CAPITULO 1

INTRODUCCION

El aluminio se obtiene de la bauxita por medio de reducción electrolítica, término que implica la remoción de los átomos de oxígeno del óxido de aluminio (Al_2O_3), la alúmina calcinada se reduce a aluminio metálico en celdas electrolíticas o baños electrolíticos en serie conectados a una fuente de corriente directa. Las fundiciones de aluminio llegaron a ser económicamente accesibles sólo después de la invención del proceso de refinación Hall-Heroult. Después de la II guerra mundial, nuevas aleaciones y procesos de vaciado fueron desarrollados para cumplir con las especificaciones de ingeniería. La creciente crisis energética ha impulsado el uso de las fundiciones de aluminio en muchos vehículos por su excelente relación resistencia-peso [1].

La industria automotriz es uno de los sectores más importantes en la industria moderna. Los países con una gran industria manufacturera automotriz contribuyen con una porción muy grande en el PIB (Producto Interno Bruto). Lo anterior, aunado al masivo uso de este sistema individual de transporte, ha provocado que este sector se convierta en un factor económico importante [2].

La industria automotriz es causante de tres problemas ambientales originados por sus productos.

1. Consumo de energía
2. Contaminación ambiental, especialmente del aire.
3. Disposición de vehículos usados.

El aluminio es un metal fuerte (aleado y con tratamiento térmico), se usa extensivamente en vehículos utilitarios y de todo terreno. El aluminio absorbe la energía cinética que lleva el vehículo, en un impacto que involucre un vehículo con estructura de aluminio, una alta proporción del impacto es absorbido por la estructura y no por los ocupantes como en los vehículos con estructuras de acero [3]. Se estima que el 90 % de los tracto-camiones y autobuses tienen estructuras de aluminio, los componentes de aluminio pueden recortar 1800 kg del peso de un tracto-camión y esto se refleja en que puede llevar más carga sin exceder los límites de peso. En vehículos comerciales pequeños, las estructuras de aluminio pueden pesar 45% menos que las estructuras de acero, por lo tanto pueden ser ensamblados en un chasis más pequeño. Los vagones más modernos que utiliza el metro y trenes de carga están hechos de aluminio [4]. Los transbordadores utilizados en Europa que alcanzan velocidades de 35-50 nudos son construidos con aluminio y se consideran como un transporte rápido y revolucionario en rutas cortas sobre el mar [5]. En un estudio se demostró que por cada kilogramo de aluminio que reemplace a otro de un metal más pesado, se tendrá un ahorro de 20 kg de CO_2. Este reemplazo puede llegar a ahorrar hasta 2.5 toneladas métricas de CO_2 lo cual representa un ahorro de 878 l de gasolina, en un vehículo con 125 kg de aluminio que hayan reemplazado a un material de mayor peso, por lo tanto el ahorro en gasolina será mayor y el impacto ecológico será menor [3].

En la Tabla 1.1 se puede ver la cantidad de aluminio que se utiliza en los autos europeos [2].

Tabla 1.1 Relación del porcentaje utilizado de aluminio en diferentes aplicaciones automotrices.

	Proporción		Aleaciones	
Componentes	%	kg	Vaciadas (%)	Trabajadas (%)
Chasis / Suspension	30	20	95	5
Motor/Dirección	46	30	90	10
Estructura	16	10	60	40
Accesorios	8	5	60	40
Total	100	65	85	15

Las ventajas de usar aluminio han permitido el incremento de este metal en los vehículos comerciales, presentando las siguientes ventajas:

1. El bajo peso del vehículo, provee una capacidad de carga mayor o un consumo más bajo de combustible.
2. Lo anterior conduce a una reducción en el impacto ecológico.
3. La resistencia a la corrosión da una vida de servicio mayor, aunado con la reducción de los costos de reparación y mantenimiento.
4. La excelente formabilidad del aluminio hace posible un amplio uso de diseños multifuncionales.

Los grandes esfuerzos que se generan entre los componentes de los motores de combustión interna obligan a un diseño, tanto de los componentes como de los materiales, que satisfaga los índices de calidad, rendimiento y operación. En el caso particular de las camisas de los cilindros del motor, las cuales tradicionalmente han sido manufacturadas con aleaciones ferrosas (hierros y aceros), el reto de un nuevo diseño que incluya aleaciones de aluminio reforzadas con partículas duras dispersas, debe satisfacer una alta resistencia mecánica, alta resistencia al desgaste, estabilidad dimensional, alta conductividad térmica, resistencia a la corrosión debido a los gases del producto de la combustión, bajo peso, costo competitivo y una alta resistencia adhesiva

entre la camisa misma y la aleación base. Hasta ahora las aleaciones de aluminio-silicio hipereutécticas obtenidas por el proceso de aspersión de metal líquido han mostrado un gran potencial para satisfacer estos requerimiento [2]

1.1 Objetivo

El objetivo de la presente tesis es determinar la resistencia al deslizamiento entre camisas de aluminio reforzado y la aleación de aluminio base utilizada en la manufactura de motores de combustión interna.

1.2 Hipótesis

El presente trabajo plantea dos hipótesis. La resistencia al deslizamiento varía en función del valor promedio de rugosidad de la superficie exterior de la camisa. La resistencia al deslizamiento varia en función del recubrimiento aplicado (carbón) a la superficie exterior de la camisa.

1.3 Metodología

Se utilizarán camisas fabricadas con una aleación hipereutéctica de Al-Si fabricadas por el proceso de aspersión de metal líquido. Se acondicionará la superficie externa de las camisas con diferentes tipos de acabado superficial a fin de obtener diferentes niveles de rugosidad promedio Ra. Se caracterizará la rugosidad de las superficies obtenidas por medio de un perfilómetro mecánico. Se utilizará el parámetro Ra que es una medida de la rugosidad promedio de una superficie. Se acondicionará la superficie por medio de un recubrimiento de grafito amorfo por ahumado. Se construirá un modelo donde se obtendrán pruebas vaciadas de la aleación base con las camisas de aluminio integradas, simulando un monoblock. De las pruebas anteriores, se obtendrán probetas o rodajas de secciones transversales. Las probetas o rodajas asi obtenidas se ensayaran en una máquina universal de pruebas mecánicas. Para lo anterior se construirá un sistema de

matriz y punzón que permite ejercer una fuerza de deslizamiento entre camisa y la aleación base. Los resultados a obtener serán curvas de fuerza aplicada contra desplazamiento. Los resultados obtenidos serán analizados a fin de encontrar relaciones entre la resistencia al deslizamiento y los diferentes parámetros de prueba.

