera habría que otorgar de una protección extra a la pieza si la corrosión pudiera afectar negativamente a su funcionamiento.

Para poder introducir en la industria este procedimiento se deben establecer aplicaciones reales de esta metodología donde su utilización sea un avance.

2 ALEACIONES DE ALUMINIO MÁS COMUNES EN FUNDICIÓN

El aluminio es aleado con diferentes elementos químicos para formar aleaciones de mayor resistencia mecánica, mejorar las propiedades de trabajo o facilitar las propiedades de colabilidad. Sin embargo deben tenerse en cuenta otras características, tales como la ductilidad, resistencia a la fatiga y corrosión, entre otras, las cuales son influidas abismalmente por los elementos incorporados.

La selección de una aleación concreta depende tanto del proceso productivo como de las especificaciones finales del producto. La combinación de ambas determinarán las propiedades finales buscadas en la aleación.

Las aleaciones de aluminio desarrolladas para procesos de fundición, se agrupan en seis familias básicas. Las más comunes son aquellas cuyo aleante principal además del Aluminio es el Cobre o el Silicio.

Tradicionalmente, la fundición de aleaciones de aluminio en molde de arena ha utilizado aleaciones **Aluminio-Silicio hipoeutécticas**. Las familias en las que se agrupan las aleaciones de aluminio son las siguientes:

- Aluminio-Cobre
- Aluminio-Silicio-Cobre
- Aluminio-Silicio
- Aluminio-Magnesio
- Aluminio-Zinc-Magnesio
- Aluminio-Estaño

2.1 Aleaciones Aluminio-Silicio

Las aleaciones más predominantes son las de la familia Aluminio-Silicio. Estas aleaciones binarias presentan una excelente fluidez, colabilidad (entendida como la facilidad para su uso en procesos de fundición) y resistencia a la corrosión. En contraposición se caracterizan por una baja resistencia mecánica y una pobre maquinabilidad. La ductilidad, que puede ser excepcional, es una función de las bajas concentraciones de impurezas y buenas características microestructurales.

Una característica importante en el caso de aleaciones de aluminio para moldeo es que deben contener suficiente cantidad de elementos formadores de eutécticos (generalmente Si) para dar la suficiente fluidez (a mayor contenido en Silicio se pueden llenar paredes de menor espesor para reproducir diseños más intrincados y con mayor número de detalles), y para alimentar los espacios dejados por la contracción que se produce en todas aleaciones de moldeo.

Por eso, son precisamente las aleaciones Aluminio-Silicio las recomendadas para procesos de moldeo en arena. El diagrama de fases binario Aluminio-Silicio se muestra en la Figura 2.1.

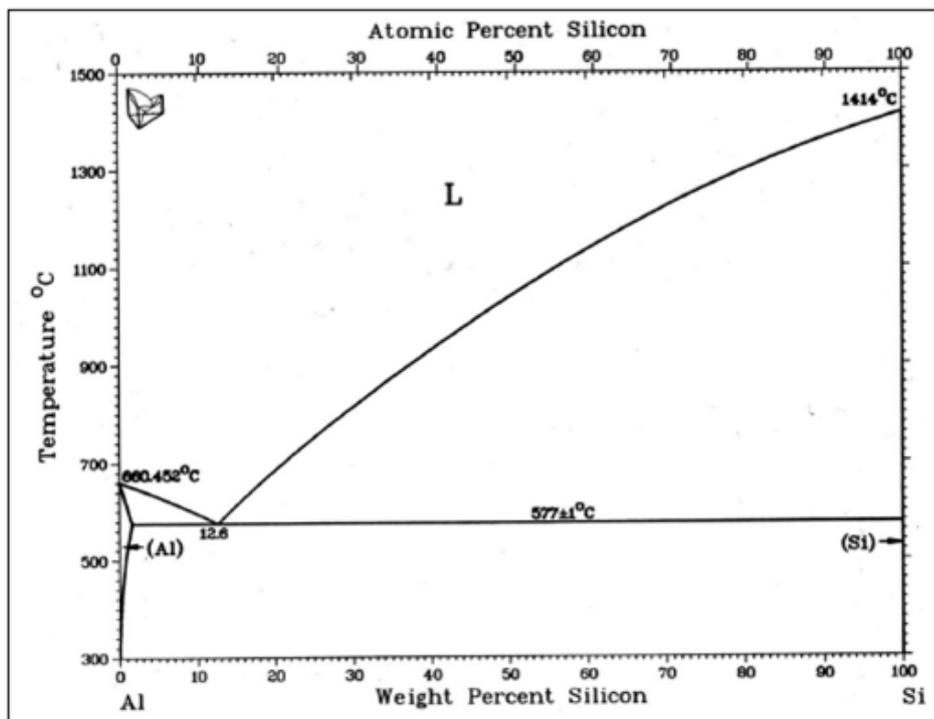


Figura 2.1 Diagrama de Fases Aluminio-Silicio

La aleación eutéctica (12.6% Si, ver Figura 2.1) es la más importante en este sistema gracias a sus buenas propiedades para la fundición. De todos modos cuando solidifica lentamente, como en el caso de fundición en arena, se forma una forma degenerada de eutéctico. En lugar de la forma eutéctica fina, bien definida y uniformemente distribuida, tenemos una estructura caracterizada por largos y aciculares cristales de silicio. Esta estructura tiene un comportamiento quebradizo y es posible distinguirla incluso a simple vista en las superficies de fractura.

En el caso de las aleaciones Al-Si hipoeutécticas (contenido Si < 12%), la modificación de la estructura eutéctica se puede conseguir con la adición de elementos específicos (modificadores que tradicionalmente son Sodio o Estroncio) o consiguiendo artificialmente velocidades de enfriamiento altas. Sin embargo, en las aleaciones hipereutécticas (contenido Si > 12%), el refinamiento de la fase de Silicio proeutéctico se realiza con la adición de fósforo.

El porcentaje de fase líquida durante el proceso de solidificación está marcado por la composición inicial (en qué punto del diagrama de fases se encuentra la aleación y por tanto qué ventana de semisólido le corresponde), y el grado de enfriamiento en no-equilibrio (determinado por la velocidad de enfriamiento) que depende del tipo de molde básicamente.

Cuando los procesos se caracterizan por tener una alta velocidad de solidificación, como en el caso de procesos con molde metálico y/o en las secciones muy delgadas donde la solidificación tiene lugar más rápidamente, el grado de enfriamiento se aparta del equilibrio. En este caso, la porosidad por contracción está fuertemente afectada por la temperatura a la que la alimentación conocida como másica deja de ocurrir. Para minimizar la porosidad por contracción se debe tratar de tener un volumen de fracción sólida lo más alto posible a esa temperatura, es decir, tener una composición lo más cercana posible al eutéctico.

La alimentación para minimizar la porosidad por contracción mejora cuando el volumen de fracción sólida es aumentado a la temperatura a la que la alimentación másica cesa. Por esta razón, el contenido en silicio más deseable en las aleaciones Al-Si se selecciona en base a la velocidad de solidificación característica del proceso. Para procesos con baja velocidad de enfriamiento como los de molde a la cera pérdida, yeso o arena, el rango preferido es entre 5-7%. Para molde permanente 7-9% y para molde metálico 8-12%. Las bases para estas recomendaciones están en la relación entre velocidad de enfriamiento y fluidez, y el efecto del porcentaje de eutéctico en la alimentación como progreso de la solidificación. Se comienza a tener mayor porcentaje de eutéctico cuando la concentración de silicio en la aleación es superior al 5%.

Podemos ver varias micrografías de la aleación Al-Si según su contenido en Silicio en la Figura 2.2.

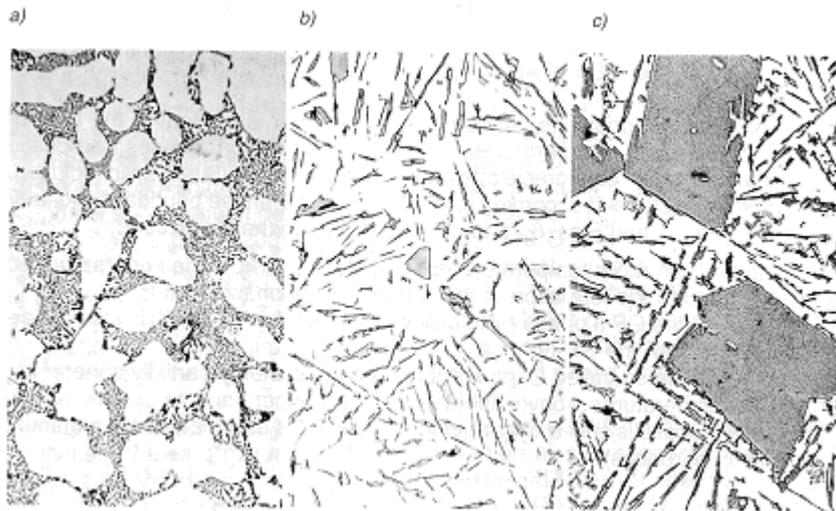


Figura 2.2 Estructuras del sistema Al-Si: a) hipoeutético, 9%Si, fase primaria y eutética (500x); b) eutético, 12%Si, fase eutética (200x); c) hipereutético, 18%Si, cristales de Si primario y eutético (100x).

Por tanto, el contenido en Si entre 4% y el 12%:

1. Reduce las pérdidas (huecos) de material.
2. Permite la realización de piezas con diseños más difíciles y con mayores variaciones en el espesor de secciones.
3. Ofrece mayor calidad interna y externa de las aleaciones fundidas.

Estos beneficios derivan de los efectos del Si en:

1. El incremento de la fluidez.
2. Reducción de agrietamiento.
3. El aumento de la capacidad para compensar el efecto de la contracción.

La resistencia al agrietamiento durante el moldeo se favorece con un pequeño rango de temperaturas de solidificación, que varía desde 78°C al 1%Si hasta 0°C al 12%Si.

Probablemente el 90% de las piezas manufacturadas son aleaciones Al-Si. Este tipo de aleaciones tiene una gran aceptación por sus propiedades físicas y en general por su excelente facilidad para la fundición. Las propiedades

mecánicas, la resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia a grietas calientes o “hot tearing”, fluidez, y soldabilidad son consideradas de las mejores.

La composición de las aleaciones más usadas se detalla en la siguiente tabla (Tabla 2.1).

Aleación	Composición nominal (%)					
	Proceso Fundición	Cu	Mg	Mn	Si	Otros
355.0	Arena, Permanente	1.2	0.5	0.5 max	5.0	0.15 Ti
A356.0	Arena, Permanente	...	0.35	0.35 max	7.0	...
A357.0	Arena, Permanente	...	0.60	0.03 max	7.0	0.15 Ti, 0.04 Be
360.0	Coquilla	...	0.5	0.35 max	9.5	...
380.0	Coquilla	3.5	...	0.5 max	8.5	...
390.0	Coquilla	4.5	0.6	0.1 max	17.0	...
413.0	Coquilla	0.35 max	12.0	...
B443.0	Arena, Permanente	0.5 max	5.2	...

Tabla 2.1. Composición de las aleaciones más comunes de Aluminio-Silicio.

Como vemos los elementos más comunes además del Si son:

- **Mg:** se añade para proporcionar una mayor resistencia gracias a la precipitación de la fase Mg_2Si en la matriz, además de hacer a la aleación térmicamente tratable.
- **Cu:** se consigue una mayor resistencia al desgaste además de ayudar a tener una mayor resistencia cuando se somete la matriz a un tratamiento de envejecimiento o de endurecimiento por precipitación, ya que se favorece la precipitación de la fase $AlCu_2$. Aunque se aumenta la resistencia, se sacrifica algo la ductilidad y la resistencia a la corrosión.

- **Mn:** la presencia de manganeso puede reducir la solubilidad del hierro y silicio en la aleación. Su adición mejora las propiedades de las aleaciones Al-Si a elevadas temperaturas.
- **Fe:** es otro de los aleantes más comunes. Puede ser tolerado desde niveles de 1.5% hasta 2%. Su presencia modifica la fase de silicio ya que introduce varias fases Al-Fe-Si.

La aleación que se utiliza en el proceso objeto del proyecto es una de las más usadas, la aleación A356, debido a su alta conductividad.

2.2 Aleación de aluminio A356

Esta aleación pertenece al grupo de las fundiciones de aluminio y el número 3 indica que su aleante principal es el silicio. Los otros determinan la composición química exacta en % en peso, que es la mostrada en la Tabla 2.2:

Aleación	Aleantes				
	Si	Mg	Fe	Mn	Otros
A356.0	7	0,35	0,96	0,35 max	...

Tabla 2.2. Muestra la composición química de la aleación de aluminio A356.

Para conocer mejor la microestructura que presenta esta fase nos debemos fijar en el diagrama de fases de la Figura 2.1. Como podemos ver para un 7% de silicio, como en nuestro caso, nos encontramos a la izquierda del punto eutéctico que se produce para concentraciones del 12% por lo que nuestra aleación será hipoeutéctica, esto quiere decir que al solidificar se formarán fases eutécticas y fase de aluminio α en forma nodular.

La calidad de la fase eutéctica y su distribución homogénea disminuye al enfriar lentamente, como ocurre en el moldeo en arena. Para mejorar esto se emplean enfriadores de acero en las zonas que más tardan en perder el calor de la pieza, insertos que se añaden al molde en las zonas deseadas, por esto su estudio será de gran interés en este trabajo ya que su comportamiento tiene similitudes con los insertos que se está buscando colocar para reforzar ciertas zonas del producto.

El tipo de microestructura obtenida en el metal determina las propiedades mecánicas de la pieza resultante. Dependerá de la composición química de la aleación, de la velocidad de enfriamiento y del uso de refinadores de grano.

En fundición, más que al tamaño de grano se le da importancia al espaciado interdendrítico secundario (DAS, que se puede observar en la Figura 2.3). Las propiedades mecánicas dependen directamente de él. A medida que disminuya este valor, aumentarán la tensión última, ductilidad y elongación. Esto es debido a que si el DAS es pequeño aumentará el número de brazos secundarios, y por lo tanto más zonas de alta energía que favorecerán las buenas propiedades mecánicas.

En la solidificación de la aleación, primero aparecen las dendritas primarias y posteriormente, para aumentar la evacuación de calor latente, se forman brazos o dendritas secundarias formando un ángulo de aproximadamente 90° con las anteriores.

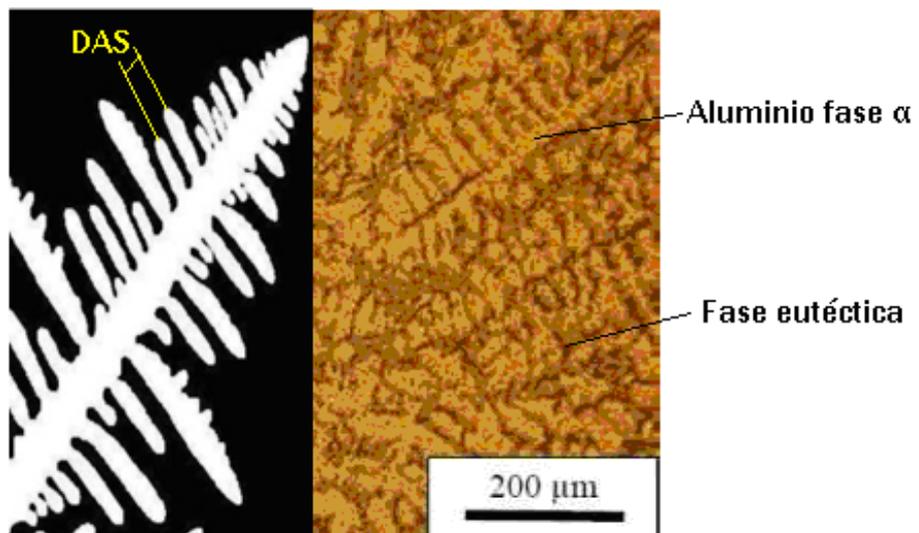


Figura 2.3 *Microestructura de una aleación de aluminio hipoeutéctica A356. Y detalle de la dendrita.*

2.3 Proceso de oxidación del aluminio líquido y sus consecuencias

El aluminio puro es químicamente muy activo, es un metal eminentemente oxidable. Sin embargo, es inalterable en el aire ya que se recubre en frío de una finísima capa de óxido que protege al metal de una oxidación más intensa. Se trata de una delgada película de alúmina Al_2O_3 muy adherente y compacta, cuyo volumen es 1.28 veces el del metal del que proviene. Normalmente, podemos decir que esta capa protectora de óxido hace relativamente inerte el metal, recuperando éste su gran actividad en el instante en que se le prive de la indicada protección.

Esta película sólida va creciendo a partir de la superficie del líquido, a medida que los átomos del metal se combinan con átomos o moléculas del gas que lo rodea. La reacción que tiene lugar en su formación es:



la energía que se libera en la formación de la alúmina es tan grande que hace complicado evitar que se produzca, requeriría presiones por debajo de $1.32 \cdot 10^{-48}$ atm. Lo que sí puede ser controlado es el espesor de la capa con la aplicación de una atmósfera de gases inertes, pero en cuanto el oxígeno entre en contacto con el aluminio tendrá lugar la oxidación que se está tratando de evitar.

El aluminio en contacto con el vapor de agua forma entonces la alúmina y deja libre moléculas de hidrógeno. El hidrógeno es el único gas soluble en aluminio líquido, sin embargo dicha solubilidad desciende cuando el aluminio solidifica. Liberando gases que pueden crear porosidad en la pieza final, algo indeseable por su perjudicial influencia en las características mecánicas.

Al tratar el aluminio líquido, esta capa de óxido puede provocar llenados insuficientes, o heterogeneidades en las piezas finales fabricadas, lo cual supone un preocupante detrimento de las propiedades mecánicas de los productos.

3 NOVEDOSOS PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA. COSWORTH Y EPGs

Muchas son las piezas o componentes que se fabrican por fundición como carburadores, bloques motor, componentes del sistema de frenado y suspensión para el automóvil, herramientas, componentes para turbinas hidráulicas, etc...

Existen actualmente dos tendencias en la industria que afectan a la técnica de la fundición:

- La continua mecanización y automatización de los procesos, que ha significado grandes cambios en el uso de los equipos, el avance de la maquinaria y de los sistemas de control que han reemplazado a los sistemas tradicionales, basados en operaciones manuales.
- El aumento en la demanda de altas calidades así como de tolerancias dimensionales más ajustadas y ausencia de defectos.

Los procesos de fundición incluyen además de la fundición del metal, el vertido del metal fundido en un molde con una cavidad con la forma deseada. Una vez fundida, la pieza se desmoldea y el exceso de metal se retira con operaciones de mecanizado.

Todos los procesos de fundición usan un molde, ya sea permanente o no, que es el negativo de la forma deseada. Los procesos se diferencian pues en el tipo de molde usado y en el número de pasos que se requieren para producir la forma final.

Sin embargo no se puede hablar de que exista un proceso perfecto en todos los aspectos. Las empresas son las que deben seleccionar el método más apropiado para la producción del tipo de piezas que fabrica y las restricciones operativas que tengan.

Común a todos los procesos es la tecnología utilizada para fundir el metal. El mayor coste de los procesos de fundición es el referente a la energía, la mayor parte de ella es usada en la fusión del metal y en su mantenimiento.

3.1 Clasificación procesos de fundición

La clasificación que se va a seguir para nombrar todos los procesos tiene en cuenta el tipo de molde de cada proceso. Por lo tanto podemos hablar de procesos con:

- **Moldes no permanentes:** realizados en arena, yeso, cerámicas o materiales similares. Son mezclados generalmente con cohesionantes o agentes de unión. Este tipo de materiales son refractarios, capaces de aguantar las altas temperaturas de los metales fundidos. Después de que la pieza ha solidificado, estos moldes son destruidos para obtener la pieza. Nos centraremos en el estudio del molde en arena, puesto que es el que se empleará en el desarrollo de este proyecto.
- **Moldes permanentes:** contruidos de metales que se mantienen resistentes a altas temperaturas. Como su nombre indica son usados de manera repetitiva y se diseñan de modo que la pieza puede ser fácilmente desmoldada para el siguiente uso del molde. Debido a que los moldes metálicos son mejores conductores que los no permanentes, la solidificación de la pieza está sometida a una mayor velocidad de enfriamiento, lo que afecta a la microestructura y al tamaño de grano de la pieza.
- **Moldes de composites:** están fabricados con dos o más materiales como por ejemplo arena, grafito y metales, combinando las ventajas de cada material. Son usados en varios procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, el control de la velocidad de enfriamiento y optimizar económicamente el proceso.

3.2 Moldeo en arena, *Sand Casting*

Es el método tradicional y ha sido usado durante milenios. Consiste en:

- Posicionamiento de un modelo con la forma deseada en la arena para generar una impronta.
- Incorporación de un sistema de alimentación.
- Llenado de la cavidad resultante.
- Enfriamiento del metal hasta que solidifique.
- Romper y apartar el molde de arena.
- Recuperar la pieza.

Aunque los orígenes de este proceso datan de mucho tiempo atrás, es todavía la forma que más prevalece dentro de los diferentes tipos de fundición en molde no permanente y de moldeo en general.

El proceso de conformado de piezas por moldeo en arena, en su concepción más simple (como se puede observar en la Figura 3.1), no es más que el llenado con metal fundido de un molde de arena compactada, cuya cavidad interna reproduce la geometría de la pieza a conseguir. Una vez que el metal ha solidificado, se obtiene la pieza destruyendo el molde de arena que la contiene.

Lejos de esta primera y bien conocida idea básica de “llenado + solidificación“, el proceso industrial comprende varias fases en las que las diversas materias primas utilizadas sufren una serie de transformaciones hasta la obtención de la pieza final. En el diagrama de flujo de la Figura 3.2 se sintetizan todas estas operaciones, que de forma genérica y con las lógicas variaciones de cada proceso en particular, definen los procesos de moldeo en arena.