1.4 Limitaciones

El presente trabajo se enfoca en el uso de camisas de aleación de Al-Si, con elementos aleantes de Cu y Mg. No se considera trabajar con otro tipo de aleación. Así mismo, este trabajo se limita al uso de una aleación en particular para el monoblock. Los parámetros superficiales de prueba se concentran en rugosidad superficial promedio Ra y en el recubrimiento con grafito, se optó por este recubrimiento porque es el que se utiliza como procedimiento estándar en el vaciado de monoblocks automotrices. No se contemplan otro tipo de recubrimientos ya que no es de interés para la industria automotriz. Se determinó que el parámetro de rugosidad Ra es el más indicado por representar una escala de trabajo donde operan los principales esfuerzos cizallantes.

CAPITULO 2

ALEACIONES DE ALUMINIO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

2.1 Introducción.

Los desarrollos tecnológicos en la industria automotriz, aeroespacial, ferrocarrilera y en otros campos como la ingeniería mecánica y artículos deportivos han creado recientemente una demanda para disminuir el peso de sus productos [1]. En los sistemas de transporte es necesario disminuir el peso, ya que ésto se ve reflejado en una disminución de combustible, pero al mismo tiempo también para poder mover más carga con la misma potencia. En general, el principio a alcanzar es el mejorar el desempeño del producto ya sea en la industria automotriz, o en cualquier otra. El aluminio juega un papel muy importante debido a que alcanza propiedades deseables para remplazar al acero, ya que el aluminio aleado es un metal fuerte, ligero y durable. En una sociedad conciente del ahorro de energía estas tres propiedades básicas hacen del aluminio el

metal preferido, para la disminución de peso, reducir el consumo de combustible e incrementar la eficiencia [7].

Los requerimientos esperados para las nuevas aleaciones de aluminio pueden ser formulados como [8]:

- Alta resistencia, mayor a 750 MPa en combinación con una buena resistencia a la fractura.
- Resistencia excepcional a altas temperaturas. Las temperaturas de servicio pueden ser mayores a 400°C.
- Alta rigidez.
- Resistencia al desgaste.
- Coeficiente de expansión térmico compatible con otras aleaciones.
- Buenas conductividades eléctricas y térmicas.
- Buena formabilidad en procesos de manufactura convencionales.
- Metal 100% reciclable, la prueba está en las latas de aluminio, en las cuales al reciclar 1kg de Al se puede ahorrar cerca de 8 kg de bauxita y 14 kilowatts-hr. de electricidad [9].

Cuando la resistencia aumenta, la elongación tiende a disminuir. Una combinación óptima de estas dos propiedades es importante en estructuras que deben ser diseñadas para absorber una máxima cantidad de energía en caso de colisión. Este parámetro combinado es la tenacidad de ruptura. La habilidad de un componente a absorber energía depende de dos cosas, de su forma y de las propiedades del material. La forma determina como se va a deformar, mientras que la resistencia del material determina el nivel de esfuerzo de la deformación y la componente de absorción de energía. Debido a estas características, el aluminio es un excelente material para la fabricación de defensas, chasises, etc. Todas estas aplicaciones se facilitan con la extrusión, la cual permite fabricar formas ilimitadas. Se han hecho pruebas de impacto y se ha demostrado que una defensa de aluminio puede absorber un 50% más que la misma defensa fabricada en acero. En las aplicaciones antes mencionadas usualmente se tienen que soldar en dos o más partes, teniendo que utilizar soldadura incrementando el

peso, pero estos problemas de unión se pueden eliminar al usar piezas extruidas de aluminio de una sola pieza [2].

2.2 Aleaciones de aluminio para fundición.

Estas aleaciones se encuentran estandarizadas por diferentes organismos [10]. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, las aleaciones de aluminio se agrupan de acuerdo a los límites de composición registrados por The Aluminium Association. Las agencias gubernamentales (militares, federales y otras), tienen sus propias especificaciones, de igual forma lo hacen las sociedades técnicas como The American Society for Testing and Materials (ASTM) y The Society of Automotive Engineers (SAE).

En términos de composición química, "The Aluminium Association" presenta los grupos de aleación de la siguiente manera:

1xx.x (99.0% de aluminio mínimo) Generalmente estas aleaciones tienen composiciones controladas que no llevan aleantes, con purezas del 99.00% de Al o más. Tienen muchas aplicaciones, especialmente en el campo químico y eléctrico en las que destaca especialmente los rotores de motores eléctricos. En general esta aleación es usada donde se requiera conductividad eléctrica, aleaciones usadas para estas aplicaciones incluyen la 100.0 y 170.0 [11].

2xx.x (Al+Cu) Esta aleación tiene contenidos del 4-8% de cobre, con algunas impurezas. Son tratables térmicamente y pueden alcanzar alta resistencia y ductilidad, especialmente si se preparan a partir de un lingote que contenga menos de 0.15 % de hierro. Las aleaciones Al-Cu son de fase única. El principal atributo de las aleaciones altas en cobre (7 a 8%) es su insensibilidad a las impurezas. Esta aleación es utilizada donde se requiera esfuerzo a la cedencia y elongación moderada. Las aplicaciones de esta aleación incluyen: cabezas

automotrices, pistones, engranes, carcazas de bombas. Las aleaciones usadas son la 201.0, A201.0, A206.0, 208.0 222.0, etc [11].