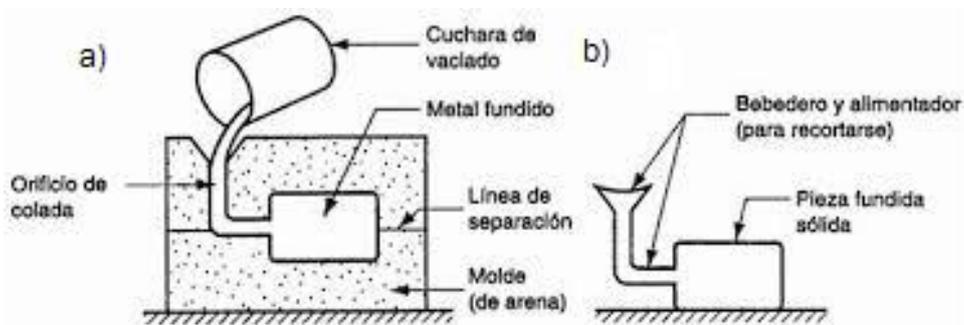


Figura 3.1 Imagen de un moldeo en arena simple. a) se puede ver el momento en el que se cuela el metal fundido dentro del molde. b) muestra la pieza obtenida tras el desmoldeo.

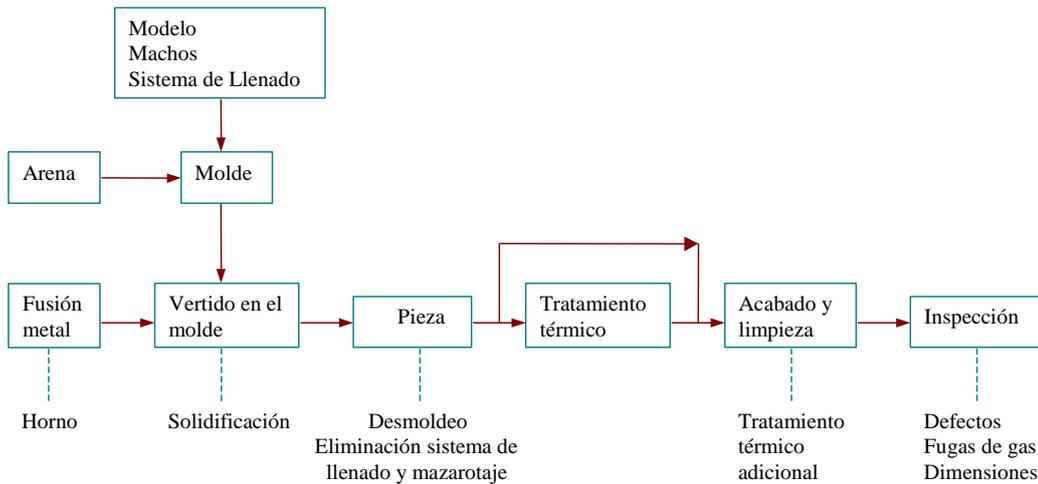


Figura 3.2 Esquema de los pasos del proceso de fundición en molde de arena.

El extremo superior de la figura comienza con la fabricación del modelo. El modelo será el elemento que dé forma al molde de arena.

La arena, una vez preparada, se deposita alrededor o dentro del modelo según el proceso y se compacta mediante la aplicación de presión, en el caso de las arenas inorgánicas o mediante reacción química, en arenas orgánicas. Los moldes son habitualmente fabricados en dos mitades para que se puedan liberar fácilmente del modelo. Una vez producido el desmoldeo la arena puede ser reciclada para una posterior utilización, esta operación inicial se puede observar mejor en la Figura 3.3.

Las cavidades internas de una pieza fundida se consiguen mediante machos. Los machos son partes fabricadas en una arena especial, generalmente aglutinada mediante agentes orgánicos, que tienen la suficiente rigidez y resistencia mecánica como para ser insertados en la cavidad definida por el molde. Para la fabricación de machos, la arena se deposita en una caja de machos en donde se compacta y adquiere rigidez mediante la transformación química de uno de sus componentes. Una vez insertado el macho en una de las dos partes del molde se procede al ensamblado del molde, que de esta manera está listo para el vertido del metal fundido.

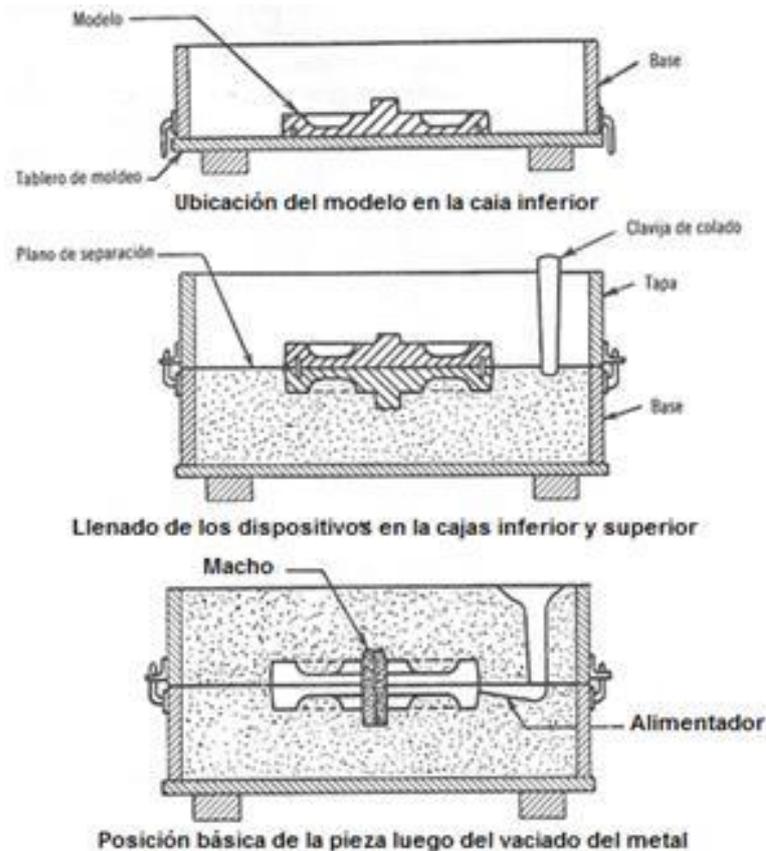


Figura 3.3 En estas imágenes se puede ver la obtención del molde de arena a través del modelo inicial.

La obtención del metal en estado líquido se produce en los hornos de fusión donde se alcanzan temperaturas entre 710 y 750°C. El caldo es entonces transportado desde el horno hasta al molde para proceder al llenado de la cavidad, donde solidifica en el espacio comprendido entre el molde y los machos.

Cuando el metal ha solidificado por completo, se procede al desmoldeo, y se eliminan las mazarotas y los canales de alimentación mediante mecanizado, los cuales pueden verse con claridad en la Figura 3.1 b). Las mazarotas (también llamados rebosaderos) son partes que se añaden a la geometría de la pieza a obtener con objeto de proveer una reserva de metal líquido y ejercer un control durante la solidificación. El metal de las mazarotas es necesario para compensar la contracción que se produce durante la solidificación. Los canales de alimentación se encargan de conducir el metal fundido desde la zona de vertido hasta la cavidad propiamente dicha.

Una vez suprimidos los canales de alimentación y las mazarotas, se procede a la limpieza de la pieza y a la aplicación, si fuera oportuno, de un tratamiento térmico.

Tras una inspección final, la pieza ya está lista para salir al mercado.

3.2.1 Procesos contra-gravedad con llenado controlado.

En ellos el flujo de metal fundido al interior del molde se produce, como su nombre indica, en contra de la gravedad (véase Figura 3.4)

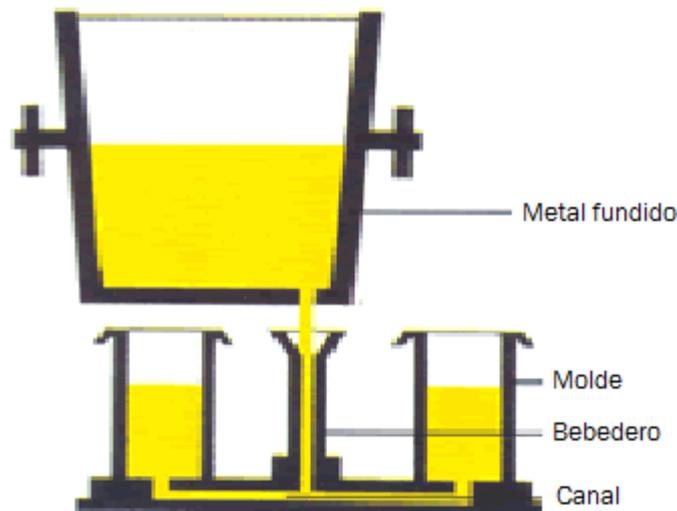


Figura 3.4 Colada contra-gravitatoria.

El sistema de llenado en contra-gravedad presenta la ventaja, en comparación con la colada directa, de ser un llenado más tranquilo, lo que provoca menos turbulencias y salpicaduras. Esto, mejora la calidad superficial de la pieza final así como la eliminación del atrapamiento de gases y reducida porosidad. Por otra parte, la desventaja que tiene es el gradiente térmico desfavorable, ya que queda caldo frío y molde frío en la parte superior y caliente en la inferior. La temperatura y fluidez del caldo deben ser suficientes para que no se produzcan bloqueos y el molde se llene en su totalidad. Para combatir este gradiente térmico que además incrementa la contracción, es necesario un mayor volumen de mazarotas.

También existen otro tipo de procesos de llenado contragravitatorio en los que se utiliza una bomba electromagnética o un horno dosificador. Entre ellos están el proceso Cosworth que utiliza ambos sistemas y el proceso EPGs.

- **Proceso Cosworth**

Es un proceso en molde de arena que fue desarrollado en 1978 para materiales no ferrosos, inicialmente aleaciones de aluminio, para fabricar el motor del mismo nombre.

El procesado del molde es similar al de la fundición en molde de arena convencional, aunque se usa arena de circonita en lugar de sílice, debido a su gran expansión predecible.

La principal característica de este proceso es que el metal es bombeado al molde a través de la base del mismo por la acción de la presión con un sistema simple de llenado. En principio se realizaba con un horno dosificador, el metal era calentado por unas resistencias y todo este conjunto estaba a su vez encerrado en una cámara a presión, cuando se aumentaba la presión de esta cámara se obligaba al metal a subir y llenar el molde. Está representado en la Figura 3.5

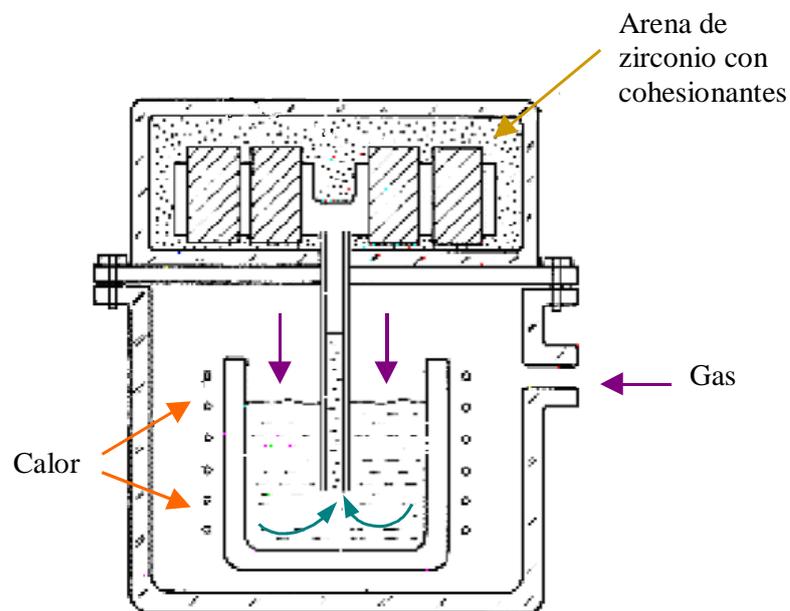


Figura 3.5 Horno dosificador para la fundición y el bombeo de aluminio en el proceso Cosworth.

La ausencia de los sistemas convencionales de llenado y alimentación consiguen unas piezas libres de porosidad, ya que no hay presencia de hidrógeno ni de inclusiones como los óxidos, por lo que se obtienen piezas con muy buenas propiedades mecánicas.

En la actualidad el proceso también utiliza una bomba electromagnética para realizar el bombeo del metal, ver Figura 3.6

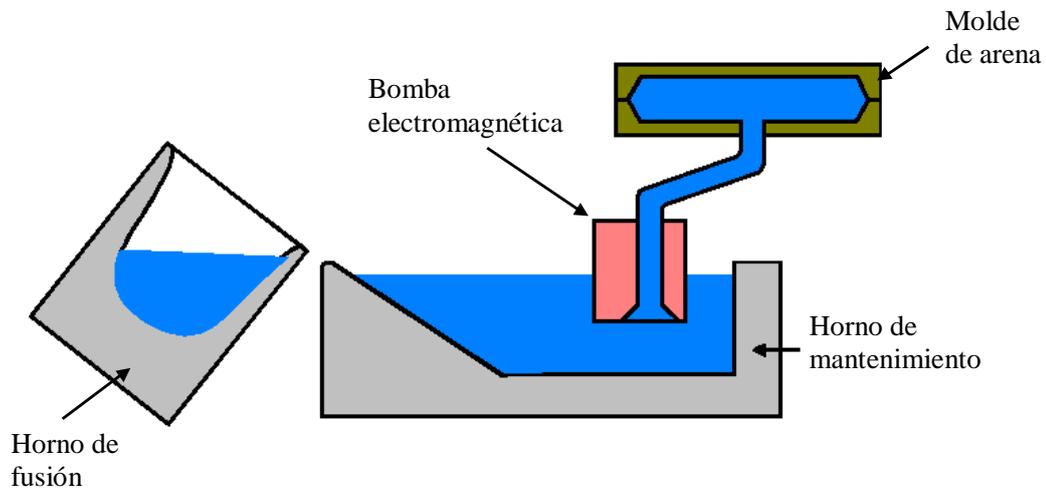


Figura 3.6 Proceso Cosworth con bomba electromagnética.

- **Proceso EPGS desarrollado por Cidaut**

Es un proceso similar al anterior, utiliza también una bomba electromagnética para impulsar el metal y llenar el molde.

Las diferencias más significativas con el proceso Cosworth es el tipo de arena utilizado para el molde y que no se giran 180° para su solidificación. Las piezas fabricadas con cada proceso son diferentes también, el proceso Cosworth está orientado en prácticamente su totalidad a la fabricación de bloques motor, mientras que el proceso EPGS produce geometrías complejas y con requerimientos de seguridad. La fabricación de los moldes en el proceso EPGS se realiza con una DISMATIC de partición vertical como se explicará al final de este epígrafe con más detalle.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los elementos esenciales del proceso EPGS. Una bomba electromagnética (sin partes móviles) dosifica el aluminio en el interior del molde de manera contragravitatoria y a una velocidad controlada con objeto de evitar cualquier fenómeno de inclusión de óxidos y gases en el interior del fundido. El llenado de molde se realiza en ciclo cerrado, mediante el uso de un conjunto de sensores capaces de medir el nivel de metal líquido. El sistema de transporte y mantenimiento de metal ha sido diseñado para impedir cualquier fenómeno de atrapamiento de óxidos. Los moldes están fabricados mediante la máquina de moldeo en arena verde "Disamatic", caracterizada por un tiempo de ciclo de tan sólo 15 segundos.

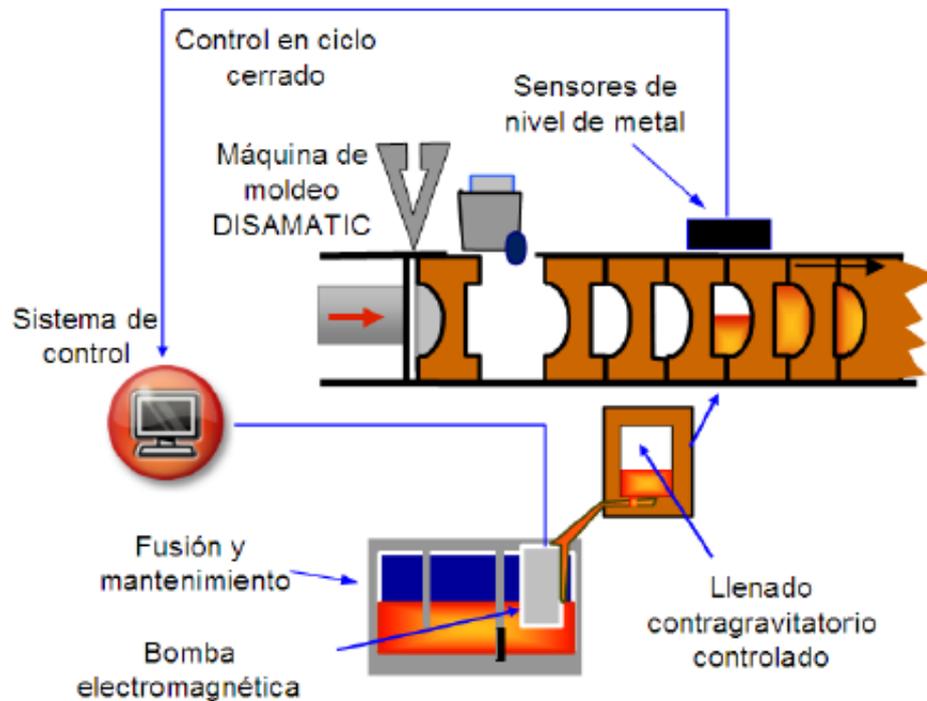


Figura 3.7. El proceso EPGS.

En el desarrollo del proceso EPGS ha intervenido un equipo de trabajo multidisciplinar, con conocimientos adquiridos a lo largo del proyecto en materias como metalurgia, bombas electromagnéticas o diseño y construcción de maquinaria específica para el proceso. El trabajo se ha organizado en cuatro líneas fundamentales: termofluidodinámica, electromagnetismo, tratamientos térmicos y diseño y puesta a punto de sistemas de control.

En la línea de termofluidodinámica se han generado nuevos criterios de diseño de proceso en lo que respecta al proceso de llenado, la solidificación y el posterior enfriamiento. De entre los muchos estudios realizados, uno de ellos, publicado recientemente, muestra como la ocurrencia de fenómenos de inclusión de óxidos para una determinada aleación parece estar más ligada al número adimensional de Weber que a la velocidad del fundido [2].

El trabajo en electromagnetismo ha ido dirigido hacia la introducción de mejoras para lograr un óptimo rendimiento y mejor control de uno de los elementos centrales del proceso, la bomba electromagnética. Tras un intensivo trabajo de simulación por ordenador y validación experimental a escala de laboratorio se han introducido cambios en el diseño y nuevos materiales. Además se ha desarrollado un procedimiento de mantenimiento preventivo de la bomba. Estos trabajos han ido acompañados del desarrollo y

puesta a punto de nuevas soluciones de sensórica para medir una serie de variables fundamentales, entre ellas el nivel de metal a lo largo del llenado, con objeto de obtener una máxima repetitibilidad del proceso de dosificación del metal y por tanto de la calidad de la pieza fundida.

Este proceso es llevado a cabo actualmente para la producción industrial de piezas en la fundición ALA (Aleaciones Ligeras Aplicada).

En el estudio realizado en el artículo con referencia en la bibliografía **¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**], se realiza una comparación entre el método tradicional de fundición frente al EPGS, fabricando la misma pieza, en las mismas condiciones pero empleando ambos procedimientos. Demostrando la capacidad del proceso EPGS para dar respuesta a los exigentes requerimientos del sector de la automoción actual. La aplicación del proceso EPGS permitió reducir drásticamente la porosidad en pieza con respecto a la colada por gravedad. Esto es debido a que el mayor control de la velocidad del fluido permite asegurarnos el completo llenado del molde bajo las mínimas condiciones de turbulencia, algo que no se puede asegurar mediante el colado tradicional.

Moldeo automático del proceso EPGS mediante máquina DISAMATIC

Bajo la premisa de la reducción del coste de las piezas, el grupo DISA (Dinamarca) comercializó su tecnología “DISAMATIC Flaskless Moulding” (Figura 3.8).

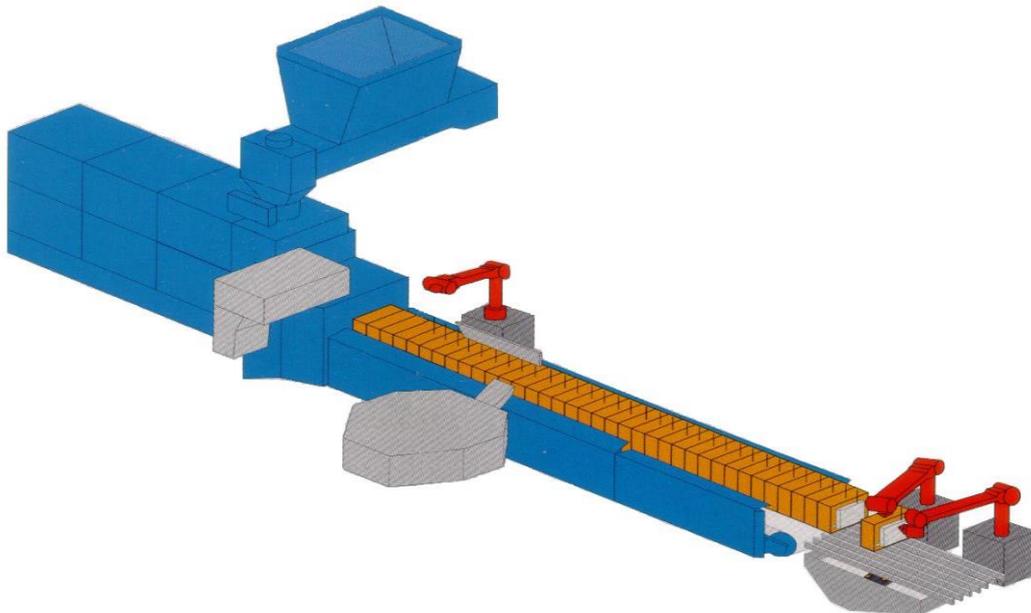


Figura 3.8 Máquina DISAMATIC.

Este proceso incorpora dos principios: en primer lugar se realiza un moldeo vertical sin caja de moldes y por otro lado, se realiza una colocación automática de los machos. La utilización de moldes verticales sin caja de moldeo constituye por sí mismo una reducción de coste, tanto material, como de manipulación, colocación, etc de éstas. Además permite la realización de moldes de anchura variable, lo que permite la realización de moldes con menor cantidad de arena y una relación entre la cantidad de arena y metal más ventajosa. Finalmente, la utilización de moldes verticales, permite que con cada molde de arena, se puedan realizar las cavidades de los dos moldes necesarios para la realización de una fundición en arena convencional, reduciéndose la cantidad de moldes por componente a la mitad que en la fundición tradicional. La Tabla 3.1 ilustra la forma y construcción de estos moldes.