3xx.x (Al+(Si-Mg)), (Si-Cu) o (Si-Mg-Cu) De este tipo de aleaciónes, las más ampliamente utilizadas son las que contiene silicio y cobre [10]. En estas aleaciones el cobre proporciona resistencia y el silicio facilita el vaciado, reduciendo defectos en el material al ir solidificando; por lo tanto, las aleaciones con contenidos altos de silicio se utilizan para producir piezas de formas intrincadas. Estas aleaciones cuando contienen más de 3 % de cobre son tratables térmicamente, aunque normalmente estos tratamientos se realizan cuando la aleación contiene también magnesio, el cual incrementa la respuesta al tratamiento. Las aleaciones de alto silicio (mayor al 10%) presentan baja expansión térmica y presentan algunas ventajas en operaciones a altas temperaturas. Cuando el contenido de silicio excede del 12 ó 13% (puede ser tan alto como el 22%), se presentan cristales primarios de silicio y si se encuentran apropiadamente distribuidos, imparten excelente resistencia al desgaste [12]. En general este tipo de aleaciones presentan buena fluidez, resistencia a grietas en caliente, buena soldabilidad, bajos rechupes por solidificación, resistencia a corrosión y resistencia mecánica moderada. Dentro de las aplicaciones están las aplicaciones ornamentales, reflectores, partes de suspensión, pistones y principalmente monoblocks y cabezas automotrices. Las aleaciones más comunes son las siguientes: 308.0, 319.0, A319.0, B319.0, 320.0, 332.0, 333.0, A333.0, A336.0, 354.0, 356.0 [11].

4xx.x (Al+Si) Cuando estas aleaciones no contienen cobre, son utilizadas donde se requiere buena resistencia a la corrosión y buenas características de vaciado. Las aleaciones con menos del 12% de silicio se denominan hipoeutécticas, las cercanas al 12% de silicio son eutécticas y aquellas que sobrepasan el 12% son llamadas hipereutécticas. En caso de que se requiera alta resistencia y dureza, la adición de magnesio provoca que estas aleaciones sean tratables térmicamente. Se han utilizado aleaciones con contenidos de silicio tan bajo como un 2%, pero

normalmente este contenido se emplea en porcentajes de entre un 5 y un 13%; la resistencia y ductilidad de estas aleaciones, especialmente aquellas con alto silicio, se mejoran sustancialmente mediante la modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio [13]. En general este tipo de aleaciones son de uso general, teniendo buenas características para vaciar en grandes cantidades, piezas con partes intrincadas de secciones delgadas. Se presentan buenas propiedades mecánicas además de una excelente resistencia a la corrosión y muy buena soldabilidad. Las aplicaciones de esta aleación son: utensillos de cocina, aplicaciones marinas, ornamentales, propelas, defensas, etc [14].

5xx.x (Al+Mg) En este tipo de aleaciones el magnesio es el elemento aleante principal; son esencialmente aleaciones binarias de una sola fase con resistencia entre moderada y alta, lo mismo que su tenacidad. La principal ventaja de estas aleaciones es su alta resistencia a la corrosión, especialmente en atmósferas marinas [13], algunas de las aleaciones usadas en ambientes corrosivos son las siguientes: 512.0, 513.0,514.0 y 535.0 [11]. Para la alta resistencia a la corrosión se requiere un bajo contenido de impurezas, por lo cual estas aleaciones se deben de preparar con metal de alta calidad. Estas aleaciones son adecuadas para ensambles soldados y son frecuentemente utilizadas para acabados arquitectónicos, en la construcción. En general este tipo de aleaciones posee buena maquinabilidad, de apariencia atractiva cuando se anodizan; pero la baja característica de vaciado y la tendencia del magnesio a oxidarse, aumenta la dificultad de manejo y por lo tanto su costo [15].

7xx.x (Al+Zn) Generalmente el contenido de cinc se encuentra en mayor proporción de los elementos aleantes, pero también tiene contenidos de cobre, magnesio, cromo o combinaciones de estos [16]. Este tipo de aleaciones envejecidas en forma natural, alcanza su máxima resistencia después de los 20-30 días a temperatura ambiente después de ser vaciadas. En este tipo de aleaciones no es necesario una temperatura demasiado alta de solubilizado y un temple drástico para obtener propiedades óptimas, sin embargo puede ocurrir microsegregación de las fases

Mg-Zn, lo cual se contrapone a la regla de que a más alta rapidez de solidificación se obtienen mayores propiedades en la condición de vaciado [13]. En la condición de vaciado estas aleaciones presentan propiedades en tensión entre moderadas y buenas. Con tratamiento de recocido se obtiene buena estabilidad dimensional de la pieza de trabajo; poseen buena maquinabilidad, buena resistencia a la corrosión generalizada [11], pero no son recomendables para servicio a altas temperaturas porque se provoca un sobreenvejecimiento, el cual causa ablandamiento [17]. Entre las aleaciones comerciales se encuentran las siguientes: 710.0, 711.0, 712.0, 771.0 & 772.0 [11].

8xx.x (Al+Sn) Este tipo de aleaciones presentan un contenido de estaño de 6%, generalmente este tipo de aleaciones se utilizan para la fabricación de bujes y chumaceras, debido a la lubricación impartida por el estaño. Estas aleaciones fueron desarrolladas para satisfacer las demandas de los equipos que requieren bujes, en donde la capacidad de carga, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión sea alta (corrosión provocada por los aceites lubricantes en motores de combustión interna). Los bujes fabricados con estas aleaciones son superiores en lo general a los construidos con la mayoría de los aceros. Las aleaciones más usadas son las siguientes 850.0, 851.0, 852.0, 853.0 [11].

2.3 Aplicaciones de las aleaciones para fundición

Las aleaciones de aluminio con contenidos de Si, Mg, Cu y Zn en varias proporciones fueron introducidas recientemente como componentes en los motores de combustión interna y en la estructura de los automóviles. Hay dos razones para usar aluminio en los motores de combustión interna: la reducción de peso y la alta conductividad térmica. Las aplicaciones de las aleaciones vaciadas son muchas, debido a la alta aceptabilidad del aluminio. Una de las aplicaciones es en pistones para los motores de gasolina [8]. El pistón es el elemento crítico de un motor de combustión interna, por lo cual los puntos críticos que debe cumplir son: resistencia mecánica, ligereza, conductividad térmica y dilatación. Buena parte de los pistones de los motores de automóvil son de fundición