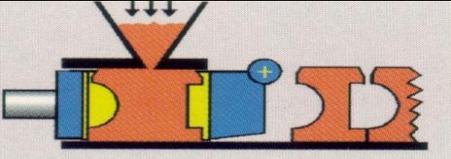
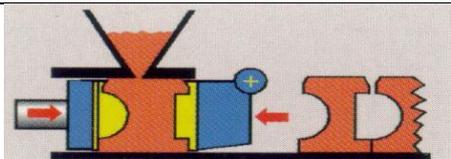
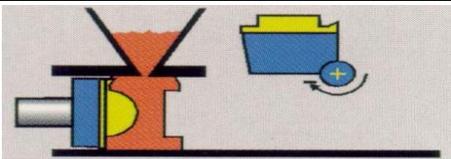
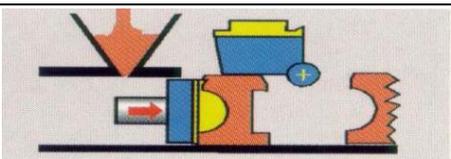
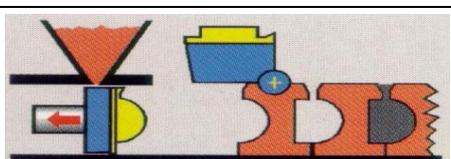
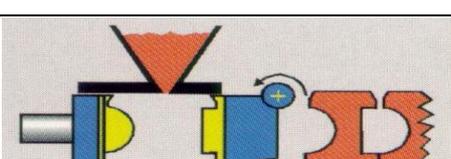
	<p>Paso 1: Llenado de arena.</p>
	<p>Paso 2. Compresión de la arena del molde.</p>
	<p>Paso 3: Movimiento del plato derecho y apertura de la cámara de moldeo.</p>
	<p>Paso 4: Arrastre del molde hasta su posición de llenado</p>
	<p>Paso 5: Retorno del plato de presión a su posición inicial.</p>
	<p>Paso 6: Cerrado de la cámara de moldeo.</p>

Tabla 3.1. Formación de moldes para moldeo vertical de DISAMATIC.

En segundo lugar, la realización y colocación automática de los machos permite una producción más rápida y eficaz de machos de alta calidad.

Los moldes con el caldo en su interior avanzan en la línea de moldes mientras se produce el enfriamiento. Una vez que éste ha concluido los moldes pasan a la estación de desmoldeo en donde se obtendrá la pieza libre de arena.

4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Generalmente las aleaciones se someten a tratamiento térmico, una vez extraídas del molde, para obtener una mejora en sus propiedades mecánicas ya que son tan importantes como la forma de la pieza. El objeto de todo tratamiento térmico es conseguir un cambio en la microestructura del metal o el estado final de tensiones residuales que mejore su comportamiento mecánico, mediante la combinación adecuada de procesos de calentamiento y enfriamiento.

Los factores fundamentales que influyen en este tipo de tratamientos son la temperatura y el tiempo, por lo que el régimen de cualquier tratamiento térmico puede representarse por medio de una gráfica de coordenadas temperatura (generalmente en el eje de abscisas) y tiempo (en el eje de ordenadas). El régimen del tratamiento térmico se caracteriza por la temperatura de calentamiento $T_{m\acute{a}x}$, es decir, la temperatura máxima hasta la que se calienta la aleación durante el tratamiento térmico, el tiempo que se mantiene la aleación a la temperatura de calentamiento, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento.

4.1 Fases de un tratamiento térmico

En un tratamiento térmico genérico se tiene la siguiente secuencia de pasos:

1. **Solución sólida o Solubilización:** Se consigue el endurecimiento deseado por la precipitación de determinados elementos, para ello es necesario que primero obtengamos una solución sólida. El objetivo de esta fase es por tanto conseguir la mayor cantidad de elementos solubles endurecibles en la aleación.

La etapa se hace a temperatura elevada, del orden de los 530°C, aunque la temperatura es más elevada cuando la aleación está cargada de elementos aleantes como Magnesio y Silicio. El tiempo de mantenimiento a temperatura depende del espesor de los productos. Durante el mantenimiento prolongado a temperaturas elevadas, los compuestos intermetálicos del tipo Mg_2Si para aleaciones de la serie 6000 y del tipo Al_2Cu para las de la serie 2000, se redisuelven y la aleación forma una solución sólida homogénea.

La temperatura de puesta en solución para las aleaciones de Aluminio de endurecimiento estructural debe ser regulada con precisión para no alcanzar la eutéctica, ya que a dicha temperatura se producirá una fusión local de los compuestos intermetálicos y de los eutécticos y el metal se vuelve inutilizable. Dependiendo de la composición, esta temperatura se sitúa entre 550 y 620°C.

2. **Enfriamiento rápido o temple:** Es la etapa más crítica de los tratamientos, el objetivo es preservar la solución sólida formada e impedir la precipitación de los compuestos intermetálicos. Se realiza normalmente por inmersión o ducha en agua fría. Es inmediatamente después de esta fase cuando las aleaciones con endurecimiento estructural son más fácilmente deformables. La velocidad de temple es un parámetro muy importante del que dependen ciertas propiedades como son las características mecánicas de tracción, la tenacidad, el comportamiento a la corrosión.... Para cada aleación existe una velocidad crítica de temple bajo cuyo umbral no se debe bajar. Para obtener la tenacidad máxima, la velocidad de temple debe ser tres veces más rápida que la velocidad crítica de temple.

El temple es susceptible de producir tensiones internas, sobre todo en las piezas de formas complejas o de grandes secciones. Se pueden disminuir las tensiones con una deformación plástica controlada, por ejemplo

mediante una tracción con el 2% de alargamiento después del temple y antes de la maduración, ya sea natural o artificial.

3. **Revenido o maduración:** Después del temple la solución sólida sobresaturada está en un estado metaestable. La vuelta al equilibrio, es decir, la precipitación de los compuestos intermetálicos que provocan el endurecimiento estructural, se puede hacer de dos maneras:
 - a) Por maduración a temperatura ambiente, *maduración natural*: Después de un reposo de varias horas, que depende de las aleaciones, la dureza y las características mecánicas se mantienen, no aumentan. Es entonces cuando la precipitación y el endurecimiento estructural han terminado.
 - b) Por revenido o *maduración artificial*: Calentamiento de varias horas entre 160 y 180°C. Este proceso acelera la precipitación. Se lleva a cabo inmediatamente después del temple. Las condiciones del revenido dependen de las aleaciones.

El tratamiento de endurecimiento estructural se representa en una gráfica temperatura tiempo, Figura 4.1.

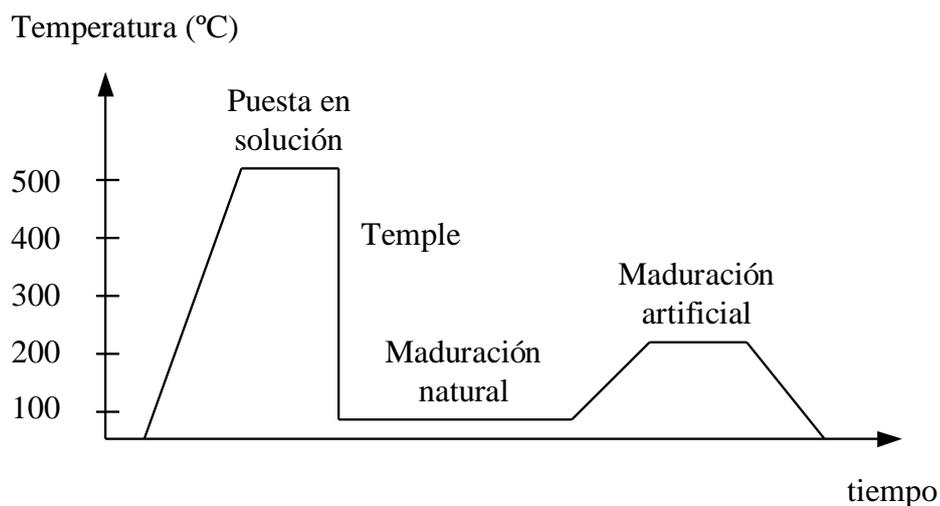


Figura 4.1 Gráfico temperatura-tiempo del tratamiento térmico de endurecimiento estructural.

4.2 Tratamiento térmico empleado y consecuencias

El tratamiento que se dará a las piezas una vez obtenidas es el denominado como T6.

T6: *Tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial:* Aplicado a los semiproductos que después de un tratamiento de solución, temple y maduración artificial mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas. En la Figura 4.2 se muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo durante el tratamiento.

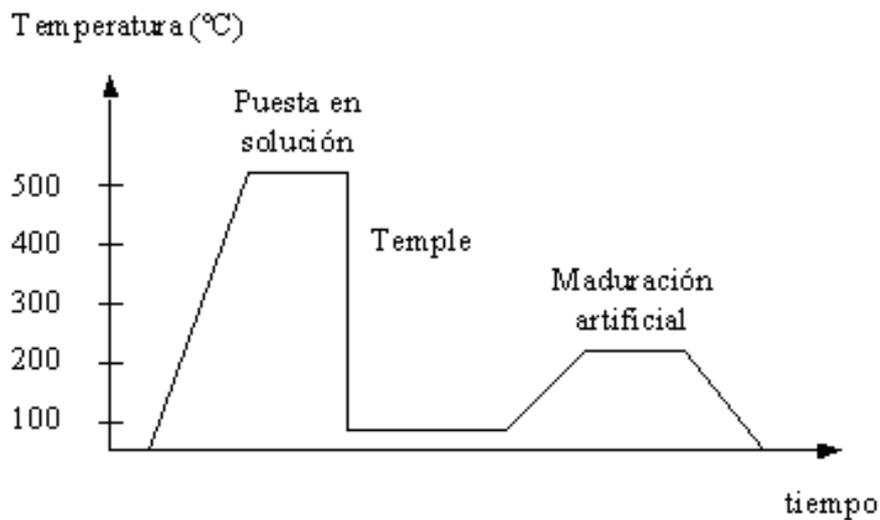


Figura 4.2 Gráfico que muestra la variación de la temperatura en función del tiempo en el tratamiento T6.

T7: *Tratamiento térmico de solución, temple y sobre-maduración / estabilizado:* Aplicado a los semiproductos que son madurados artificialmente después del tratamiento de solución y temple, más allá del límite correspondiente a la máxima resistencia con el fin de controlar alguna característica significativa.

T8: *Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y maduración artificial:* Aplicado a los semiproductos que reciben una acritud determinada entre el temple y la maduración artificial para mejorar su resistencia. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un

aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre las propiedades mecánicas.

T9: Tratamiento térmico de solución, temple, maduración artificial y acritud: Aplicado a los semiproductos que son deformados en frío después del tratamiento de solución, temple y maduración artificial para mejorar su resistencia mecánica.

T10: Tratamiento térmico de temple desde temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial: Aplicado a los semiproductos que después del enfriamiento (temple) y antes de la maduración artificial reciben una acritud determinada.

En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se muestran las características que se pueden obtener en la aleación A356 en un moldeo en arena con y sin tratamiento térmico. Nuestras piezas recibirán el tratamiento debido a la significativa mejora obtenida en las características mecánicas.

Tensión última a rotura (MPa)		Tensión de fluencia (MPa)		Elongación (%)	
Sin Trat.	T6	Sin Trat.	T6	Sin Trat.	T6
130	234	50	166	5	3,5

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas obtenidas en la aleación A356.

5 CORROSIÓN EN INSERTOS METÁLICOS

5.1 Corrosión general

La corrosión es la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con su medio circundante con el consiguiente deterioro de sus propiedades.

La Federación Europea de Corrosión distingue entre corrosión con oxidación del metal y formación de cationes metálicos y la disolución de un metal en otros metales o sales fundidas. Así, quedan excluidos de ser corrosión problemas mecánicos como ruptura por sobrecarga, desgaste, erosión, cavitación o la hinchazón de un plástico ni tampoco cambios de fase.

Sin embargo, si hay formas de corrosión en las cuales se sobreponen dos efectos, uno químico o electroquímico que constituye el de corrosión y otro mecánico, por ejemplo, el proceso de corrosión-erosión, o de corrosión bajo tensión.

En materiales no metálicos, cerámicas y polímeros, los mecanismos de deterioro difieren, en estos casos se habla de degradación.

La reacción básica de corrosión es por tanto:



Es posible definir la corrosión desde un punto de vista más químico como el tránsito de un metal de su forma elemental a su forma iónica o combinada con cesión de electrones a un no metal como el oxígeno o el azufre, por ejemplo. El metal a través de la corrosión, retorna a la forma combinada formando óxidos, sulfuros, hidróxidos... que es como los metales se encuentran habitualmente en la naturaleza por tratarse de formas termodinámicamente más estables. El metal muestra una tendencia inherente a reaccionar con el medio ambiente retornando a la forma combinada, el proceso de corrosión es natural y espontáneo.

5.2 Clasificación de los distintos procesos de corrosión

Es posible clasificar los procesos de corrosión recurriendo a criterios muy variados. Por la morfología del ataque (ataque uniforme, ataque localizado, ataque intergranular...); por el medio que lo produce (corrosión por ácidos, corrosión por sales fundidas, corrosión atmosférica, corrosión de estructuras enterradas...); por las condiciones físicas que lo motivan (corrosión por cavitación, por corrientes vagabundas...).

Se comentará levemente la primera para luego centrarnos en la más interesante, en función del mecanismo a través del cual se producen.

5.2.1 Clasificación según el mecanismo

Es la más importante desde el punto de vista científico. Analizaremos los dos mecanismos a través de los cuales se produce cualquier proceso de corrosión.

a) *Corrosión electroquímica*

La corrosión se debe a la actuación de pilas electroquímicas, en las que el metal sufre disolución en las regiones anódicas. El proceso por tanto no afecta por igual a toda la superficie metálica, pues en las regiones catódicas no hay ataque. Véase Figura 5.1.

Está demostrado que habitualmente los fenómenos electroquímicos contribuyen en mayor grado al fallo de los metales que la corrosión directa (mecanismo que se describirá a continuación).

La corrosión electroquímica se da cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas, o la simple humedad de la atmósfera y de los suelos.

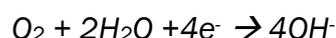
De acuerdo con esto, la presencia de moléculas de agua en la superficie es la condición necesaria para que ocurra corrosión electroquímica.

La unión eléctrica entre dos metales distintos, genera una corriente de electrones debido a la diferencia entre los potenciales electroquímicos de ambos metales. El paso de carga a través del líquido (electrolito) consiste en el movimiento de aniones y cationes que la transportan hacia el ánodo y el cátodo, respectivamente. La superficie del metal con mayor tendencia a la disolución (zona anódica) es corroída en un proceso en que los átomos

metálicos dejan sus electrones en el seno del metal pasando a la solución como ión positivo. Por otro lado, la superficie del metal con menor tendencia termodinámica a la disolución (catódica) permanece inmune al ataque. Ella recibe, a través de la masa metálica, los electrones liberados en el ánodo, que son suministrados a un captador (oxidante) presente en el electrolito en los procesos de reducción catódica.

Puede actuar como captador de electrones cualquier oxidante, pero en la mayoría de los casos actúa como tal el O_2 disuelto, en el electrolito en medios neutros y alcalinos, o el H^+ en medio ácido.

Reacciones en el cátodo:



o bien

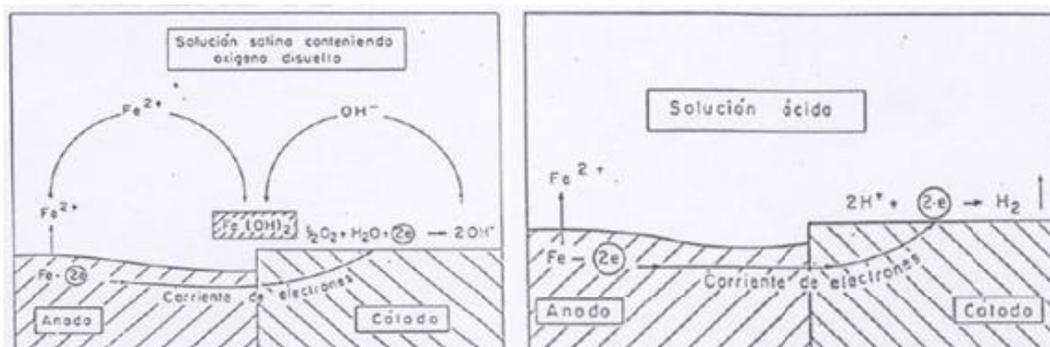
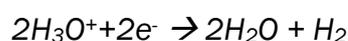
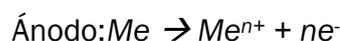


Figura 5.1 Representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica en medio neutro (izq.) y medio ácido (dcha.).

El gradiente de energía necesario para separar un electrón, en la ionización de un átomo metálico, determina la mayor o menor afinidad del metal por el electrón y cambia de un metal a otro. Serán activos los metales de baja energía de ionización y nobles los que posean alta.

En el contacto entre metales o regiones metálicas de actividad diversa, las áreas más activas tienden a ser los ánodos de las pilas de corrosión. Sobre ellas se localiza, por tanto, el ataque electroquímico, que necesariamente ha de estar acompañado por un proceso de reducción en el cátodo.

Reacciones electroquímicas básicas:



b) Corrosión directa

Se da cuando el material metálico opera a alta temperatura y por tanto no existe la posibilidad de que aparezca una película de humedad sobre la superficie metálica. Este mecanismo es característico de materiales metálicos expuestos a gases y vapores calientes.

El mecanismo consiste en la reacción química heterogénea directa entre la superficie metálica y un gas agresivo que generalmente es el O₂, con formación de películas de óxido, a través de reacciones tipo:



Este tipo de corrosión en los casos habituales de la automoción será despreciable. Por tanto no se le dará mayor repercusión. Y profundizaremos más en la primera.

5.3 Corrosión galvánica

La llamada corrosión galvánica o corrosión bimetálica tiene lugar cuando dos metales disimilares aparecen en contacto eléctrico entre sí y en contacto con un medio agresivo en el que pueda tener lugar el mecanismo electroquímico de la corrosión.

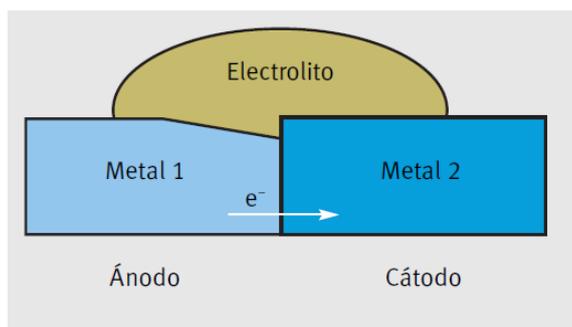
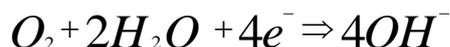


Figura 5.2 Mecanismo de corrosión galvánica.

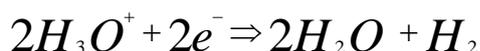
Como puede verse en la Figura 5.2 corrosión galvánica es consecuencia de una corriente eléctrica entre dos metales en contacto eléctrico. Esta corriente comienza en la superficie del metal 1, sería el ánodo, al producirse sobre él una oxidación del metal base:



En la cual se liberan electrones que circulan hasta la superficie del cátodo donde se producirá la reducción del agente oxidante que tengamos en nuestra atmósfera, O_2 en una atmósfera neutra, o bien H_2 cuando es más ácida, dando lugar a las siguientes reacciones:



con el oxígeno como receptor de electrones, o



cuando el elemento reducido es el H_2 .

Para que todo esto pueda ocurrir, el circuito debe cerrarse a través de un electrolito conductor, como el agua. Solo con formarse una película húmeda sobre las superficies, aun siendo imperceptible a la vista, se podrá transmitir la corriente a través de las cargas iónicas presentes en el electrolito.

El mecanismo de corrosión galvánica lo que implica es una variación en la velocidad de corrosión de los metales implicados. El metal que actúe de cátodo, en el cual se produce la oxidación puesto que es menos estable, más activo, se acelerará la velocidad de corrosión, generando un deterioro mayor en su superficie libre. Por otro lado, el metal con comportamiento más noble

quedará protegido debido a que actuará como cátodo, quedando exento de la destrucción producida por el proceso de oxidación.

En estas condiciones el metal activo sufre corrosión más rápidamente que si estuviera aislado, mientras que el metal o fase de comportamiento más noble sufre menos ataque que si estuviera aislado.

Otro aspecto que conviene recordar es que la magnitud de la corriente resultante del par galvánico, directamente relacionada con la velocidad de corrosión, no se puede predecir a partir de la diferencia de potenciales entre las reacciones anódica y catódica, puesto que es necesario tener en cuenta las pendientes de las curvas de polarización para ambas reacciones.

Para reacciones de corrosión bajo un fuerte control catódico, como es el caso de sistemas en los que la reacción de electroización es la reducción de oxígeno y suponiendo condiciones similares en cuanto a relación superficie catódica-superficie anódica, la intensidad de corrosión puede ser la misma independientemente de cuáles sean los materiales que constituyan la pila bimetálica.

Aplicando esto a nuestros casos vemos que

1. Deberemos seleccionar los metales con menor diferencia de potencial.
2. Una solución sería interponer entre ellos un material aislante.
3. Por último otra opción es emplear revestimientos sobre las superficies en contacto con el electrolito, así cortaríamos el circuito eléctrico.

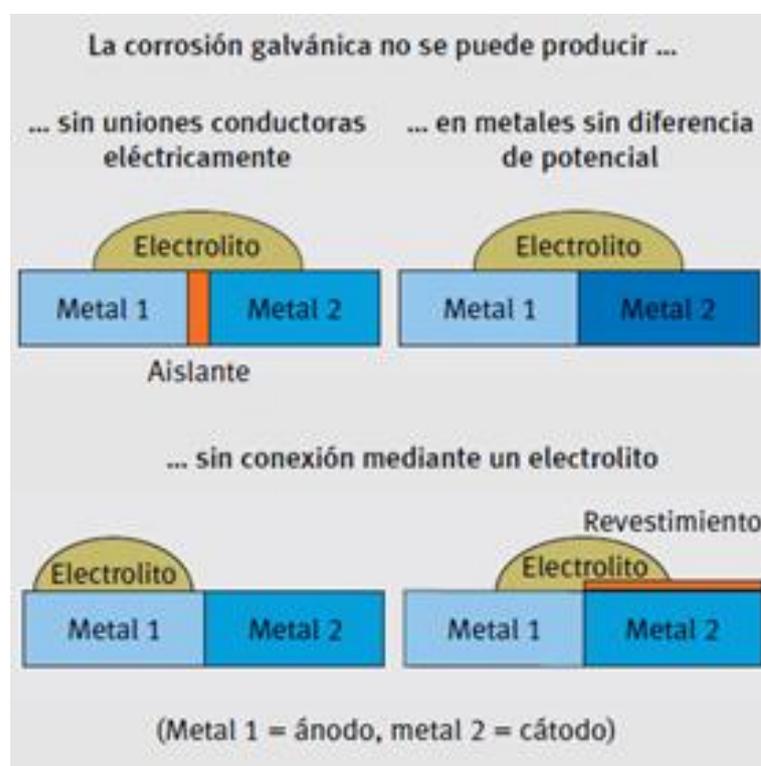


Figura 5.3 Maneras de eludir la corrosión galvánica.

Este tipo de corrosión es la que más nos debe preocupar al poner en contacto dos metales con diferente potencial eléctrico, que son el inserto de acero y la pieza de aluminio. Las formas de evitarla se ilustran en la Figura 5.3.

5.3.1 Factores que influyen en la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica

5.3.1.1 El nivel de polarización de la reacción catódica

En procesos de corrosión en los que la reacción de electrolización es la reducción de oxígeno, la cinética de corrosión del metal anódico viene determinada, en muchos casos casi exclusivamente, por el trazado de la curva de polarización catódica, y en concreto por la extensión de las zonas de activación y difusión que presente.

Cuando se trata de fenómenos de corrosión ácida es factor determinante cual sea el metal de comportamiento catódico debido al distinto valor que cada material presenta respecto a la sobretensión para la descarga del gas hidrógeno. La velocidad de corrosión del metal anódico crece al unirse con metales de baja sobretensión para la descarga de hidrógeno.

En la Figura 5.4 se puede observar las diferencias de potencial que existen entre los diferentes metales respecto a un electrodo de referencia estándar.

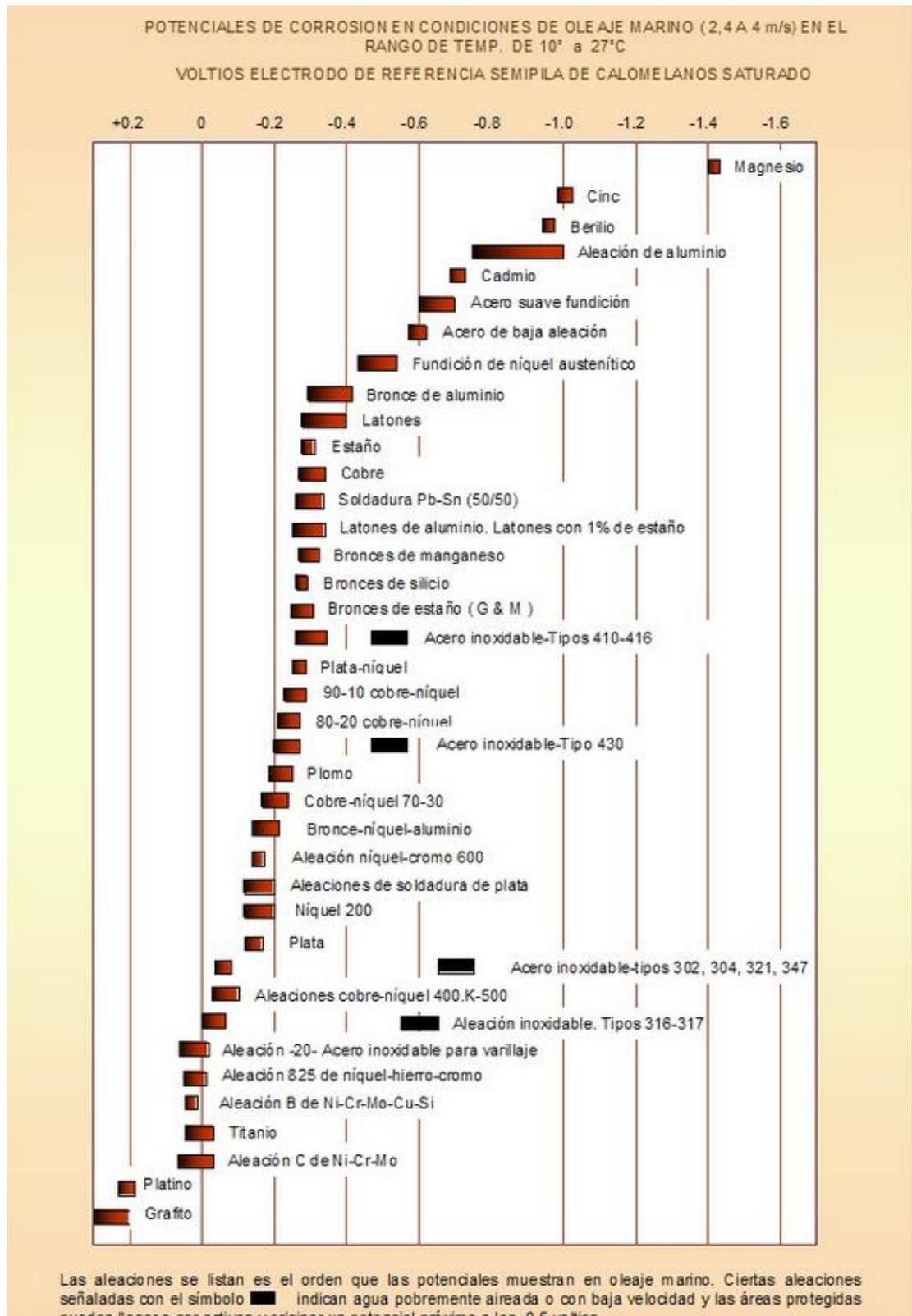


Figura 5.4 Potenciales de corrosión de diferentes metales respecto a un electrodote referencia formado por una semipila de calomelanos saturados.

A la vista de la tabla anterior, se deberá evitar el contacto entre los metales con mayor diferencia de potencial de corrosión, debido a que esto puede suponer una grave aceleración de la corrosión sufrida por el metal más electronegativo.

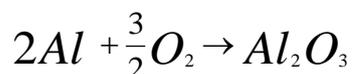
5.3.1.2 La relación de áreas ánodo-cátodo

Es un factor fundamental. La unión eléctrica de un ánodo de pequeña superficie con un cátodo de gran área conduciría a velocidades de disolución anódica elevadas como consecuencia de una alta densidad de corriente anódica.

Siempre que sea inevitable el situar en contacto metales disimilares debe cuidarse que la relación de áreas sea siempre favorable el ánodo y no al revés.

5.3.1.3 Posible presencia de películas estables de productos oxidados sobre las superficies de los metales anódico y/o catódico

En la reacción de oxidación del aluminio:



sobre el aluminio se formaría una capa de óxido estable, concretamente de Al_2O_3 de forma espontánea en el momento que entra en contacto con el aire. Esta capa, poco conductora, introduce fenómenos de polarización de difusión en la reacción de electrolización del oxígeno, reduciéndose la velocidad de corrosión. Además, también introduciría fenómenos de polarización por resistencia al introducir mayor caída óhmica en el circuito electroquímico.

En el caso de tener aluminio-acero inoxidable, la presencia de una capa pasiva de Cr_2O_3 sobre el segundo juega el mismo papel que el Al_2O_3 , de manera que la velocidad de corrosión del aluminio es mucho menor, actuando esta capa de ánodo de sacrificio.

5.3.2 Mecanismo de la corrosión entre aluminio y acero

Para el par galvánico en cuestión, tenemos una amplia selección de aleaciones con un cierto rango de potenciales, aun así se puede generalizar diciendo que el acero será el metal con un comportamiento más noble, mientras que el aluminio, tiene un potencial según la serie galvánica para agua de mar menor, será más activo por lo que actuará como ánodo deteriorándose.

El aluminio es un metal que en presencia única y lo más pura posible, tiene una gran resistencia a la corrosión debido que sobre su superficie se forma una capa de óxido (denominado alúmina) al entrar en contacto con el oxígeno. Esta capa superficial que se crea, es poco conductora y pasiva, por ello no deja ocurrir la corrosión con la misma facilidad, protegiendo el material que queda por debajo de ella. Pero al entrar en contacto con acero, éste puede suponer un peligro al incrementar la corriente que pasa a través de la pila galvánica pudiendo acelerar la corrosión sufrida por el aluminio.

Aunque teóricamente se puede predecir con antelación el comportamiento que tendrán dos materiales metálicos disímiles en contacto eléctrico, siempre se deberá utilizar la experimentación para poder acotar realmente la vida útil en servicio del par y conocer mejor el rendimiento de los tratamientos que pretenden evitar la corrosión. Los materiales en condiciones reales pueden trabajar de forma diferente que en la teoría, suele ser bastante habitual por lo tanto debe complementarse la teoría con los ensayos normalizados o la experiencia.

6 COLOCACIÓN DE INSERTOS

Una vez conocido todo el procedimiento que se ha de llevar a cabo para la fabricación de piezas de aluminio de la fundición A356, es el momento de añadir el último elemento que nos falta para poder obtener un componente híbrido. Este elemento es el inserto de acero que se pretende introducir en las unidades de aluminio.

En el presente epígrafe se pretende explicar el porqué del interés en introducir los insertos en la industria, el modo de hacerlo así como las mejoras que puede introducir y los inconvenientes que nos puede crear.

Se pretende crear con todo ello el precedente que nos guíe la consiguiente investigación que se desarrollará en el propio trabajo.

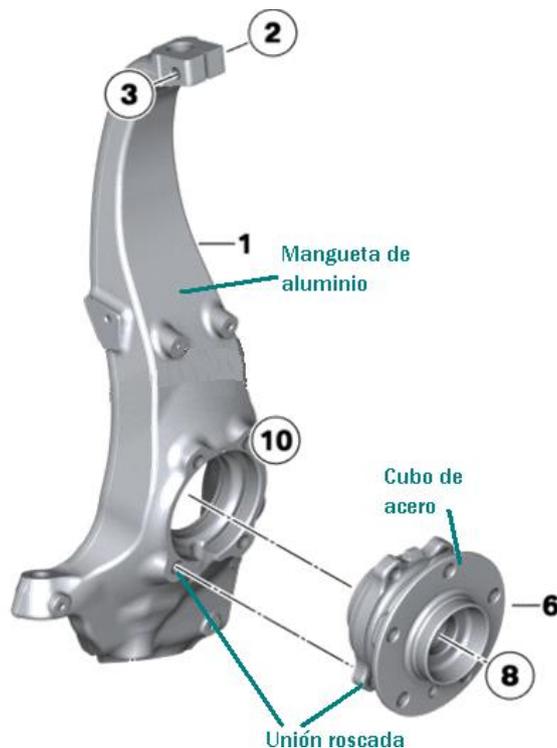
6.1 Definición del inserto y situación en la industria actual

Consideramos como inserto, el elemento metálico introducido dentro de otra matriz metálica ya sea del mismo material o de uno diferente. Este concepto surge de la necesidad de aunar en una pieza características propias de diferentes materiales, creando así un componente híbrido.

De esta manera en las piezas de aluminio, las cuales tienen por objetivo sustituir a otros metales más pesados pudiendo aligerar el peso de una máquina, pueden tener un déficit en sus propiedades mecánicas en ciertas zonas localizadas, las cuáles están sometidas a unos esfuerzos mayores. Por lo tanto, aquí aparece el acero para aportar la resistencia a fatiga, desgaste o fluencia entre otras que necesita el componente fabricado para poder desempeñar correctamente su función, para la que ha sido diseñado.

Por tanto el inserto podrá tener geometrías variables, en función de la zona en la que deba ser colocado y el trabajo que deba realizar.

En la actualidad, los casquillos o piezas con la misma finalidad destinadas a alojar rodamientos, ejes... se fabrican en acero o fundición, y se unen a la pieza de aluminio por medio de tornillos, remaches, o tras un proceso de



inserción mediante apriete, uniones mecánicas en general que requieren de un mecanizado de ambas piezas.

Un ejemplo son las manguetas de los vehículos que deben ir conectadas al eje de la rueda a través de rodamientos, actualmente numerosas marcas, entre ellas BMW, emplean un cubo de acero sobre el que se montan los rodamientos, se une a la pieza de aluminio mediante tornillería como se puede ver en la Figura 6.1.

Figura 6.1 Mangueta de aluminio realizada por BMW.

Otro ejemplo es el bloque motor de aluminio con camisas de los cilindros de fundición, sobre este componente se han desarrollado numerosas

investigaciones como por ejemplo en el libro de la bibliografía con referencia [7] del que además se ha añadido la Figura 6.2. En la actualidad numerosas marcas emplean este método para fabricar sus propios motores, algunas de ellas son: Renault, Grupo PSA, Honda... Estos ejemplos pueden observarse en las figuras 6.3 y 6.4.

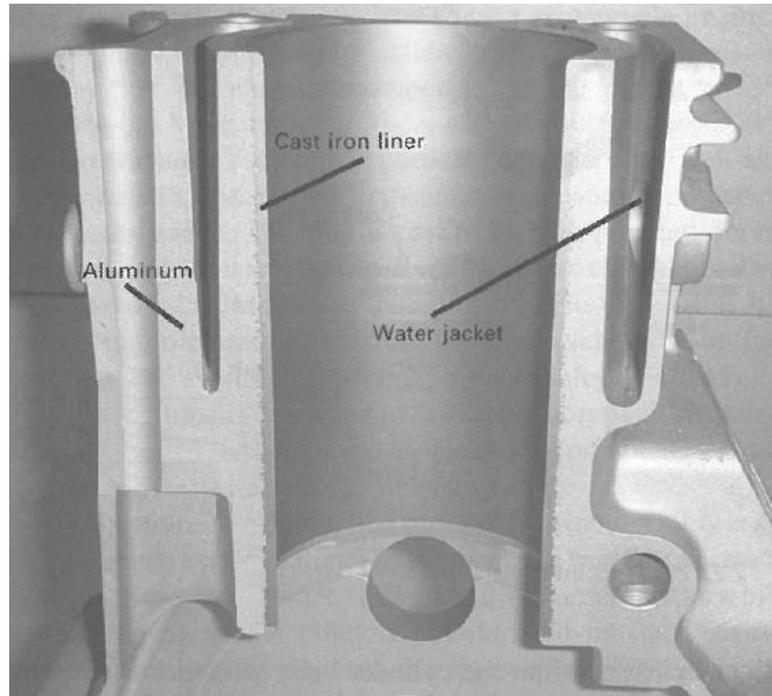


Figura 6.2 Bloque motor fabricado en aluminio con inserto de fundición de hierro en las camisas de los cilindros.

En todos ellos los insertos reciben un tratamiento superficial especial, intentando aumentar la irregularidad de la superficie para mejorar el agarre del aluminio sobre el hierro y además aumentar el contacto para incrementar la transferencia de calor pudren así refrigerar mejor el cilindro.

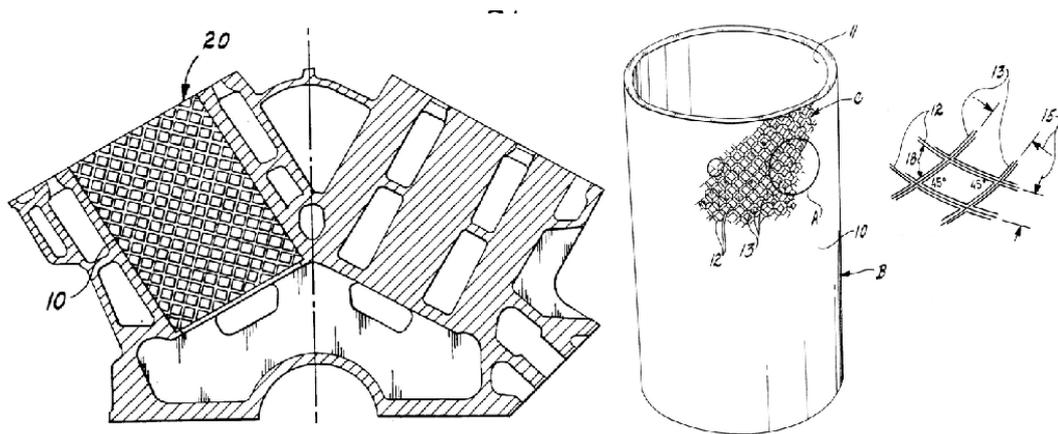


Figura 6.3 Patente EP 0532331 B1 sobre el modo de preparación de un inserto moleteado para introducirlo en el bloque motor.

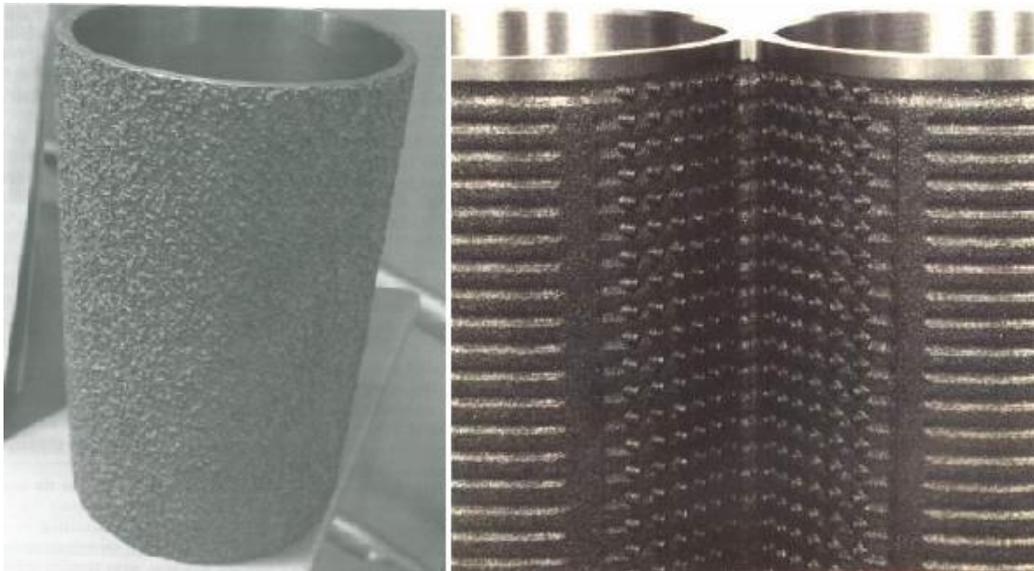


Figura 6.4 En esta imagen se muestran otras geometrías de los insertos, el de la izquierda conseguido mediante el uso de arena gruesa y el de la derecha empleado por Honda, con espinar en la superficie.

Otra opción sería la de sustituir los la colocación de los bushings mediante presión tras la fabricación de piezas en el agujero adecuado por la colocación de estos en el molde. Un ejemplo se podría dar en el brazo de suspensión empleado por el Alfa Romeo Giulietta que se ve en la Figura 6.5.

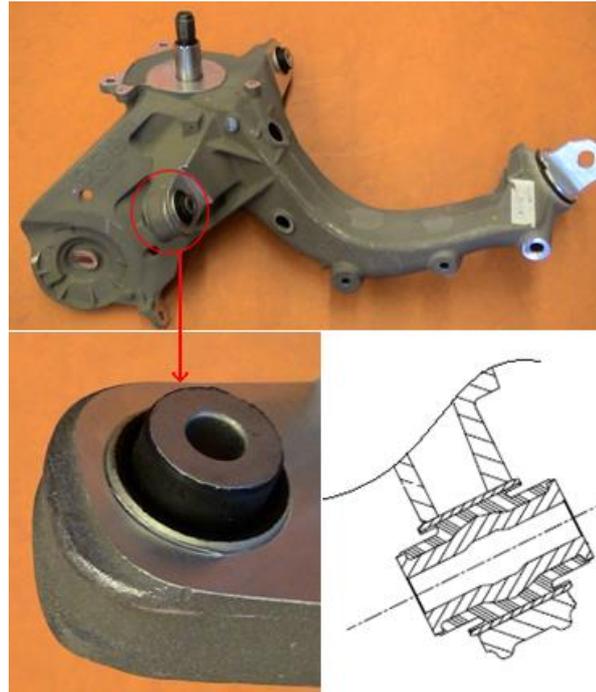


Figura 6.5 *Bushing insertado mediante presión en el brazo de suspensión que monta el Alfa Romeo Giulietta.*

6.2 Colocación del inserto desarrollada en Cidaut. Similitudes con enfriadores

El método de colocación del inserto en la pieza de aluminio, desarrollado en este proyecto, consiste en posicionar dicho inserto dentro del molde arena en la zona en la que queremos que quede situado, para posteriormente verter el caldo de metal fundido dentro de la cavidad del molde.

La realización del proceso de moldeo y colada del aluminio será la EPGS desarrollada por Cidaut y explicada anteriormente en el epígrafe 3.2.1.

Una vez lleno el molde, el inserto quedará rodeado por el metal para que cuando solidifique el aluminio, que tiene un coeficiente de dilatación térmica (α) menor, agarre al acero debido a la contracción sufrida tras enfriar hasta temperatura ambiente.

$$\alpha_{Acero} = 4 \cdot 10^{-9} * T^a + 6 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{Aluminio} = 1 \cdot 10^{-8} * T^a + 2 \cdot 10^{-5}$$

Experimentos anteriores al desarrollo de este trabajo, llevados a cabo en Cidaut, de probetas fundidas en las que se colocó un inserto de acero, sirvieron para verificar que durante este procesado la única unión aluminio-acero que existía era mecánica debida a la contracción. La unión química no existe entre ambos puesto que no hay una energía suficiente para que los átomos salten la barrera de las capas de óxido y exista difusión atómica entre los dos metales.

Aparte de estos ensayos previos, también se puede utilizar como precedente a la hora de valorar el efecto que ejerce el inserto sobre la colada, el uso de enfriadores en los moldes de arena.

Los enfriadores o chills son piezas metálicas que se insertan en los moldes de arena buscando aumentar la velocidad de enfriamiento en determinadas zonas, para mejorar propiedades mecánicas a través de la reducción del DAS y de la porosidad, y direccionalizar el enfriamiento. Al igual que el inserto que estamos valorando emplear, lo que tenemos es un contacto entre la superficie de un metal como puede ser acero y el aluminio fundido. Un ejemplo de un chill se puede observar en la Figura 6.6.