gris, que tiene como mejor propiedad su elevada resistencia mecánica y un coeficiente de dilatación adecuado para las solicitudes de un motor. Sin embargo, su elevado peso resulta poco adecuado para motores que alcancen altos regímenes de giro y con menores consumos de combustible. Otro material muy utilizado para fabricar pistones es la aleación de aluminio (aluminio-cobre-hierro o aluminio-cobre-níquel) cuya principal virtud es la reducción de peso. Sin embargo, su coeficiente de dilatación térmica es elevado (aproximadamente el doble que el del acero gris) lo cual puede ocasionar que a altas temperaturas de funcionamiento se funda el pistón con la camisa; pero este problema se soluciona al añadir a la aleación pequeñas cantidades de silicio, lo cual aumenta la dureza y la conductividad térmica del material a la vez que disminuye el coeficiente de dilatación térmico[18]. El efecto de la baja inercia en el desempeño del pistón de aluminio, permite alcanzar velocidades más altas, reduciendo el contrapeso del cigüeñal, generalmente se utilizan aleaciones hipereutécticas con contenidos de silicio mayores al 25 % ya que los cristales de silicio primario crean una superficie resistente a la abrasión además de reducir el coeficiente de expansión térmico. La adición de mas del 3% de níquel y ocasionalmente 1 % de Co incrementa la resistencia a elevadas temperaturas. La adición de otros elementos aleantes tales como Cu, Mg y Pb se utiliza para completar la aleación [2]. Una aleación comúnmente utilizada para la fabricación de pistones es la 332.0-T5, la cual tiene buenas características físicas y mecánicas [11]. En la Figura 2.3.1 se muestra la cabeza de un pistón de aluminio. Otras aplicaciones de aleaciones vaciadas son las cabezas automotrices, en las cuales se emplean las aleaciónes 356.0 y 319.0, que tienen excelentes características de vaciado y resistencia a la corrosión. En la Figura 2.3.2 se muestra una cabeza automotriz de aleación 356.0.

Figura 2.3.1 Cabeza de pistón de aluminio vaciada en aleación 356.0

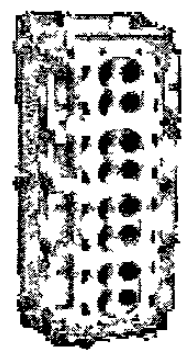


Figura 2.3.2. Cabeza automotriz vaciada en aleación 319.0

Los rines de las llantas son otro gran mercado en el cual el aluminio juega un papel muy importante. Sorpresivamente, el peso no es frecuentemente el principal factor en la selección de aluminio, la apariencia es la principal razón en seleccionar aluminio en vez de acero. En la mayoría de los casos el equipo original de los autos contempla rines de acero, pero se reemplazan con rines de aluminio por apariencia estética. Los rines generalmente no causan un gran ahorro en peso, ya que casi pesan lo mismo que los de acero.

Los rines de aleaciones trabajadas no son muy usados, pero por su alta resistencia, alta ductilidad y libre de defectos, presentan un alto costo, más sin embargo no representan la mejor opción para disminuir el peso. Su baja porosidad permite hacer diseños con espesores de pared muy delgados. Los rines de aleaciones vaciados son muy comunes, el 90% se vacía en aleación A356 y reciben un tratamiento térmico T6. En Europa se vacía con una aleación diferente teniendo un contenido de silicio del 11%, el tratamiento térmico consiste en su recocido para mejorar la ductilidad. Esta aleación no tiene las mismas propiedades como la A356. La técnica de vaciado por baja presión en molde permanente es la técnica preferida para la producción de rines [2].

El estilo ha sido siempre la razón principal en el diseño de rines de aluminio, pero la posibilidad del aluminio en la reducción de peso ha llegado a ser un factor muy importante en la actualidad. Aunque el vaciado a baja presión en molde permanente es la razón para la producción de la mayoría de los rines, la necesidad de una alta ductilidad para mejorar el comportamiento en caso de una colisión ha favorecido el uso de aleaciones con bajo contenido de hierro. Esto ha significado aumentar el uso de aluminio primario, el cual es esencial si se quieren alcanzar valores menores al 0.2% de Fe [2].

Dentro de las principales aplicaciones automotrices de las aleaciones de aluminio vaciado destacan las siguientes [1]:

319.0 Múltiples de admisión y escape, cabezas automotrices, monoblocks, etc.

356.0 Cabezas automotrices.

A356.0 Rines automotrices.

A380.0 Partes del sistema de dirección, partes internas del motor.

383.0 Monoblocks, carcazas de transmisión.

B390.0 Anillos para pistones y partes internas de transmisión.

2.4 Aleaciones de aluminio trabajadas.

La clasificación de este tipo de aleaciones se basa en un sistema de numeración de cuatro dígitos [10], el primero de ellos indica el grupo. Para las series de la 2xxx a la 7xxx, el grupo de aleación se determina por el elemento de aleación presente en mayor porcentaje promedio. Una excepción es la serie 6xxx en la cual las proporciones de magnesio y silicio disponibles para formar silisuro de magnesio (Mg_2Si) son predominantes. En el caso de la serie 1xxx, la serie 10xx designa composiciones no aleadas que presentan límites de impurezas naturales; los últimos dos dígitos indican el mínimo porcentaje de aluminio. Las designaciones que tienen como segundo dígito otro número distinto del cero, indican un control especial de una o más impurezas individuales [13].

En lo que respecta a las aleaciones de aluminio de las series 2xxx a la 7xxx, el segundo dígito en la designación indica la modificación de la aleación; si el segundo dígito es cero, indica la aleación original, los números del 1 al 9 asignados consecutivamente indican la modificación de la aleación propuesta es meramente una modificación de una aleación previamente registrada o si se trata de una aleación [13] completamente nueva. Los últimos dos dígitos no tienen un significado especial pero sirven para identificar las distintas aleaciones de aluminio del grupo. Se muestra a continuación el sistema de designación de las aleaciones de aluminio para trabajo mecánico [19].

Serie 1xxx Aluminio con un mínimo de pureza del 99.0 % [4].

Serie 2xxx Cobre.

Serie 3xxx Manganeso.

Serie 4xxx Silicio.

Serie 5xxx Magnesio.

Serie 6xxx Magnesio+Silicio

Serie 7xxx Zinc

Serie 8xxx Otros elementos

Serie 9xxx Serie no utilizada.