Hay dos tipos de enfriadores, internos que deben ser del mismo material que el metal fundido puesto que se unen a él y externos que deben estar en contacto a través de la máxima superficie posible y ser de un tamaño lo suficientemente grande para no fundir. Éstos últimos son los que trataremos debido a su similitud con los insertos.

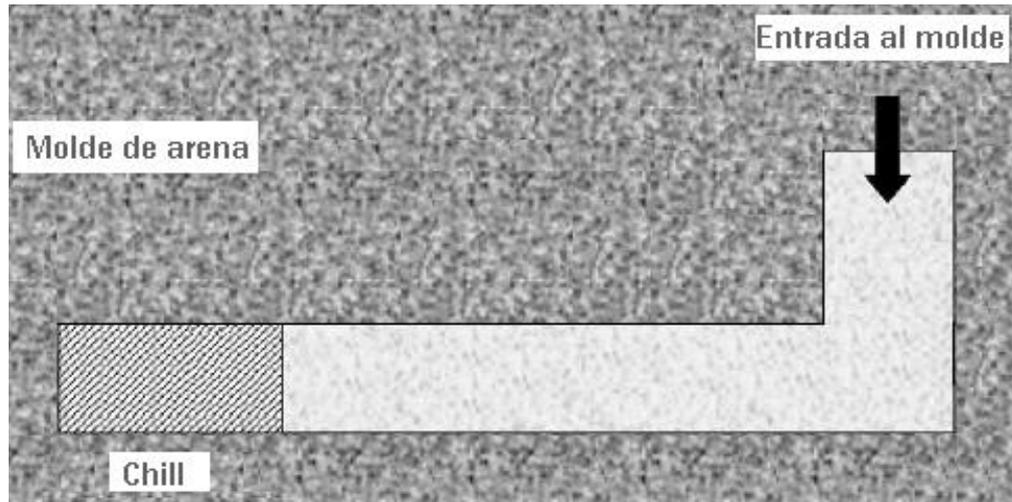


Figura 6.6 Colocación de chill dentro de un molde de arena.

La forma y tamaño del enfriador debe seleccionarse cuidadosamente puesto que un enfriamiento demasiado rápido puede inducir grietas y defectos en un colado.

6.3 Ventajas e inconvenientes del empleo de insertos co-fundidos

Se ha realizado una revisión de la bibliografía para identificar con mayor claridad los inconvenientes, entre ellos se pueden extrapolar algunos registrados en la utilización de enfriadores por similitud como se ha comentado anteriormente.

6.3.1 Ventajas que nos puede aportar la utilización de insertos

- Puede abrir el camino a la sustitución de un mayor número de piezas fabricadas con metales pesados empleando componentes híbridos de este tipo, que permiten alcanzar una reducción de peso.
- Si cualquier acción realizada para colocar el inserto, como las que han sido mencionadas en el epígrafe fueran reemplazadas por la co-fusión incluyendo el inserto directamente en el molde se podría reducir el tiempo de ciclo. Lo que hace que este desarrollo sea especialmente interesante desde el punto de vista industrial.

6.3.2 Inconvenientes que debemos que afrontar

Los principales inconvenientes que puede acarrear este proceso de colocación del inserto provienen de la fabricación como se puede comprobar a través de la bibliografía (ver el proyecto de fin de carrera de David Losúa Bárcena Losúa, D. (2007). Proyecto fin de carrera. *Nuevos conceptos para el diseño de procesos de fundición de aluminio en molde de arena*. Universidad de Valladolid. para profundizar más). También en el libro de John Campbell, *Castings Practice* recogido en la bibliografía [12], en el cual se habla ya de la dificultad que existe en la unión durante el colado de bloques motores con las camisas de los cilindros (insertos de un material más resistente).

Tras la realización de experimentos con enfriadores, se detectaron defectos generalizados en la superficie de contacto con el metal fundido como se observa en la Figura 6.7.



Figura 6.7 Resultados obtenidos en las superficies de la pieza en contacto con los enfriadores.

Las conclusiones que de él se extraen se resumen en que a pesar de la apariencia aleatoria del defecto puesto que bajo las mismas condiciones de ensayo puede aparecer o no, si se detecta que en algunas muestras la probabilidad de su aparición puede aumentar o disminuir. Además se extraen ciertos factores que marcan las posibles vías de solución, son los siguientes:

- En general se observa que la tendencia a desarrollar defectos se acentúa cuanto mayor **gradiente de temperatura** aparezca en las superficies en contacto.
- Se puede ver que aparecen burbujas posiblemente originadas por la **oclusión de gases** en la superficie. Pudiendo estar originadas por la condensación de la humedad, u otros volátiles presentes tanto en el inserto, como en los machos y el molde.

En el Bloque II se procederá a estudiar e investigar con más profundidad sobre estos defectos, sus posibles causas y soluciones.

BLOQUE II

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

7 DEFINICIÓN APLICACIÓN PRÁCTICA

La geometría seleccionada para realizar el estudio teórico-práctico de la colocación de insertos de acero sobre piezas de aluminio fundido, se corresponde con una mangueta delantera.

Las manguetas están integradas dentro de los mecanismos de dirección de un automóvil. Su principal función es sujetar la rueda, además en ella se unen también los brazos de suspensión y el eje delantero del coche.

Por ello el punto de resistencia mecánica más crítico dentro de la mangueta será la zona de alojamiento del eje debido a las múltiples cargas de vibración y rotación que transmite el eje a la pieza. Además la prolongación de dichas cargas en el tiempo supone una exposición de la pieza a fatiga, lo cual resulta bastante crítico en un material de aluminio.

Para subsanar este déficit resistente que nos supone el aluminio, se decide integrar en la zona de alojamiento del eje (como se puede ver en la Figura 7.1) un inserto de acero cilíndrico más capaz de absorber dichas cargas, y a su vez se sigue permitiendo el ahorro de peso que aporta el aluminio en el resto de la mangueta.

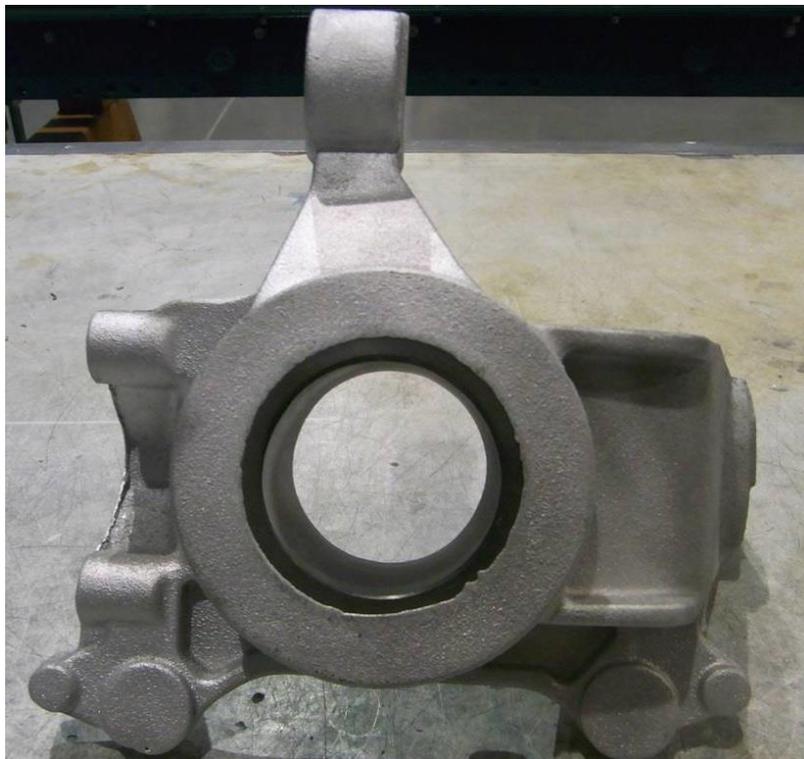


Figura 7.1 Pieza obtenida tras la fundición en la que podemos observar la situación del inserto de acero.

Como ya se ha comentado en la exposición teórica, hay una serie de premisas que deben considerarse para evitar defectos como los que han aparecido en los enfriadores, los principales son:

- Gradiente de Temperaturas.
- Oclusión de gases:
 - o Atrapados durante el llenado.
 - o Originados por la condensación durante el llenado.
 - o Desprendidos por la “suciedad” que el inserto puede tener en su superficie.

El análisis de todas estas características permitirá conocer cómo se debe proceder en el proceso de preparación del inserto así como los parámetros principales (temperatura y velocidad de llenado) durante el proceso de fundición.

Este análisis se realizará mediante el uso de herramientas de simulación del proceso de fundición, con el software comercial MAGMAsoft.

Las piezas de responsabilidad fabricadas en aluminio fundido, como la seleccionada para este trabajo de investigación, deben ser tratadas térmicamente después de la etapa de colada para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas.

La misma diferencia entre coeficientes de dilatación térmica que presentan el acero y el aluminio, y que contribuye a su agarre mecánico durante el proceso aquí analizado, puede hacer que durante el calentamiento que sufre el conjunto en el tratamiento térmico, ambos elementos se separen y pierdan su posición. La geometría del inserto debe ser tal que asegure dicho posicionamiento.

Además tal y como se ha explicado en el punto 6 del Bloque anterior, la unión metálica acero-aluminio presenta corrosión galvánica, por lo que debe tratar de minimizarse el efecto perjudicial sobre la vida del componente que este fenómeno pueda tener.

Por tanto, se identifican como puntos importantes a considerar para conseguir el objetivo de este trabajo, un inserto co-fundido:

- un correcto diseño de colada para evitar la oclusión de gases
- un dimensionamiento adecuado de la geometría del inserto para asegurar el posicionamiento del mismo tras el tratamiento térmico
- una evaluación del efecto de corrosión que tendrá lugar entre las superficies de inserto y mangueta para conocer si se deben tomar medidas extras a las habituales

Todo ello ha sido analizado y se expone a continuación.

7.1 Simulación del proceso de Fundición. Análisis oclusión de gases

Con el fin de asegurarnos de que las piezas que se produzcan mediante este innovador proceso tendrán una colabilidad buena y que la influencia del inserto no provocará porosidades internas ni otros defectos asociados como puede ser el atrapamiento de gases, emplearemos el programa MAGMASOFT.

En él simulamos el llenado de la pieza base sobre la que trabajaremos (mangueta como se puede ver en la Figura 7.2) aunque sea extensible a otras geometrías distintas. Reproduciendo las condiciones de trabajo reales cuando en el molde se inserta el casquillo de acero.

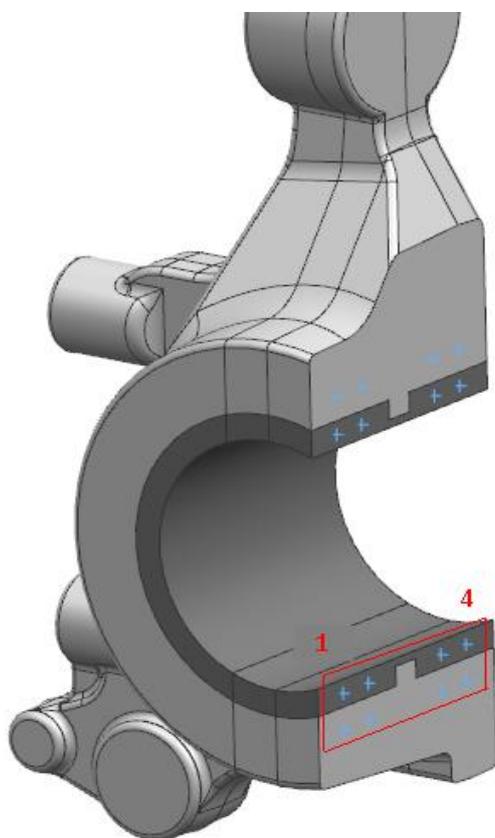


Figura 7.2 Perspectiva, con corte transversal de la pieza en la que vamos a simular la inserción del casquillo de acero (se ve en un tomo más oscuro en la imagen).

Una vez realizada la simulación en MAGMASOFT podemos observar que el llenado es correcto, la temperatura de llenado en ningún caso cae por debajo de 620°C por lo que aseguramos que el frente no va a enfriarse y que se produzcan faltas de llenado, tal y como se observa en la Figura 7.3.

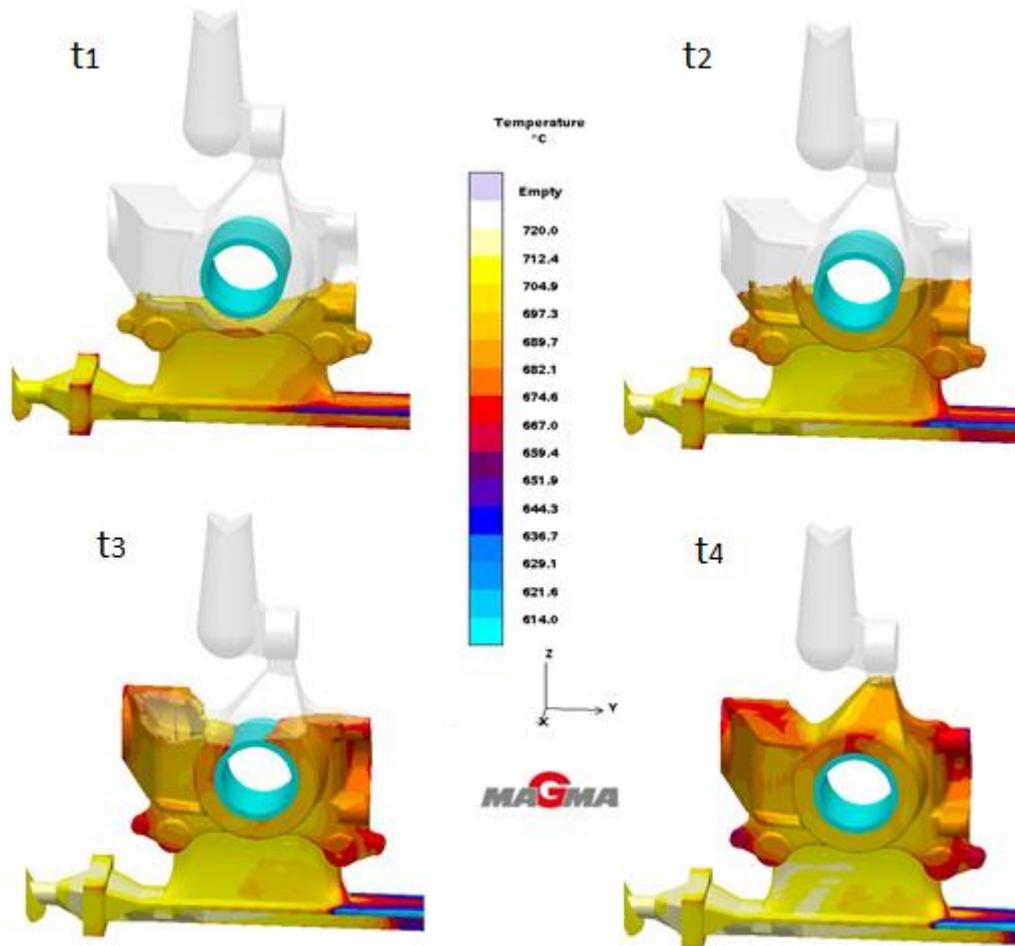


Figura 7.3 Representación de cuatro instantes de llenado consecutivos donde se aprecia que la temperatura del aluminio fundido está por encima de 620°C.

Por último, se puede comprobar que el diseño del sistema de mazarotaje es correcto ya que no se aprecian defectos de porosidad por contracción en la geometría. Las mazarotas son las que aparecen con defectos de rechupe así como el ataque a pieza por su masividad, ver Figura 7.4.



Figura 7.4. Resultado de porosidad por contracción. Sólo aparecen defectos de porosidad en las mazatoras y en el ataque a pieza.

7.1.1 Atrapamiento de aire durante el llenado

Esto puede ser una consecuencia de la falta de fluidez durante el llenado y de la generación de gases anteriormente mencionados. Si el metal llega a la parte superior en un estado ya semisólido y además existen volátiles en el molde, las dos corrientes que se encuentran arriba pueden atrapar los gases creando bolsas de las que no pueden escapar, ver Figura 7.5.

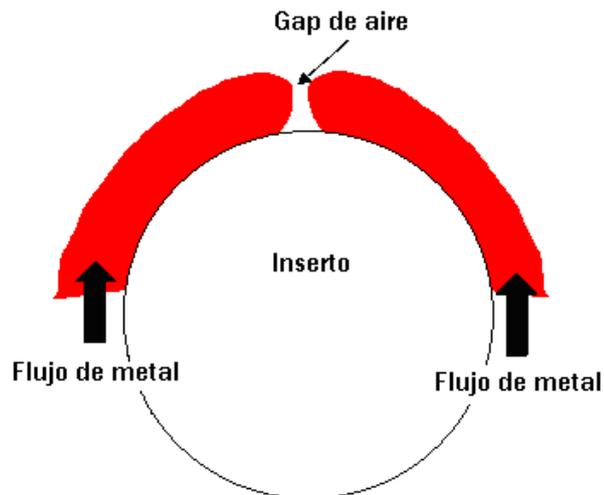


Figura 7.5 Esquema de la oclusión de gases sobre la superficie del inserto.

Si se observa de modo ampliado el punto en el que el metal termina de rodear el inserto en los resultados de simulación, puede verse que no hay atrape de aire porque los frentes se unen sin salpicaduras y de forma suave, ver Figura 7.6

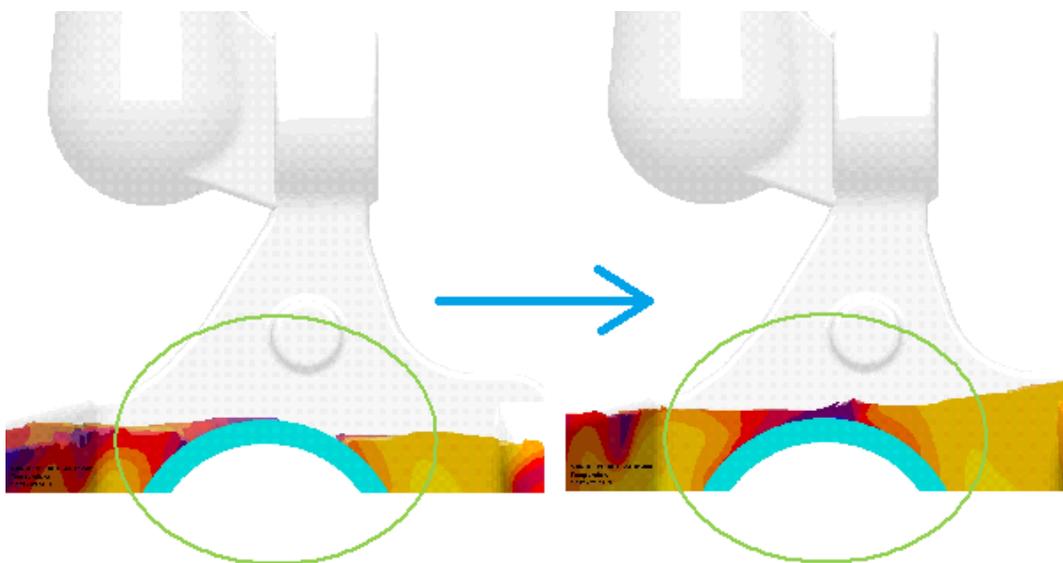


Figura 7.6. Detalle ampliado de la unión de frentes cuando el metal termina de rodear el inserto.

7.1.2 Atrapamiento de aire consecuencia del uso de insertos

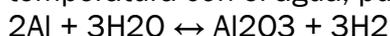
El análisis de defectos en el uso de enfriadores, elementos similares en su comportamiento dentro del molde a los insertos, que ya se mencionó en el

punto 6 del Bloque I ha puesto de manifiesto una serie de premisas a considerar para evitar que la oclusión de gases durante el llenado cree un defecto en la superficie entre acero-aluminio. Analizamos a continuación cada una de ellas:

Suciedad en la superficie del inserto

Está claro y ampliamente comprobado a través de toda la bibliografía consultada que la presencia de volátiles como grasas, aceites, gases generados por los machos, óxidos o humedad entre otras sobre la superficie del inserto tiene una grave repercusión sobre el proceso de colada del aluminio sobre él. Esto es debido a la liberación de gases que generan las reacciones químicas que se dan entre el metal caliente y los elementos adheridos a la superficie.

Una de las reacciones químicas más peligrosas es la del aluminio a gran temperatura con el agua, puesto que genera hidrógeno gaseoso:



La liberación de gases supone que parte de ellos puedan quedar ocluidos entre el inserto y la matriz.

Los procedimientos seguidos para evitar esto suelen ser similares, se basan en la limpieza superficial realizando un lavado a fondo y calentamiento para quemar los compuestos indeseados y evitar la humedad a una temperatura de en torno a 200°C (ver bibliografía [12]).

Condensación durante el llenado

Si ocurre la condensación de la humedad en el instante previo al llenado sobre la superficie del inserto, es un grave problema puesto que puede originar gases como ocurre en el apartado anterior. En este caso la proveniencia de la humedad no es de la superficie del inserto cuando se ha montado, si no que esta humedad es la presente en el aire que se encuentra en el molde. Una vez comienza el colado aumenta la temperatura del aire incrementando la solubilidad del agua en él que podrá condensar sobre el inserto al encontrarse con una superficie “fría”. Para saber la temperatura mínima a la que debe estar el inserto sin que genere condensación se debería conocer la temperatura que alcanza el aire del molde durante el llenado y la humedad existente para poder manejar la carta psicrométrica.

A través de las fórmulas que rigen las cartas psicométricas se ha realizado un estudio en Excel como se puede observar en la gráfica de la Figura 7.7.

En esta se han relacionado 3 variables que son: temperatura de rocío, temperatura de la superficie del inserto y humedad relativa.

Sabemos que lo que hay que evitar es que el inserto alcance la temperatura de rocío, porque en ese caso podría condensar agua sobre la superficie. Para ello empleamos el dato que conocemos para marcar un límite, este es la temperatura que se alcance en el aire del molde durante el proceso: 50°C.

He marcado una línea límite de color rojo a esta temperatura y se han dibujado las curvas que genera el inserto a diferentes temperaturas. Observando la gráfica podemos concluir que todas las situaciones que queden por encima de la línea rojo serán teóricamente seguras para evitar la condensación.

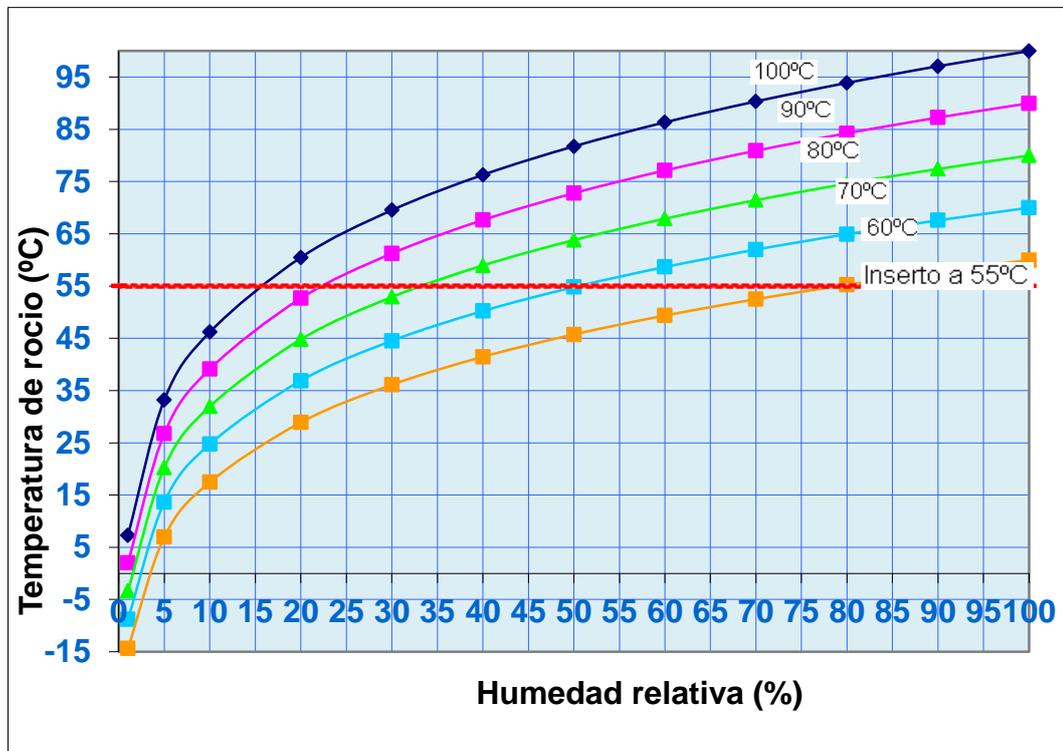


Figura 7.7 Gráfica para el estudio de la condensación en la superficie del inserto.

Por ello para realizar el proceso sin temor a la aparición de gotas de agua, se recomienda trabajar en unas condiciones de humedad relativa de al menos el 30% y precalentar el inserto antes de introducirlo para que esté por lo menos a 70°C.

Como conclusión a lo expuesto anteriormente, no hay indicios de que existan problemas con la oclusión de gases durante el proceso de fundición y por tanto la sanidad de la piedra debería estar asegurada.

7.2 Comportamiento durante el tratamiento térmico

Una vez obtenida la pieza en la colada descrita anteriormente, es necesario aplicarle un tratamiento térmico para alcanzar unas características mecánicas óptimas como ya se explicó en el bloque teórico.

El problema que se plantea a priori, ocurre en la etapa de solubilización del tratamiento térmico, en ella se llega a alcanzar la temperatura máxima de este proceso, unos 540°C. Esta temperatura se mantiene durante aproximadamente 6h, lo cual induce en el aluminio y el acero una dilatación térmica. Del mismo modo que el aluminio contrae más que el acero, de lo cual nos servimos para asegurar la sujeción del casquillo, el aluminio dilata más que el acero, por lo que al aumentar la temperatura, inserto y pieza se sueltan.

Una vez enfriados ambos materiales, el casquillo se encontrará en una posición diferente a la deseada, que es la inicial.

De este modo se confirma la necesidad de mecanizar resaltes o anillos alrededor de la geometría inicial del casquillo para asegurar que durante el tratamiento térmico, después de fundida la pieza, la unión permanezca. La geometría propuesta es la mostrada en la Figura 7.8.

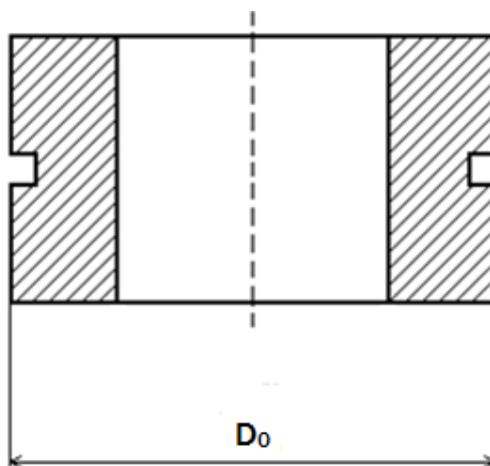


Figura 7.8 Geometría que se propone para que el inserto permanezca en su posición durante el tratamiento térmico.

El inserto utilizado es de acero F114 con un diámetro exterior de D_0 y la matriz de aluminio es de aleación A356.

La función de la ranura consiste en que el aluminio penetre cierta distancia en el inserto durante el colado, para que una vez dilaten ambos componentes

durante el tratamiento térmico, se asegure que esta distancia es mayor a la diferencia de dilatación que sufren el aluminio y el acero.

7.2.1 Cálculo de la profundidad de la ranura

Como conocemos los materiales de ambas partes de la pieza, sabemos también sus coeficientes de dilatación térmica:

$$\alpha_{Acero} = 4 \cdot 10^{-9} * T^a + 6 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{Aluminio} = 1 \cdot 10^{-8} * T^a + 2 \cdot 10^{-5}$$

Debido a los diferentes valores de Calor Específico de ambos materiales la variación de temperatura que experimentarán inserto y mangueta en función del tiempo será diferente. Sin embargo, dado el tiempo que permanecen a 540°C es lógico pensar que ambos alcanzarán esa temperatura. Sin embargo, el estudio se realizará en las condiciones más extremas que puedan encontrarse, lo que significa que en el proceso de calentamiento el acero se mantiene a temperatura ambiente que es de 20°C mientras que el aluminio alcanza la máxima dilatación habiendo llegado a los 540°C. Si aseguramos que la profundidad de la ranura es mayor que el aumento que se produce en el tamaño del aluminio, el inserto nunca se desplazará de su sitio.

Así, se procede a realizar el cálculo de esta profundidad de ranura.

Primeramente, calculamos la dilatación que sufre el aluminio cuando se alcanzan los 540°C:

$$D_{f,Al} = D_0 + \alpha_{Al} \cdot \Delta T^a \quad D_0 = D_0 + (4e-9 \cdot 570 + 6e-6)(570-20) \quad D_0 = \mathbf{1.013 \cdot D_0 \text{ mm}}$$

Como estamos suponiendo que el acero se mantiene a 20°C, el término del aumento de temperatura será cero y su diámetro final no varía del inicial:

$$D_{f,Ac} = D_0 + \alpha_{Ac} \cdot \Delta T^a \quad D_0 = \mathbf{D_0}$$

Teniendo calculados ambos diámetros finales, debemos asegurar que la ranura sea de mayor profundidad que la diferencia creada por la dilatación entre el acero y el aluminio:

$$\text{Profundidad} > (D_{f,Al} - D_{f,Ac})/2 = (0.013D_0)/2 = \mathbf{0.0066D_0}$$

Como conclusión, este resultado es el mínimo que nos asegura el agarre durante el tratamiento térmico, introduciendo el valor de D_0 en mm.

7.3 Comportamiento frente a corrosión

En las uniones entre dos metales disímiles, podemos encontrarnos con una diferencia de potencial considerable que provoca una fuga de electrones del metal más electronegativo hacia el más noble, generando el deterioro del primero. Para que esto ocurra debe haber contacto con un electrolito conductor.

Si la unión realizada deja gaps entre ambos metales, esto favorecerá que se pueda colar electrolito en los pequeños huecos formando minipilas en la interfase que nos conducirán a una corrosión localizada, creando picaduras en la superficie del aluminio que está en contacto con el acero, de forma que además sea indetectable para el ojo humano. Esto puede ser fatal para el comportamiento deseado en la pieza durante su vida útil pudiendo provocar fallos prematuros.

Los ensayos de corrosión nos podrían dar una idea del comportamiento que tendrían frente a la corrosión galvánica estos dos metales en contacto, pero no se han dado las circunstancias para poder realizarlos.

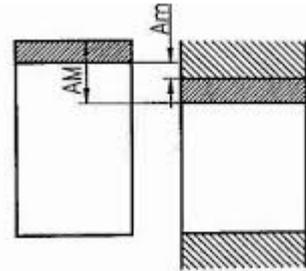
Por lo tanto, la manera de asegurar que no tendremos ningún problema de corrosión es a través de la experiencia que tenemos con estos metales unidos por otros métodos.

Partimos de conocer el comportamiento de la unión del brazo de suspensión del Alfa Romeo Giulietta en la cual se introduce un bushing de acero dentro de la matriz de aluminio mediante presión. Sabemos que en este caso no hay ningún problema de corrosión y lo más peligroso sería que se filtrara electrolito entre ambos metales debido a la falta de apriete. Por lo tanto, si podemos asegurar que mediante la co-fusión se pueden alcanzar unos valores de apriete cercanos a los obtenidos mediante el encaje por presión del bushing, se podrá también afirmar que no tendremos problemas de corrosión.

7.3.1 Apriete en el acoplamiento mediante presión

Para calcular la interferencia que existe entre el bushing y el agujero que lo aloja cuando lo insertamos a presión debemos conocer el diámetro inicial del agujero y el diámetro exterior del bushing, así como sus tolerancias.

Tendremos un apriete máximo y otro mínimo determinados por los diferentes límites de dimensión de las piezas usadas (Figura 7.9):



$$\delta_{\text{mín}} = d_{\text{ag, máx}} - d_{\text{eje, mín}}$$

$$\delta_{\text{máx}} = d_{\text{ag, mín}} - d_{\text{eje, máx}}$$

Como es un apriete, el resultado dará negativo (aunque lo daremos expresado en su valor absoluto).

Figura 7.9 Apriete entre eje y agujero.

La medida del agujero mecanizado es $39,4^{+0,05}_{-0,05}$ mm. (Figura 7.11)

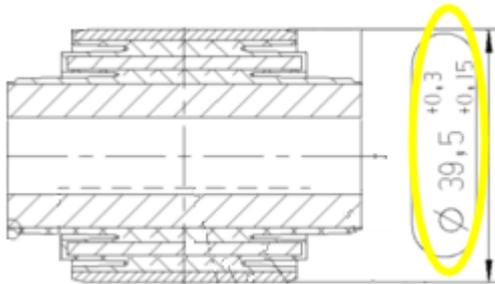


Figura 7.10 Tolerancias del eje.

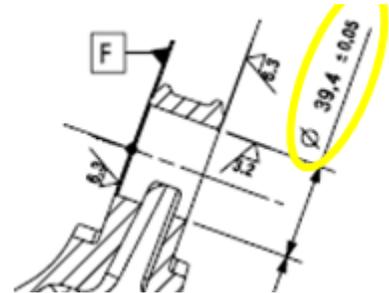


Figura 7.11 Tolerancias del agujero.

Y la medida del diámetro exterior del bushing facilitada por el fabricante es

$39,5^{+0,3}_{+0,15}$ mm. (Figura 7.10)

Resultados de la interferencia:

$$\delta_{2,\text{máx}} = 0.45 \text{ mm}$$

$$\delta_{2,\text{mín}} = 0.2 \text{ mm}$$

7.3.2 Apriete mediante la co-fusión

Se ha estudiado basándose en las temperaturas obtenidas en la pieza durante la simulación de llenado y solidificación con el programa MAGMAsoft. En ella tenemos una geometría de una mangueta que envuelve un inserto de acero que está precalentado y a la hora de realizar la colada, tiene una temperatura de 60°C.

A partir de esta tabla podemos realizar un gráfico relacionando el tiempo con la temperatura:

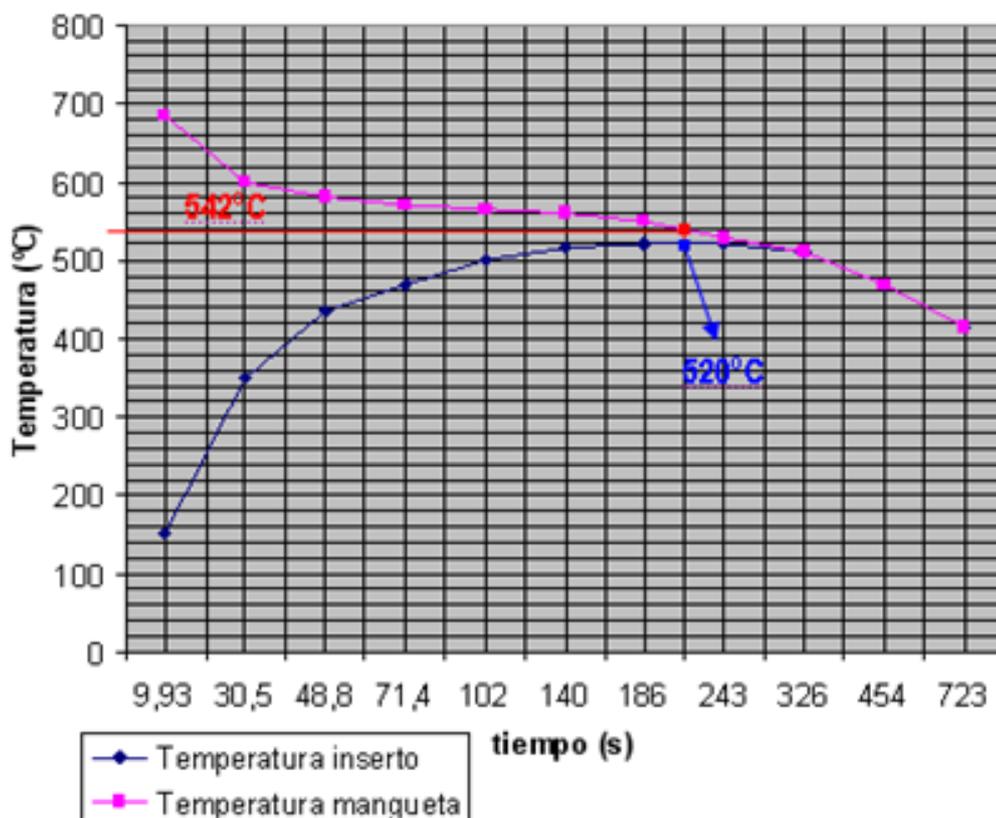


Figura 7.12 Gráfica que muestra la evolución de la temperatura tanto en el inserto como en la mangueta durante la solidificación.

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 7.12, ambos metales alcanzan la misma temperatura, a partir de la cual comienzan a enfriar al mismo tiempo en el segundo 326,255 y esta temperatura es de **510°C**.

Una vez conocida esta temperatura inicial y sabiendo que tienen que llegar hasta temperatura ambiente, suponemos 20°C, podemos saber la contracción que se produce en ambos metales a través de la siguiente fórmula:

$$\Delta d = \alpha \cdot d_0 \cdot \Delta T^a$$

Donde α es el coeficiente de dilatación térmica, independiente para cada metal y dependiente de la temperatura inicial:

$$\alpha_{Acero} = 4 \cdot 10^{-9} * T^a + 6 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{Aluminio} = 1 \cdot 10^{-8} * T^a + 2 \cdot 10^{-5}$$

d_0 es el diámetro y el incremento de temperaturas corresponde al salto entre la temperatura inicial desde la que enfrían a la vez hasta la temperatura ambiente, 490°C.

En nuestro caso partimos de un inserto con un diámetro exterior a temperatura ambiente de 39,5 mm, que se expandirá siguiendo la fórmula expresada anteriormente hasta 39,6556 mm a 510°C. Al enfriar regresará al diámetro inicial.

Por otro lado el aluminio parte de un diámetro inicial igual al del inserto de acero a 510°C, pero al enfriar llegará a un tamaño menor que el acero porque su coeficiente de dilatación térmico es mayor. Este diámetro final del aluminio, a temperatura ambiente, se obtiene también con la fórmula de los incrementos de diámetro y es de 39.1679 mm.

Para calcular la interferencia, δ , sólo tenemos que comparar los diámetros que hemos hallado para ambos metales cuando se encuentran a temperatura ambiente.

$$d_{aluminio, amb} = 39,1679 \text{ mm}$$

$$d_{acero, amb} = 39,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{1, \text{mín}} = 0.3321 \text{ mm}$$

Pero el inserto de acero, no se expande libremente hasta que alcanzan la misma temperatura, si no que cuando el aluminio se encuentra a 542°C entra en fase de semi-solidus y comienza a generar tensiones que impedirán que el inserto se siga expandiendo, de esta forma para calcular el otro extremo del rango de valores que la interferencia puede alcanzar, consideramos que el

aluminio está a 542°C y el acero ha alcanzado su máximo diámetro. Mirando en la gráfica vemos que en ese instante el acero está a 520°C, por lo tanto partiendo de su d_0 , 39.5mm, y aplicando las fórmulas anteriores podemos saber que el diámetro expandido es 39.6596 mm que será el mismo desde el cual contrae el aluminio hasta temperatura ambiente.

$$d_{\text{acero, amb}} = 39.5\text{mm}$$

$$d_{\text{aluminio, amb}} = 39.1333\text{mm}$$

$$\delta_{1,\text{máx}} = 0.3667 \text{ mm}$$

7.3.3 Análisis de resultados y conclusiones

Como ya se ha explicado al comienzo el objetivo es utilizar estos datos sobre los aprietes conseguidos en los dos métodos para comparar su comportamiento frente a corrosión.

Datos recogidos en la Tabla 7.1:

Interferencia Método	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Media (mm)
Co-fundición (1)	0.3667	0.3321	0.3494
Inserto a presión (2)	0.45	0.2	0.325
Ratio (1)/(2)	0.81	1.66	1.07

Tabla 7.1 Comparación de la interferencia conseguida a través del método de co-fundición y el apriete mediante presión.

A mayor apriete, mayor presión existirá entre las superficies en contacto de los metales y, por lo tanto mayor impedimento existirá a que se filtre electrolito en los vacíos que existan en la interfase. Esto provoca que las superficies estén más protegidas frente a corrosión.

Como se puede ver en la tabla anterior, el rango de valores cuando introducimos el inserto a presión varía mucho más, dándonos un intervalo en

el cual el extremo superior otorga mejor comportamiento que la co-fundición, no quedándose tan lejos. Mientras que el límite inferior es bastante más pobre que el rango de valores que se consigue realizando la colada sobre el inserto.

Esto quiere decir que el método de co-fundición es más estable en cuanto a resultados, no teniendo grandes saltos entre sus valores. También hay que resaltar que el valor medio de ambos métodos es muy similar, por lo tanto así lo será su comportamiento en valores normales.

En conclusión, no se espera un comportamiento peor al de las soluciones actuales donde el inserto de acero es colocado en una operación de inserción mecánica sobre la pieza de aluminio cuando se alcanza el máximo en ambos casos, pero la co-fusión nos garantiza un apriete medio mayor.

8 DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Con el utillaje fabricado según el diseño de colada definido mediante simulación con MAGMASoft, los parámetros de perfil de llenado y temperatura optimizados con la simulación y seleccionado como método de limpieza para el inserto un calentamiento del mismo para eliminar aceites y humedad, se procede a realizar las pruebas de fundición que nos facilitarán la geometría sobre la que realizar ensayos mecánicos de push-out que son los que validarán la funcionalidad y aplicabilidad de este desarrollo.

Las pruebas se realizan con temperatura de colada igual a 730°C para asegurar el correcto llenado del molde.

El tratamiento del inserto se realiza calentando el acero durante 30 minutos a una temperatura de unos 100°C, aunque debido al tiempo de permanencia en el molde previo al llenado, el inserto se encuentra a unos 70°C cuando el aluminio entra en contacto con él. Este precalentamiento permite eliminar suciedad y la humedad de la superficie del acero, por otro lado disminuye el gradiente térmico que provoca su diferencia de temperatura con la del aluminio colado.

Tras las primeras pruebas de fundición, aparece en todos los moldes realizados el defecto que muestra la Figura 8.1 siguiente defecto:



Figura 8.1 Pieza fundida con inserto. Sección que muestra el defecto.

Cuando se retira el inserto de acero se observa el defecto en la superficie de aluminio. Se observa que de toda la superficie en contacto solo está defectuosa aquella zona que se encuentra en posición más alta y alejada de la zona de entrada del metal fundido, ver Figura 8.2.

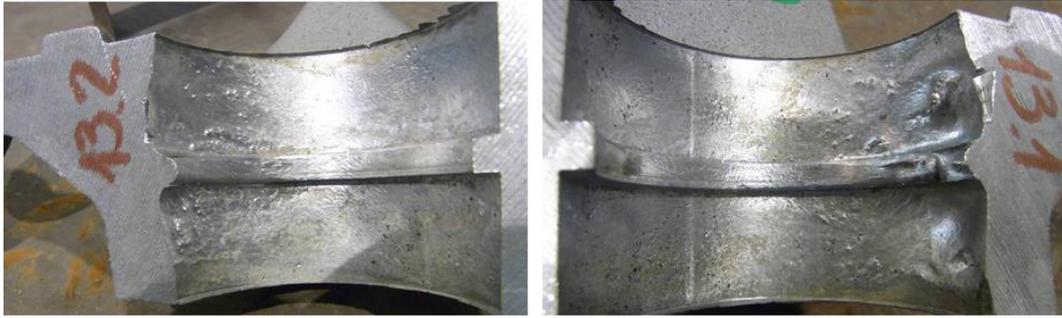


Figura 8.2 Defecto ampliado en pieza con ranura completa.

El análisis de la simulación descartaba la posibilidad de aire atrapado durante el llenado y el tratamiento de los insertos debería asegurar que no se trata de gases ocluidos, sin embargo experimentalmente se comprueba que existe algún motivo por el que los componentes fundidos no son adecuados.