Serie 1xxx: Son aleaciones con una pureza del 99.0% de Al. Las principales impurezas generalmente son de fierro y silicio, con la posible presencia de cobre o zinc en cantidades menores a 0.1% en peso y otros elementos en cantidades inferiores a 0.5% cada uno, lo que totaliza menos de 0.15%. El diagrama del sistema binario aluminio-hierro se muestra en la Figura 2.4.1 [14]. Las aleaciones aluminio-hierro forman una serie eutéctica [20] con una muy pequeña solubilidad del sólido, el eutéctico entre el constituyente designado como $FeAl_3$ y el aluminio está a 1.7% de hierro y 655°C a cuya temperatura, la solución sólida rica en aluminio contiene 0.052% de fierro. La solubilidad del sólido disminuye con la temperatura: 0.025 % a 600°C y 0.006 % a 500°C. No obstante, estos valores sólo se pueden alcanzar mediante un recocido prolongado seguido de un templado, de manera que el aluminio, aún de alta pureza, contiene normalmente partículas de constituyentes que llevan hierro [14]. Generalmente estas aleaciones tienen excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, bajas propiedades mecánicas aunque se puede mejorar la resistencia por trabajo en frío. Los usos típicos de esta serie incluyen el equipo químico, reflectores, intercambiadores de calor, conductores eléctricos y aplicaciones arquitectónicas [19].

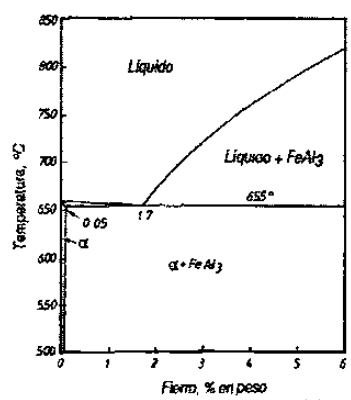


Figura 2.4.1 Diagrama Al-Fe

Serie 2xxx: Son aleaciones que contienen cobre como elemento aleante principal y algo de magnesio, formando un eutéctico con el constituyente designado como θ. Dicho componente funde a 591°C y no tiene una composición estequiométrica fija sino que varía ligeramente. La composición ideal para el $CuAl_2$ es de 46.1 % en peso de cobre, justo fuera del intervalo de homogeneidad; no obstante, θ se identifica a menudo por esta formula química; la solución sólida contiene 5.7 % en peso de cobre a la temperatura eutéctica en condiciones de equilibrio, baja a 45% en peso a 300°C y a 0.1-0.2% en el peso a 250°C, esto se muestra en la Figura 2.4.2. [14].

Van Lancker [15] establece que al vaciar una aleación normal de un 4% de cobre, se obtiene una solución sólida de estructura celular en la cual el cobre no se distribuye al azar. Estas aleaciones requieren solubilizado para mejorar sus propiedades además de alcanzar propiedades mecánicas similares y algunas veces mayores a algunos aceros de bajo carbono, sin embargo esta serie no tiene buena resistencia a la corrosión como la tienen la mayoría de las demás series. La aplicación de esta serie se utiliza en fuselajes, partes de suspensión para camiones, etc [13].

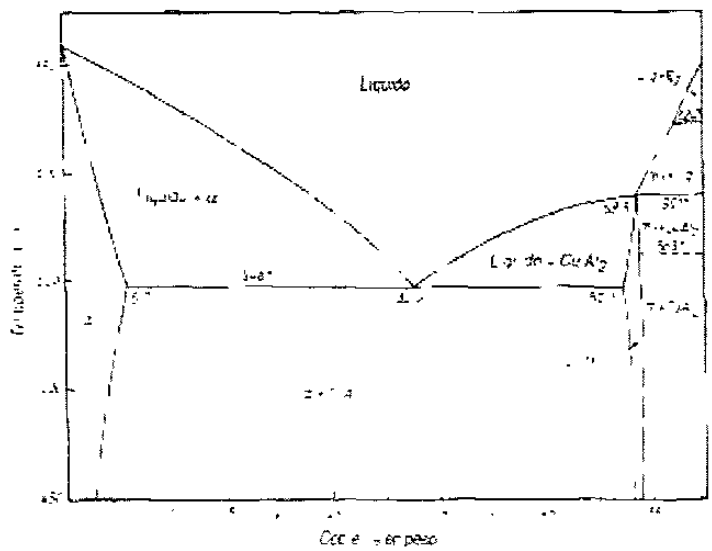


Figura 2.4.2 Diagrama Al-Cu

Serie 3xxx: En esta serie el Mn es el principal elemento aleante [13], el aluminio forma un eutéctico con el constituyente $MnAl_6$ que contiene un 2% de manganeso y que solidifica a 658.5 °C, solo 1.5°C por debajo de la temperatura de solidificación del aluminio puro (ver Figura 2.4.3). Existe una considerable solubilidad del sólido en las aleaciones ricas en aluminio, que alcanza un 1.82% a la temperatura eutéctica. Con un contenido de 0.015% de fierro, la solubilidad del sólido se reduce a 1.38% a 650°C [21]. A medida que baja la temperatura, la concentración de manganeso sale de la celda unitaria de aluminio como $MnAl_6$ secundario. Dicho componente tiene 25.34% en peso de manganeso y una estructura ortorrómbica con 28 átomos por celda unitaria [14]. Generalmente esta serie no es adecuada para tratamiento térmico pero presenta un 20% más resistencia que la serie 1xxx. La aleaciones más usadas de esta serie son las 3003, 3X04 y 3105, las cuales se usan en la fabricación de latas utensillos de cocina, intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento, señales viales, etc [10].

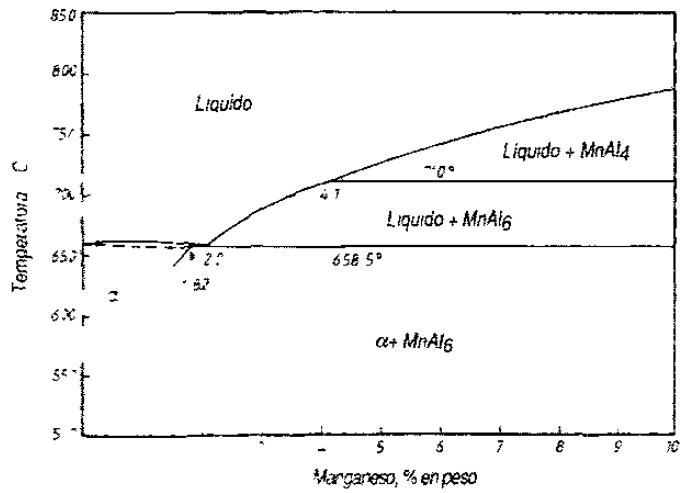


Figura 2.4.3 Diagrama Al-Mn

Serie 4xxx: En esta serie el silicio es el elemento aleante principal (mayor al 12%). El aluminio y el silicio forman una serie eutéctica simple con algunas solubilidades de los sólidos en ambos extremos (ver Figura 2.4.4). El eutéctico de aluminio y silicio contiene 11.7% de silicio y solidifica a 577°C. El componente rico en aluminio, en condiciones de equilibrio, tiene 1.65% de silicio a esta temperatura y