Para analizar de dónde proviene el defecto se plantean una serie de pruebas que ayuden a identificar la causa. Se cree que todas ellas están relacionadas con la geometría o estado de la superficie del inserto:

- geometría de la ranura: es posible que el mallado que se realiza en el programa de cálculo MAGMAsoft no sea suficientemente detallado para apreciar problemas de llenado en la ranura.
- el tratamiento para limpieza que se da al inserto no es suficiente.
- el gradiente de temperaturas entre ambas superficies durante la solidificación genera una fuerte contracción en la superficie del aluminio.

Las dos primeras posibles causas se analizan mediante experimentación, mientras que para la tercera se usarán los datos generados por el software de simulación como medio para analizarlo.

8.1 Pruebas experimentales para analizar la influencia de la geometría de la ranura en el inserto de acero. y calidad superficial del inserto de acero.

Para comprobar si la ranura es la causa del defecto se fundirán geometrías con la superficie del inserto lisa sin mecanizar, aunque funcionalmente no sean válidos.

Para conocer si la ranura sólo afecta en el momento en el que los frentes se unen durante el llenado, último punto de llenado alrededor del inserto, se fundirán geometrías en las que la ranura sólo está mecanizada en la mitad del diámetro central del inserto.

a. Sin ranura

Tras el proceso de fundición y analizar la sección central, como se puede observar en las imágenes de la zona izquierda dentro de la Figura 8.3. Pero tras realizar un corte por la zona central de la pieza que atraviesa longitudinalmente al inserto, se observa el defecto en la zona superior de la matriz de aluminio que está en contacto con el inserto de acero. Este defecto nos invalidaría las piezas obtenidas para su puesta en funcionamiento.

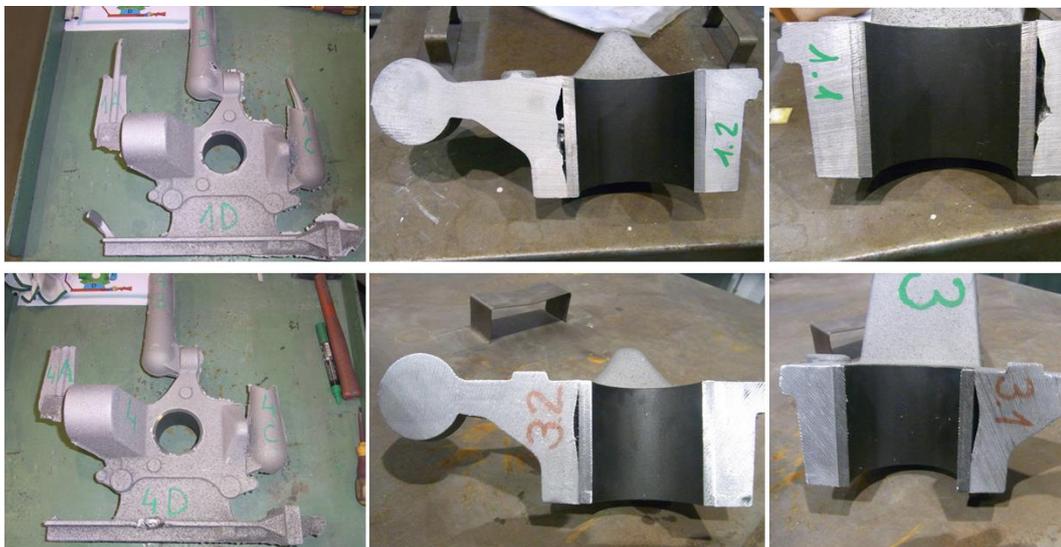


Figura 8.3 En las imágenes se muestran dos manguetas realizadas sin ranura.

En la Figura 8.4 podemos observar superficialmente y más ampliado el defecto obtenido. A primera vista tiene aspecto de burbuja de aire o una contracción, más tarde se estudiará más a fondo el posible origen.



Figura 8.4 Ampliación del defecto detectado.

b. Con media ranura

Al realizar en el inserto una media ranura se obtienen unos resultados muy similares al caso anterior, con defecto de una morfología parecida y situado en el mismo punto como podemos ver en la Figura 8.5 y la Figura 8.6.



Figura 8.5 Pieza realizada con un inserto con media ranura.

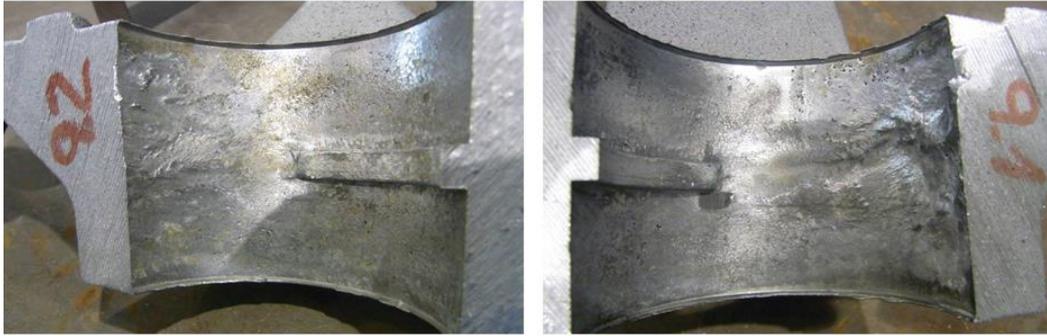


Figura 8.6 Defecto en la pieza con media ranura.

Por lo tanto, se puede concluir diciendo que la geometría de la ranura no es la causante del defecto.

8.2 Pruebas experimentales para analizar la influencia de la calidad superficial del inserto de acero.

Planteando la posibilidad de que el defecto sea ocasionado por un deficiente estado de la superficie del inserto que soporta al aluminio colado se busca modificar el estado en que se inserta el acero.

Los procedimientos seguidos para evitarlo se basan en la limpieza superficial realizando un lavado a fondo, desengrasado, granallando (limpia además la capa de óxido superficial) y calentamiento para quemar los compuestos indeseados y evitar la humedad.

Por ello en las nuevas pruebas que se realicen se hará un lavado jabonoso del inserto, un granallado y además se dará un tratamiento de ultrasonidos en la piscina y se precalentará alcanzando unos 90°C y llegando en torno a los 60°C cuando el aluminio entra en contacto con él, así se disminuye el gradiente térmico.

Tras las pruebas de fundición, de nuevo vemos que los resultados son similares a lo visto hasta este momento como se aprecia en la Figura 8.7 y Figura 8.8.



Figura 8.7 Pieza con inserto tratado para su limpieza y con ranura completa.

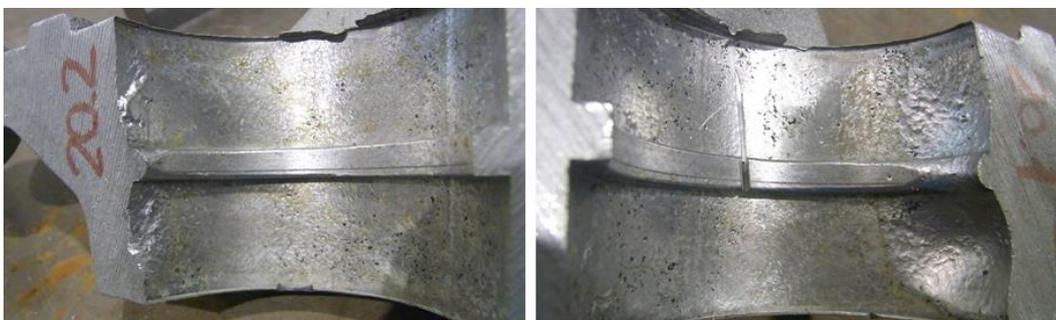


Figura 8.8 Imagen detallada del defecto.

En definitiva, no se trata de un defecto causado por gases que se desprendan de la descomposición de algún tipo de suciedad que pueda quedar en la superficie del inserto de acero al calentarse en el proceso de llenado.

8.3 Análisis del gradiente térmico en la interfaz aluminio-acero. Investigación sobre la causa del defecto y variables a modificar

Para comprobar que el gradiente de temperaturas creado por el inserto de acero, que inicialmente está a una temperatura inferior que la colada, se recogen los datos de temperatura durante la solidificación en diferentes puntos de pieza e inserto.

La alta transmisión de calor durante la solidificación que puede provocar una contracción de la superficie exterior del inserto debido a la generación de fuerzas internas que producen la contracción de la superficie. La fórmula que rige el valor de esta fuerza es la siguiente:

$$f_v = -\frac{\alpha \cdot E}{1 - 2\mu} \text{grad}(T)$$

Donde:

E: módulo de elasticidad
 α : coeficiente de dilatación térmica
 μ : coeficiente de Poisson

De la fórmula se puede extraer que la fuerza de contracción depende directamente del gradiente de temperaturas que se generen en la pieza.

$$\text{grad}(T)_x = \frac{T_i - T_j}{\Delta x}$$

He realizado un estudio a través de Excell con los datos de simulación obtenidos a través de Magma de la temperatura en los puntos cercanos a la superficie de contacto con el inserto en una pieza de aluminio que presenta defectos en la parte superior al casquillo como se puede ver en la Figura 8.9.

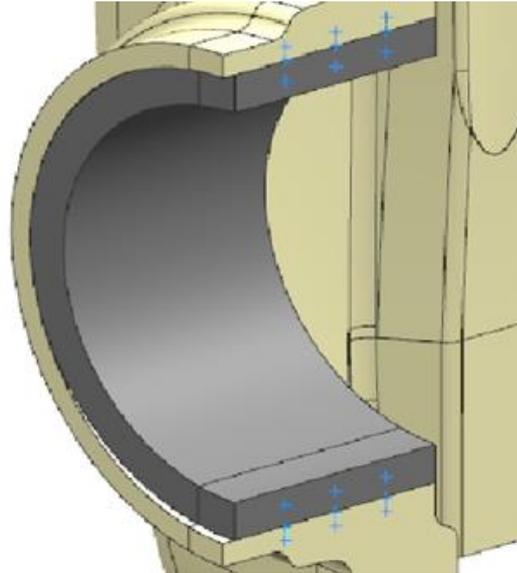


Figura 8.9 Imagen obtenida de MAGMASOFT que muestra los puntos tomados en la simulación.

Se ha calculado el gradiente de temperatura existente en dirección vertical entre los tres pares de puntos de la pieza que se ven en la imagen anterior, este gradiente se calcula a partir de una temperatura de aproximadamente 573,25 °C a partir de la cual la fracción sólida del aluminio es de 0,65 y se empiezan a crear fuerzas internas en él. Además esto se ha realizado en tres planos A, B y C siendo B el central y los otros dos planos a 7mm a su derecha e izquierda.

Me he centrado en el plano B para observar algún patrón de comportamiento que me diferencie la zona superior donde aparece el defecto de la inferior. Realizando esto los resultados que se han obtenido no son concluyentes como puede verse en la Figura 8.10, por ello no se descarta el gradiente de temperaturas como posible influencia a la formación del gap pero no se considera como factor fundamental. A esta contracción hace referencia John Campbell en la página 149 de su libro “Practice” ver bibliografía [12].

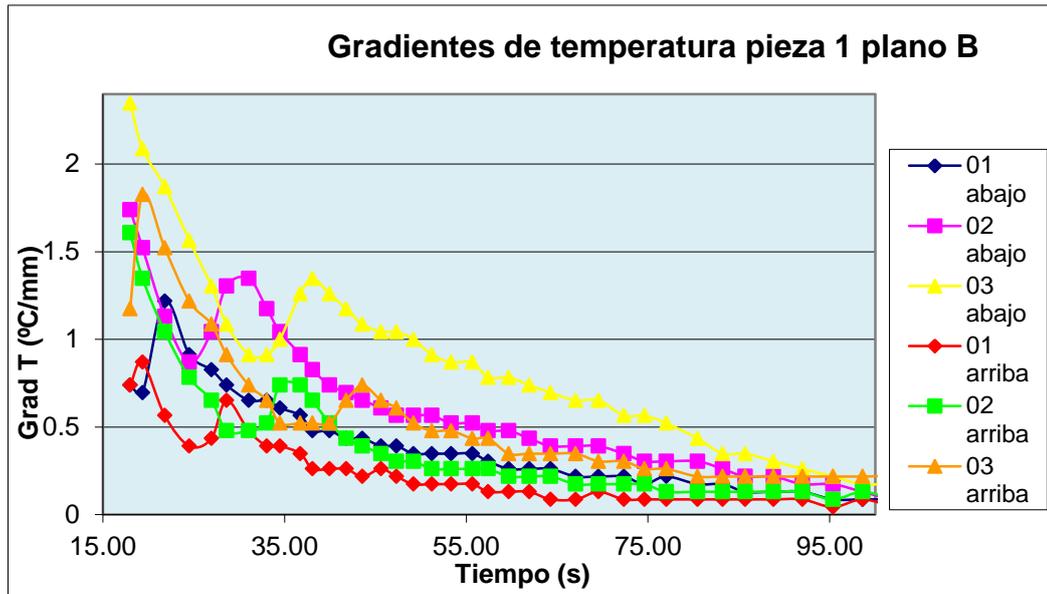


Figura 8.10 Gráfica en la que se comparan los gradientes de temperatura en la zona de arriba y la de abajo del inserto.

Entre los métodos empleados para reducir el gradiente generado por la diferencia de temperaturas entre el material fundido y el inserto se destacan los siguientes:

- Disminución de la velocidad de enfriamiento: con una relación de masa entre inserto y pieza más favorable para la pieza y menos superficie de contacto, y/o con un material menos conductor, y/o utilizar recubrimientos también poco conductores.
- Emplear insertos con una superficie irregular (ranuras, moleteado, fundición en molde de arena gruesa, blasting) con objeto de restringir la contracción del aluminio.

Para la primera opción se ha contactado con una empresa especializada en la protección mediante pinturas para mejorar la interacción inserto-fundición.

En el caso de la segunda opción, se adoptará la misma tendencia que en el caso de camisas para bloques motor de aluminio (bibliografía [11] y [21]). Esta tendencia consiste en buscar la rugosidad de la superficie del inserto como se puede ver en la Figura 8.11. Emplear insertos con una superficie irregular (ranuras, moleteado, fundición en molde de arena gruesa, blasting) nos permite restringir la contracción del aluminio al crear múltiples direcciones de contracción impidiendo la aparición del defecto.



Figura 8.11 Diferentes geometrías de insertos sugeridas para implementar el agarre del metal fundido.

De esta manera en los últimos ensayos tendremos:

- Insertos pintados.
- Insertos moleteados.

Los resultados obtenidos en el primer caso (Figura 8.12) vemos que puede existir cierta mejora respecto al defecto localizado obtenido en anteriores experimentos, aunque la naturaleza desmoldeante que tiene la pintura empleada hace que desechemos la solución debido a su falta de apriete.



Figura 8.12 Pieza obtenida mediante la aplicación de pintura sobre el inserto.

Por otra parte el empleo de un moleteado sobre el inserto consigue hacer desaparecer del todo los defectos en las cuatro piezas ensayadas, por lo que será tomado como la solución de este proyecto. Véase Figura 8.13. En esta imagen se puede apreciar como la superficie de la pieza en contacto con el inserto aparece totalmente libre de defectos, además cabe destacar la dificultad encontrada a la hora de separar el casquillo de la matriz alumínica.



Figura 8.13 *Imágenes que muestran una de las cuatro piezas sanas obtenidas con el empleo de insertos moleteados.*

Como conclusión, se ha encontrado la manera de fabricar una pieza fundida de aluminio con inserto de acero co-fundido sana.

Aparece tras este trabajo una línea de investigación futura relacionada con el aspecto superficial del inserto de acero.

9 VALIDACIÓN FUNCIONALIDAD COMPONENTE

El diseño de la geometría de la mangueta que se está usando como referencia para este desarrollo ha tenido en cuenta que sea un elemento funcional, es decir, que resista las cargas específicas para este componente. Sin embargo, para que su funcionalidad quede validada, hay que asegurar que el inserto permanece en su posición y soporta los esfuerzos sin desprenderse de la matriz de aluminio durante su ciclo de vida.

En el caso normalizado de montaje de insertos sobre componente de aluminio, las fuerzas con las que debe colocarse el inserto vienen dadas por el fabricante. De hecho es un parámetro de referencia de la calidad del componente fundido, puesto que existe un registro de estas fuerzas de inserción que debe estar dentro de los límites marcados por el cliente, el montador de la pieza que puede ser el OEM final.

Para conocer si el desarrollo llevado a cabo en este trabajo es capaz de sustituir el proceso tradicional de inserción, lo que se ha realizado es un ensayo de push-out, extracción, donde la fuerza de extracción debe ser mayor que la fuerza de inserción que el cliente exige en el caso del montaje tradicional.

9.1 Montaje experimentación push-out

La geometría a ensayar será el componente fundido con el inserto de acero co-fundido. Se muestra en la Figura 9.1 varias de estas referencias:

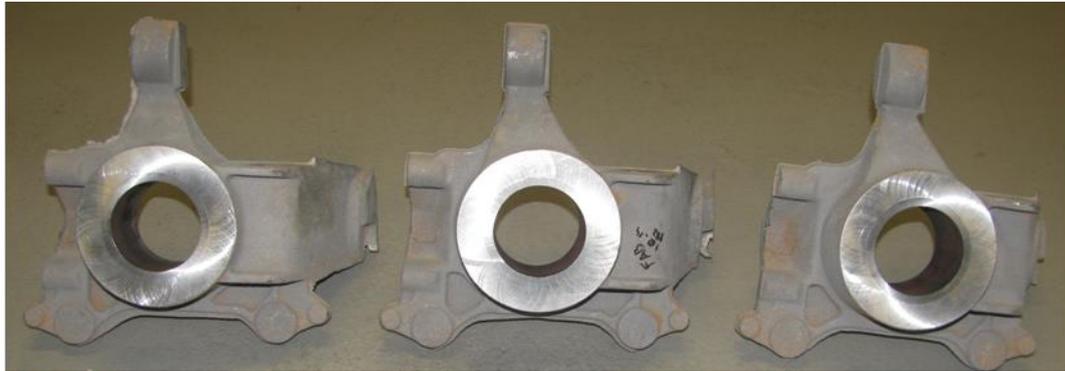


Figura 9.1 La imagen muestra tres piezas con el inserto de acero sobre las que se va a ensayar.

En todas ellas se aprecia cómo se ha mecanizado el asiento sobre el que se colocará el utillaje para la extracción. Se trata de asegurar que toda la carga se aplicará de forma normal a la superficie, y que no habrá ningún esfuerzo tangencial que modifique el resultado de las pruebas dando valores erróneos.

El utillaje utilizado para el ensayo se observa en la Figura 9.2:



Figura 9.2 Utillaje para la extracción empleado en el ensayo de push out

Sobre el plato de mayor diámetro (Figura 9.2 plato de la izquierda) se colocará el componente, según aparece mostrado en la Figura 9.3 y el plato de menor diámetro (Figura 9.2 plato de la derecha) será con el que se ejerza la fuerza normal para proceder a la extracción del inserto, tal y como se aprecia en la Figura 9.4.



Figura 9.3 Montaje de la pieza a ensayar sobre el plato de mayor diámetro.



Figura 9.4 Se puede ver sobre la pieza el elemento mediante el cual se realizará la fuerza normal de extracción.

9.2 Resultados ensayos push-out

Las pruebas de extracción se realizaron en una prensa con capacidad para ensayos de hasta 150kN. Puesto que la fuerza de inserción para este tipo de aplicaciones solicitada por cliente ronda los 40kN, se pensó que sería adecuada para este tipo de experimentación.

Se han graficado tres resultados de los ensayos realizados y tal y como se puede ver en la Figura 9.4. la fuerza aplicada llega hasta el límite de la máquina de ensayo y no se registra ningún desplazamiento del inserto. Es decir, la fuerza de extracción de este elemento es superior a 150kN, muy por encima del límite de 40kN exigido.

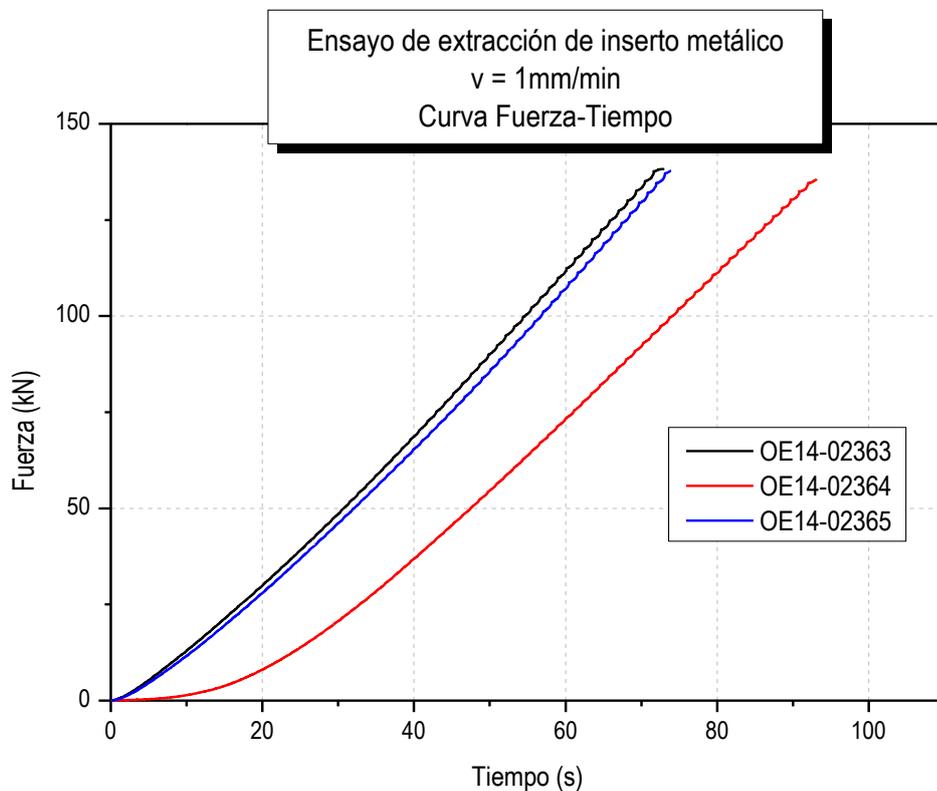


Figura 9.5 Gráfica que muestra las curvas de relación entre la fuerza ejercida por la máquina de ensayo y el tiempo para las tres piezas ensayadas.

Por lo tanto puede concluirse diciendo que la fuerza de apriete generada por la contracción térmica que se produce en el aluminio rodeando al inserto de acero, es suficiente para asegurar la funcionalidad de la unión de estos elementos.

10 CONCLUSIONES

10.1 Definición geometría inserto

Tras finalizar el trabajo, se puede concluir que hemos encontrado una geometría óptima para dar respuesta a las necesidades de la industria consiguiendo además una buena inserción de este en la matriz de aluminio durante la colada.

La geometría finalmente seleccionada ha sido un cilindro para dar solución a los alojamientos de ejes, cojinetes de manera que el acero, más resistente al desgaste y a la fatiga, sea el que entre en contacto con dichos elementos. Además en la superficie exterior, que será la que en la fundición se una al aluminio se ha seleccionado dar un tratamiento de moleteado para que el aluminio fundido pueda agarrarse mejor al acero evitando así la aparición de defectos.

10.2 Desarrollo colada y proceso fundición

El proceso de co-fusión ha sido adaptado para poder ser fabricado con la tecnología EPGS descrita en el trabajo. Para conseguir finalmente una pieza híbrida se han añadido unas nuevas etapas al proceso en las cuales se preparará el inserto a introducir precalentándolo para inmediatamente después ejercer su colocación dentro del molde de arena. Seguidamente, para minimizar la espera del inserto en el molde, se llena con el aluminio fundido que acabará envolviendo al inserto y quedando unida a él tras el desmoldeo.

10.3 Comportamiento del conjunto durante el TT

Ya ha sido comentada la problemática que podía existir en el conjunto a la hora de aplicar el tratamiento térmico puesto que el coeficiente de dilatación térmico del aluminio es mayor que el del acero, esto hace que en el tratamiento térmico el aluminio dilate más y el inserto pueda desplazarse y quedar en una posición incorrecta al volver a la temperatura ambiente. Pero como ha quedado demostrado se han establecido también las directrices

para conseguir diseñar un ranurado en la superficie externa del inserto que asegure su posición durante la etapa de tratamiento térmico.

10.4 Resistencia a la corrosión

Podemos concluir que la solución creada en este trabajo puede aportar un comportamiento mejor o similar al existente en uniones no obtenidas a través del apriete en la colada. De esta manera se puede afirmar que la corrosión galvánica del aluminio en contacto con el acero no supondrá un problema para la vida útil de las piezas fabricadas con este sistema.

10.5 Funcionalidad mecánica

La funcionalidad de la pieza queda confirmada a través de los ensayos de push out, puesto que en ellos se alcanza el máximo de la fuerza que puede alcanzar la máquina de ensayo, límite muy por encima de lo que se exige en los montajes, sin observar ningún desplazamiento del inserto respecto de la matriz de aluminio. Por lo tanto, podemos concluir que la pieza final obtenida es apta para su puesta en funcionamiento sin riesgo de que el inserto se suelte o desplace durante su puesta en carga.

11 LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se buscan otros métodos alternativos en busca de la unión entre la fundición de aluminio y el inserto de acero, los cuales no han podido ser estudiados a fondo en el presente trabajo.

Se han destacado los métodos en los cuales se pretende lograr la unión a través de la creación de compuestos intermetálicos entre el aluminio y el acero. Existen estudios en los cuales se ha referenciado, están recogidos en la bibliografía como [18], [19] y [20].

En ellos lo que se busca es lograr que los átomos metálicos se difundan en ambas matrices metálicas creando en la zona de unión, compuestos intermetálicos. Se dice que con esta unión se logra mayor resistencia que la obtenida en la unión mecánica en los ensayos de extracción, en los cuales se mide el agarre que ejerce la matriz de aluminio sobre el inserto de acero, obteniendo además una continuidad metálica que permite mejorar la transferencia térmica entre ambos metales. Además es inevitable que en el agarre por contracción exista una fina rendija de aire entre ambos metales por la falta de una combinación metálica, por ello se mejoraría la transmisión de calor en construcciones que lo requieran, como pueden ser los bloques motores con insertos en los cilindros.

Lo que se busca en estas uniones, es conseguir la difusión atómica al evitar que el contacto de aluminio fundido se produzca con la capa de óxido existente sobre el acero, puesto que es altamente pasiva y no reacciona.

Por otra parte también existe la preocupación por crear excesivos compuestos intermetálicos porque fragilizarían la unión.

A continuación se estudian las posibles opciones encontradas más detalladamente.

11.1 Capa de cinc sobre el inserto de acero

La base de este procedimiento consiste en evitar la formación de la capa de óxido sobre el acero puesto que dicha capa impediría la interdifusión de los átomos. Las imágenes y datos aquí expuestos han sido observadas en el artículo referenciado como [18] en la bibliografía.

Para ello, lo primero que se debe hacer es limpiar bien la superficie del inserto de acero que vaya a entrar en contacto con el aluminio. Después se realizará un decapado para limpiar las impurezas que puedan quedar y eliminar el óxido existente en la superficie. Inmediatamente seguido a realizar estos tratamientos, se debe sumergir el inserto en un baño de cinc, quedando este impregnado sobre el acero.

Esta capa de cinc adherida en la superficie evitará la reconstrucción del óxido de hierro. De esta manera mejorará la unión por difusión entre el acero del inserto y la matriz de aluminio.

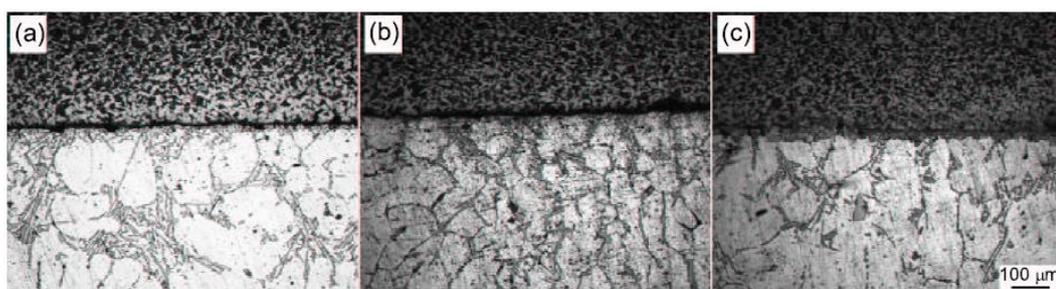


Figura 11.1. a) y b) Uniones pobres entre el aluminio y el inserto de acero sin tratar y granallado respectivamente. c) Buena unión entre el aluminio y el inserto de acero con una capa superficial de cinc.

Como puede observarse en la Figura 11.1 a medida que tratamos superficialmente el inserto, se va consiguiendo una mayor difusión de átomos entre ambos metales. En la imagen a) se puede ver como en un inserto sin tratar apenas se relacionan ambos metales, en la imagen b) en la cual el acero ha sido granallado previamente se observa como empieza a crecer la interfase aunque la difusión aún es débil y ya la tercera imagen muestra como cuando se realiza el procedimiento anteriormente explicado en el que se consigue adherir una capa de cinc sobre el inserto, se consigue una unión metálica entre los dos metales debido a la acción del cinc favoreciendo la interdifusión atómica.

Además este artículo incluye experimentos de extracción del inserto en los que se demuestra que este procedimiento mejora la resistencia de la unión entre ambos metales respecto a las pruebas de emplear un inserto sin tratamiento previo o granallado.

11.2 Proceso Al-Fin

El procedimiento Al-Fin pretende evitar las deficiencias mecánicas y térmicas mencionadas anteriormente en las uniones de acero con aluminio fundido.

Se logra una unión por fusión, al originarse una zona de difusión.

Para ejecutar el proceso Al-Fin se sumergen las piezas de acero a insertar, bien limpias y desengrasadas, en un caldo de aluminio puro o aluminio-silicio, hasta conseguir el espesor de capa deseado.

Una vez extraídas las piezas del baño, se introducen los insertos en su posición final tan rápidamente como sea posible y se vierte la fundición de aluminio en el molde.

La composición de la capa intermetálica creada corresponderá, al sumergirla en aluminio puro, a la de la fase intermetálica Fe_2Al_5 . En las aleaciones su constitución será más complicada.

Este procedimiento se adapta especialmente bien para la fundición en coquilla pero puede utilizarse también en fundición en arena o inyectada.

Se ha mostrado que este método puede ser muy útil en la construcción de motores, debido a que la transmisión de calor no se perturba a causa de la capa Al-Fin.

12 ESTUDIO ECONÓMICO

Uno de los aspectos fundamentales en la realización de cualquier proyecto, es la determinación del coste del mismo, ya que es lo que marca la viabilidad.

Para realizar este cálculo se deben tener en cuenta varios tipos de costes:

- Costes directos
- Costes indirectos

A continuación se procederá a definir la procedencia de los diferentes gastos y al cálculo del coste económico que suponen cada uno de ellos para poder obtener finalmente el coste total del presente trabajo.

12.1 Costes directos

Se pueden asignar directamente a un producto son fácilmente evaluables, suponen la mayor aportación al coste total. Se subdividen en:

- **Costes de personal:** coste del número de horas del personal implicado en la realización del proyecto. Con dicho número de horas y el coste horario correspondiente se evalúa el coste de la dedicación.
- **Costes de amortización de equipos y programas:** los equipos, generalmente, se emplean en varios proyectos simultáneamente por lo que ha de repartirse la inversión inicial total entre todos ellos. De este modo en este apartado se imputa la amortización de las instalaciones y equipos durante el tiempo que han sido empleado.
- **Costes de material:** abarcan los costes de materias primas empleadas, materiales fungibles, documentación y cualquier otro tipo de material que revierta de forma directa en el resultado final.

12.2 Costes indirectos

Son aquellos costes que afectan al proceso productivo en general de uno o más productos, por lo que no se puede asignar directamente a un solo producto sin usar algún criterio de asignación.

No contribuyen en gran medida al coste total, incluyen conceptos tales como:

- Consumo eléctrico
- Iluminación
- Teléfono
- Climatización
- Servicios de limpieza
- Personal administrativo
- Colaboraciones externas

12.3 Cálculo de los costes totales

12.3.1 Cálculo costes directos

- **Costes de Personal**

En la realización de este trabajo se ha necesitado de la intervención de un ingeniero y ha sido necesaria la colaboración de un técnico de taller.

- Días de trabajo: 221 días al año.
- Jornada laboral: 8 horas.

Horas de trabajo anuales = 8 horas/día · 200 días/año = 1768 horas/año

A continuación se calcula el coste por hora que supone cada miembro del personal que ha intervenido en el proyecto, para ello, se tiene en cuenta que el saldo anual de un ingeniero es de 33.050 €, y el de un técnico de taller asciende a 14.900 €. El ingeniero cotiza un 4.9% a la Seguridad Social y un 9% a la Hacienda Pública.

La empresa paga a la Seguridad Social un 3.2% de la base reguladora que para el ingeniero es de 37.000 €. Con todo esto, los costes por hora resultarán ser los expuestos en la Tabla 12.1 y la Tabla 12.2.

Sueldo bruto (euros/año)	Seguridad Social (euros/año)	Costes totales (euros/año)	Coste horario (euros/año)
33.050	11.840	44.890	25,50

Tabla 12.1. Coste horario del trabajo de un ingeniero.

Sueldo bruto (euros/año)	Seguridad Social (euros/año)	Costes totales (euros/año)	Coste horario (euros/año)
14.900	6.310	21.210	12,05

Tabla 12.2. Coste horario del trabajo de un técnico de taller.

En la Tabla 12.3 se muestra cómo están distribuidas las horas de trabajo del personal involucrado en el proyecto:

Personal	TAREAS	HORAS
Ingeniero	Análisis de la información	300
	Simulación	100
	Planteamiento de ensayos	200
	Análisis de ensayos	50
	Realización de informes	250
	TOTAL	900
Técnico de taller	Preparación de ensayos	100
	Ejecución de ensayos	50
	TOTAL	150

Tabla 12.3 Muestra la distribución de las horas trabajadas por el ingeniero.

Con la información de las tres tablas anteriores se calcula el coste de cada trabajador expresado en la Tabla 12.4.

Personal	Horas totales	Coste horario (Euros)	Coste de personal (Euros)
Ingeniero	900	25,50	22950
Técnico taller	150	12,05	1807,5
COSTES DIRECTOS DE PERSONAL			24757,5

Tabla 12.4 Cálculo de los costes individuales de cada empleado y la suma del total.

- **Costes derivados de la amortización de equipos y programas**

Para calcular estos costes se considera la inversión inicial realizada y se determina la amortización lineal de dicha inversión. En primer lugar se debe calcular el importe bruto del inmovilizado y aplicar el porcentaje

correspondiente según el tipo de inmovilizado. Hecho esto, se determina el coste horario, que también dependerá del tipo de equipo ya que el tiempo durante el que trabajan los equipos no siempre es el mismo. Una vez aplicados los coeficientes correspondientes se calcula el coste de amortización de cada equipo y software empleados en el proyecto y se obtiene la suma del coste total.

➤ Equipos informáticos

Se supone que estos equipos están funcionando durante el año el mismo tiempo que lo hacen las personas, como anteriormente se estimó. Como consideramos jornadas laborales de ocho horas, los equipos informáticos en general se encuentran funcionando 1.768 horas al año. La vida útil de los ordenadores personales e impresoras es de 3 años, por lo que la tasa de amortización lineal es de un 33.33% cada año.

El equipo informático empleado en el desarrollo del proyecto es el siguiente:

PC Packard Bell intel core i5 2.3 GHz, 4 GB RAM, 64 bits, pantalla HD LED 15.6", con teclado y ratón.

Por otro lado lugar tendremos diferentes equipos informáticos a los anteriores, que por lo general, el tiempo que pueden estar funcionando es mayor, ya que funcionan también fuera del horario laboral y de una manera continua, por lo que habrá que hacer una estimación del número de horas de funcionamiento al año. Para ello, se asumirá que el funcionamiento es de una media de 18 horas al día durante 247 días al año (descontando sólo los días de vacaciones y festivos), por lo que el total estimado al año será de 4.446 horas.

El equipo de estas características empleado en este proyecto es una Work Station, con 8 procesadores i7-2600k, 3.40 GHz, 16 GB RAM y con monitor LG de alta resolución, teclado y ratón.

En la Tabla 12.5 se muestran los costes individuales de cada uno de los equipos informáticos empleados:

Equipo	Coste bruto (euros)	Amort. anual (euros)	Horas trabajo anual	Coste horario (euros/hora)	Horas empleo equipo	Coste total (euros)
PC PB	599	199,67	1.768	0,11	900	101,64
Work Station	2.400	800	4.446	0,18	100	18
COSTE DE AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS						119,64

Tabla 12.5 Cálculo del coste de amortización de los equipos empleados en el trabajo.

➤ Equipos de fabricación

Estos equipos trabajan durante el año de manera continuada puesto que la interrupción de su trabajo sería mucho más costosa, por lo tanto tienen una jornada de 24 horas por día y sólo se paran en vacaciones, se asumirá un funcionamiento de 325 días al año. Tienen una vida útil de 15-20 años. Los equipos empleados son los siguientes:

- Arenería
- Disamatic
- Horno de fusión
- Bomba electromagnética
- Máquina desmoldeadora
- Horno de tratamiento térmico

En la Tabla 12.6 se detallará el camino seguido para poder obtener los costes directos derivados de los equipos mencionados.

Equipo	Coste bruto (euros)	Amort. anual (euros)	Horas trabajo anual	Coste horario (euros/hora)	Horas empleo equipo	Coste total (euros)
Arenería	2472710	164847,33	7800	21,13	5	105,67
Disamatic	1715749	114383,27	7800	14,66	5	73,32
Horno de fusión	1335842	89056,13	7800	11,42	5	57,09
Bomba	265471	17698,07	7800	2,27	5	11,34
Máquina desmold.	448666	29911,07	7800	3,83	5	19,17
Horno TT	685424	45694,93	7800	5,86	100	585,83
COSTE DE AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS						852,42

Tabla 12.6 Cálculo de los costes de la amortización de los equipos de fabricación.

➤ Software

Los paquetes informáticos empleados son los siguientes:

- Windows NT 4.0
- Microsoft Office
- MAGMAsoft

Para calcular el coste horario de Windows NT y de Microsoft Office se considerarán 1768 horas de trabajo anuales, ya que operan en PC convencional, MAGMAsoft utiliza un PC que funciona 4446 horas anuales.

Las amortizaciones de los programas se calculan para tres años de forma lineal, así que la amortización será del 33,33%. A continuación se muestra la

Tabla 12.7 con los costes directos derivados de la amortización de los programas y el coste total.

Software	Coste bruto (euros)	Amort. anual (euros)	Horas trabajo anual	Coste horario (euros/hora)	Horas de empleo del equipo	Coste total (euros)
Windows	90	30	1.768	0,017	800	13,6
Office	451	150	1.768	0,085	700	59,5
MAGMASoft	30.000	10.000	4.446	2,25	100	225
COSTE AMORTIZACIÓN PROGRAMAS						298,1

Tabla 12.7 Cálculo de la amortización de los software empleados.

Tras realizar todos estos cálculos se obtienen los siguientes costes directos derivados de la amortización de equipos y programas:

COSTES DIRECTOS DERIVADOS DE LA AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROGRAMAS = 1270,16 €

- **Costes directos de material**

Aquí se contabilizan los materiales necesarios para la realización del proyecto, en este caso, se ha utilizado:

- Material de oficina cuyo coste asciende a **150 €**
- Aluminio y acero cuyo precio se desarrolla a continuación

El aluminio empleado en las piezas es aleación A365 la cual tiene un precio de 1500 € /tonelada. En este trabajo se fabrican 36 piezas las cuales tienen un peso en aluminio de 28,4 kg cada una (contando mazarotas y demás partes a retirar para obtener la pieza final). Con estos datos podemos conocer el gasto en aluminio:

$$\text{Coste aluminio} = 1,5 \text{ € /kg} \times 28,4\text{kg/pieza} \times 36 \text{ piezas} = \mathbf{1533,6 \text{ €}}$$

El coste de las barras de acero obtenidas para su utilización como insertos ascendió a **100,10 €**.

Por lo tanto ya podemos calcular el coste total de los materiales empleados:

COSTES DIRECTOS DERIVADOS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS
= 1783,7 €

12.3.2 CÁLCULO DE LOS COSTES INDIRECTOS

En este apartado se incluyen los gastos producidos durante la realización del proyecto que no pueden ser incluidos en ninguno de los apartados anteriores. En la práctica, la frontera entre los costes directos e indirectos no está muy definida. En este caso se incluyen los siguientes gastos dentro de la Tabla 12.8.

Concepto	Coste (euros)
Gastos administrativos y de mantenimiento	3110
Gastos energéticos	2343

Tabla 12.8 Recoge los gastos indirectos.

TOTAL COSTES INDIRECTOS = 5453 €

12.4 Costes totales

El coste total del proyecto se calcula sumando los costes obtenidos en los apartados anteriores, esto viene recogido en la .

COSTES DIRECTOS	27811,36 €
Personal	24757,5 €
Amortizaciones	1270,16 €
Materiales	1783,7 €
COSTES INDIRECTOS	5453 €
COSTES TOTALES	33264,36 €

Con lo que el coste total del proyecto es de treinta y tres mil doscientos sesenta y cuatro con treinta y seis euros.

13 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Alcalde de la Cuesta, M.E: (2003). Proyecto fin de carrera: Optimización de las prestaciones mecánicas y la productividad en piezas fundidas de aluminio mediante la utilización de simulación por ordenador. Universidad de Valladolid.
- [2]. Losúa, D. (2007). Proyecto fin de carrera. *Nuevos conceptos para el diseño de procesos de fundición de aluminio en molde de arena*. Universidad de Valladolid.
- [3]. Rivas, J.A. (2010). Proyecto fin de carrera. *Desarrollo de nuevos modelos de simulación para la predicción del defecto de sopladura producido por los machos de arena en procesos de fundición*. Universidad de Valladolid.
- [4]. Beeley, P. (2001). *Foundry Technology. Second Edition*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- [5]. Polmear, I.J. (1995). *Light Alloys: Metallurgy of the light metals. Third edition*. London: ARNOLD.
- [6]. Cuesta, R.; Rivas, A.; Juárez, J.P.; Mozo, D.; Cano, L.E.; del Amo, O. (2007). *El Proceso EPGS: Desarrollo y Aplicación*. Valladolid: Fundación Cidaut para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía.
- [7]. Davis, J.R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. Ohio,USA: ASM International.
- [8]. Otero, E. (2001). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid: Editorial Síntesis.
- [9]. Galvete, J.R. (2001). *Corrosión bajo tensión. Estudio actual del conocimiento*. Anales de mecánica de la fractura. Volumen 18.
- [10]. U.S.A. Department of transportation. (2012). *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe*. Capítulo 6.
- [11]. Yamagata, H. (2005). *The science and technology of materials in automotive engines*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- [12]. Campbell, J (2004) *Castings practice: The ten rules of castings*. Oxford: Elsevier.
- [13]. Campbell, J.; Harding, R.A.(1994) *Solidification defects in casting*. University of Birmingham: EAA-European Aluminum Association
- [14]. Davis, J.R. (1999). *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. Ohio, USA: ASM International.
- [15]. Arlt, N.; Burkert, A.; Isecke, B. (2011). *El acero inoxidable en contacto con otros materiales metálicos*. Bruselas: Euro Inox.

- [16]. De Souza, K.M. (2004). *ASTM Prohesion Test Predicts Service Performance of Prepainted Steel Sheer*. Galvatech '04 Conference, Chicago.
- [17]. ASTM STANDARDS (1997). *Metal Test Methods and Analytical Procedures*. Volume 03.02 *Wear and Erosion; Metal Corrosion*. Easton, Estados Unidos: ASTM.
- [18]. Choe, K.H.; Park, K.S.; Kang, B.H.; Cho, G.S.; Kim, K.Y.; Lee, K.W.; Kim, M.H.; Ikenaga, A.; Koroyasu, S.(2008) *Study of the Interface between Steel Insert and Aluminum Casting in EPC*. Japón: J.Mater. Sci. Technol., Vol.24 No.1.
- [19]. Springer, H.; Kostka, A.; Payton, E.J.; Raabe, D.; Kaysser-Pyzalla, A.; Eggeler, G. (2010). *On the formation and growth of intermetallics phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminium alloys*. Alemania: Acta Materialia.
- [20]. Hufnagel, W. (1992). *Manual del aluminio*. Segunda edición. Barcelona: REVERTÉ.
- [21]. <http://www.afsinc.org/about/content.cfm?ItemNumber=10454>
- [22]. <http://dwolsten.tripod.com/articles/jan96a.html>