el constituyente rico en silicio contiene 0.5% de aluminio. La solubilidad del silicio en aluminio baja a 1.3% a 550°C, 0.8% a 500°C, 0.29% a 400°C y 0.05-0.008 % a 250°C. El silicio puede existir de dos formas en la aleación, la resultante de la precipitación de una solución sólida y la producida por la solidificación directa de la fase eutéctica, ambas formas son cristalográficamente equivalentes aunque difieren en la forma y distribución. No hay compuestos intermetálicos entre el aluminio y el silicio [14]. El silicio baja el punto de fusión sin fragilizar, por esta razón esta serie se utiliza en la fabricación de alambre para soldadura, donde se requiere un bajo punto de fusión, la mayoría de estas aleaciones no es tratable térmicamente. Las aleaciones con un alto contenido de silicio se ponen de color carbón cuando se les anodiza, lo cual se prefiere en aplicaciones arquitectónicas [10].

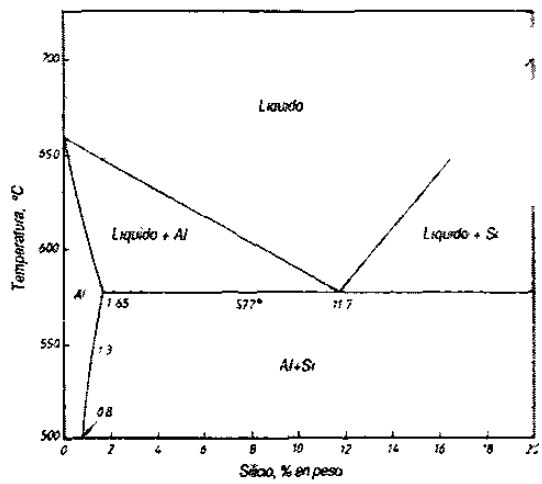


Figura 2.4.4 Diagrama Al-Si.

Serie 5xxx: En esta serie el elemento aleante principal es el magnesio, el cual se considera más efectivo que el manganeso, estas aleaciones binarias forman una serie eutéctica con una considerable solubilidad del sólido en el extremo del aluminio (ver Figura 2.4.5) [20]. El eutéctico, cuyo segundo constituyente se designa como β o Mg_2A_{l3}, está a 35% de Mg y 450°C. La solución sólida rica en aluminio contiene 15.35% de magnesio a la temperatura eutéctica y desciende a 11.8% a 400°C, 6% a 300°C, 4% a 200°C y cerca de 2% a 100°C [22]. Esta pérdida de la solubilidad está acompañado por la expulsión de Mg_2Al_3 de la

solución sólida α. Para la precipitación de β, la aleación debe tratarse a una temperatura de 200-300°C y el tiempo de tratamiento depende del nivel exacto de temperatura. La fase β tiene un papel importante en los fenómenos de corrosión. La fase β tiene una celda unitaria del tipo centrado en las caras que es compleja, este componente es responsable de la tratabilidad térmica de la aleación de vaciado de aluminio-10% de magnesio [14]; las aleaciones de esta serie son muy buenas para soldadura y también tienen buena resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, pincipalmete se usan para tanques criogénicos, barcos, partes de autos, señales viales [10].

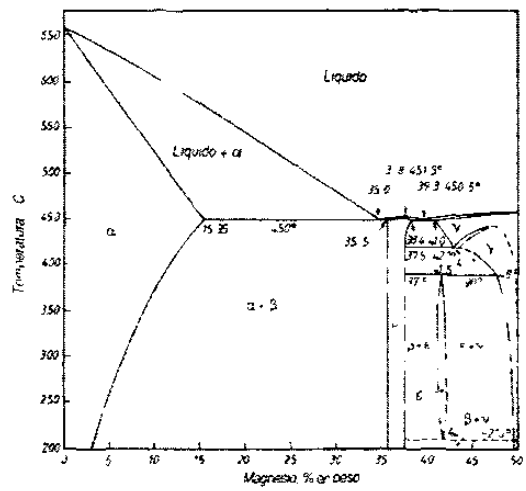


Figura 2.4.5 Diagrama Al-Mg

Serie 6xxx: Las aleaciones de esta serie contienen silicio y magnesio aproximadamente en las proporciones requeridas para formar siliciuro de magnesio (Mg_2Si) [10]. El aluminio y este componente forman un sistema casi binario que divide al sitema ternario en dos partes. En el sistema cuasi binario, los dos componentes forman un eutéctico a 595°C que contiene 8.15% de Si (ver Figura 2.4.6) y existe una solubilidad del sólido considerable en el extremo del aluminio que alcanza un 0.85% de Mg, 1.10% de Si a la temperatura eutéctica; ambos sistemas ternarios parciales son eutécticos. El aluminio, silicio y Mg_2Si forman un eutéctico ternario que contiene 4.97% de magnesio, 12.95% de silicio que se solidifica a 555°C mientras que el aluminio Mg_2Si y Mg_2Al_3 forman otro a 33.2% de magnesio,

0.37% de silicio, que solidifica a 451°C. El campo primario del Mg_2Si tiene forma de cuña [15]. Esta serie presenta buena formabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión, el uso de esta serie incluye aplicaciones arquitectónicas, bicicletas, puentes, etc [23].

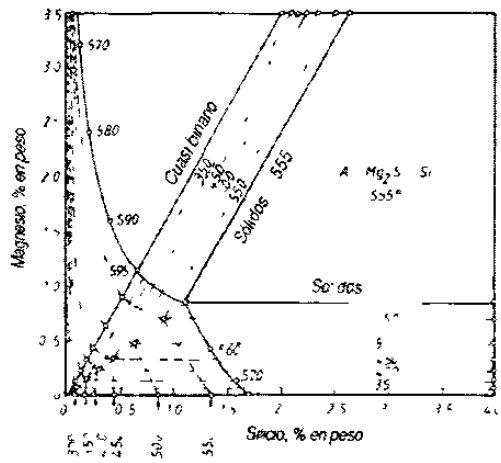


Figura 2.4.6 Diagrama Al-Mg-Si, solidus

Serie 7xxx: El aluminio y el zinc forman un eutéctico a 95% de zinc, que solidifica a 382°C, donde los dos constituyentes son una solución sólida que contiene 82.8% de zinc a la temperatura eutéctica y una solución sólida de zinc que tiene 1.14% de aluminio. Así, todas las aleaciones ricas en aluminio de este sistema solidifican como soluciones sólidas y ninguna otra fase puede existir en esta etapa, aunque dicha solución sólida se descompone a temperaturas más bajas. De 0 a 31.6% de zinc, se deposita éste y el límite de solubilidad del sólido sube a cerca de 4% el de zinc a 100°C hasta 31.6% de zinc a 275°C (ver Figura 2.4.7) [15]. Las aleaciones de un 8 a un 10% de zinc con adiciones de cobre para mejorar la susceptibilidad al vaciado son útiles como aleaciones de vaciado de uso general, aunque la resistencia a la corrosión no es elevada. En esta serie, cuando se le añade magnesio a la aleación resulta una aleación con alta resistencia cuando se trata térmicamente. Las aplicaciones principales de esta serie son estructuras donde se necesita alta resistencia [24].

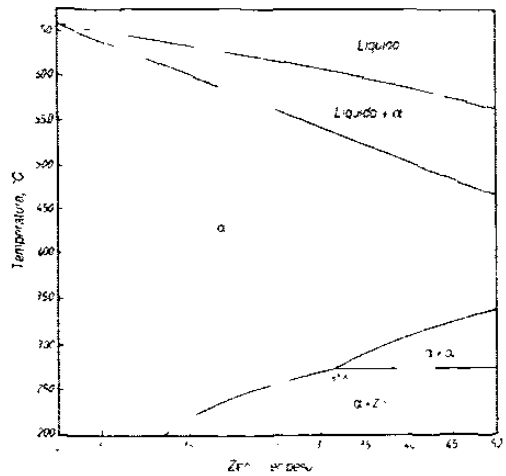


Figura 2.4.7 Diagrama Al-Zn

Serie 8xxx: Estas aleaciones contienen un intervalo muy amplio de composiciones, entre ellas se encuentran:

Aleaciones de aluminio-níquel-hierro: La aleación 8001 tiene un bajo contenido de níquel y de hierro y es de interés desde el punto de vista de la corrosión acuosa a temperaturas mayores de 100°C [14].

Aleaciones de aluminio-estaño: La aleación 8020 tiene al estaño como el elemento aleable principal junto con pequeñas adiciones de silicio, hierro, cobre y níquel. Las aleaciones de este tipo se emplean como aleaciones de aluminio para los metales de los cojinetes [14].

Aleaciones de aluminio-litio: es probable que estas aleaciones, para las que se pronostica ahorro en el peso 10-15%, tengan un impacto considerable en el diseño, fabricación y economía de la aviación en el futuro [25]. Esto se basa en adiciones de 2-3% de litio junto con cobre y magnesio, haciéndolas en particular útiles como materiales estructurales. El aluminio forma un eutéctico con el constituyente intermetálico Li-Al a 602°C [26] y cerca de un 9.9% del litio. El componente Li-Al se funde congruentemente a 718°C y tiene un intervalo de homogeneidad considerable, el cual no se conoce con precisión a temperaturas elevadas, pero a temperatura ambiente se extiende casi a un 20-22% de litio. Se puede decir que el litio es soluble en aluminio hasta un 5.2% a la temperatura eutéctica, 2.55% a 500°C, 1.02% a 400°C, 0.32% a 300°C, 0.06% a 200°C y 0.005% a 100°C (ver Figura 2.4.8) [14].

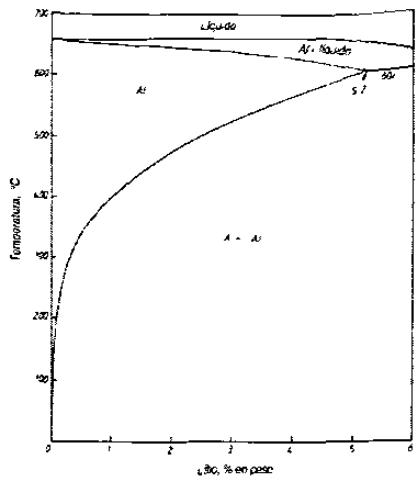


Figura 2.4.8 Diagrama Al-Li

2.5 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio trabajadas.

La industria automotriz usa aleaciones de aluminio trabajado en aplicaciones de ornamento, parachoques, tableros y varias partes más. Las aleaciones para ornamento son las del tipo Al-Mg (serie 2xxx). Se han desarrollado una gran variedad de aleaciones trabajadas de la serie 7xxx para defensas; las aleaciones 7129 y 7016 están diseñadas para barras frontales anodizadas. Las carrocerías han sido producidas primordialmente de con las aleaciónes 2036 y 5182. Actualmente las aleaciones 6009 y 6010 fueron desarrolladas especificamente para estas aplicaciones en carrocerías aunque también las aleaciones 3004, 5052, 6061 y 6063 se pueden usar tanto en el interior del auto como en exteriores [10].

La lámina de acero permanece como material predominante en la carrocería del automóvil. La introducción del aluminio ofrece grandes ventajas con el objetivo de reducir peso y mejorar la reciclabilidad al término de la vida útil del automóvil. Hoy en día las aleaciones Al-Mg sin tratamiento térmico son las más frecuentemente usadas para partes internas sin requerimientos de calidad superficial. Las aleaciones usadas son las 5052, 5774 y 5182 ya que ofrecen muy buena formabilidad, sin embargo, por la

posibilidad de formar líneas de Lüders, durante el doblado, estas aleaciones no se usan en partes exteriores, ya que los requerimientos para usarse en el exterior son alta resitencia, buena formabilidad, adaptabilidad a la soldadura por puntos, resistencia a la corrosión y buena apariencia después del pintado; dadas estas características no hay aleación que cumpla con todos estos requerimientos por lo cual en los Estados Unidos se utiliza la aleación Al-Mg-Si-Cu , Al-Mg-Si en Europa y Al-Mg-Cu en Japón. En Estados Unidos, la aleación Al-Mg-Si-Cu tal como en la 6110 presenta buenas propiedades mecánicas, pero tiene menos formabilidad y menor resistencia a la corrosión que sus variantes europeas [16]. En Europa, la dirección es optimizar la formabilidad. La aleación con tratamiento térmico 6016 muestra una buena formabilidad, después de la etapa del pintado-horneado en la cual se incrementan las propiedades mejorando la resistencia a las abolladuras, la cual es una importancia primordial en la lámina exterior. En Japón la aleación 5022 esta basada en el sistema Al-Mg con cobre, la cual es muy resistente a la corrosión, pero cuando se quiere apariencia estética, se presentan líneas de Lüders después del doblado lo cual en Europa no cumple con los requerimientos de calidad. En la Figura 2.5.1 se muestra una barra de protección en la puerta, la cual combina peso ligero con una alta absorción de energía [2].

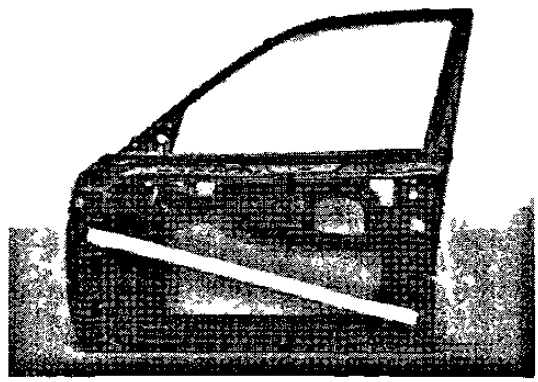


Figura 2.5.1 Puerta con barras para impactos, de aluminio [2]

Han surgido nuevos conceptos en las estructuras de los automóviles basadas en aluminio, lo cual ha desarrollado nuevos procesos de soldadura. Tal es el caso del eje trasero de la BMW serie 500, en el que la suspensión se compone de 25 componentes soldados a una estructura compleja de aluminio, como se puede ver en la Figura 2.5.2, las extrusiones de aluminio 6063 y aleación 357.0 se sueldan al eje tubular con tubos

de 90 mm en diámetro. Este es el caso, donde lámina de aluminio 5083 es hidroformada en tubos de forma compleja con el fin de tener una alta rigidez y resistencia a la fatiga combinada con una reducción del 40% en peso en comparación con la estructura original de acero. En las Figuras 2.5.3 y 2.5.4 se muestra como el eje trasero queda soldado y respectivamente ya ensamblado [2].

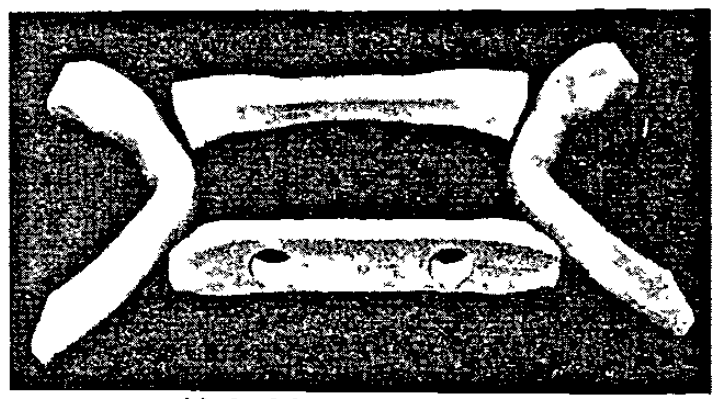


Figura 2.5.2 Componente ensamblado del BMW serie 500, el cual consta de 4 tubos de aluminio 5083 hidroformados y cortados [2]

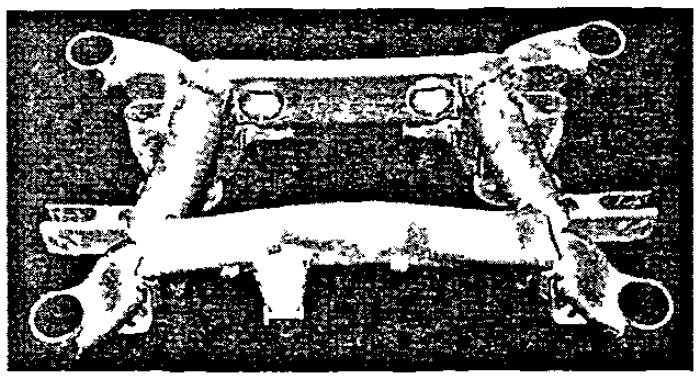


Figura 2.5.3 Eje trasero ensamblado [2]

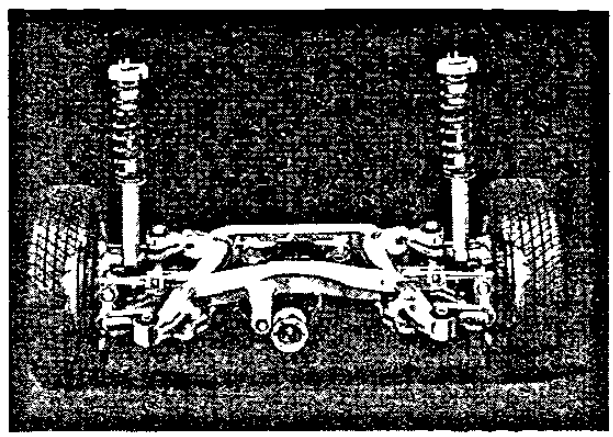


Figura 2.5.4 Ilustración de un eje completamente ensamblado, incluyendo el eje trasero de aluminio [2]

Los componentes que forman la suspensión están sujetos a cargas estáticas y dinámicas. En caso de colisión, se necesita una adecuada y predecible deformación para proteger a los ocupantes del vehículo, es decir el material debe de absorber toda la energía posible como es el caso de las aleaciones de aluminio. Es importante que se hagan pruebas para saber los esfuerzos y la carga máxima que se puede esperar en condiciones de trabajo.

El desarrollo en la serie 6000, está fructificando en el mercado automotriz y el mejor ejemplo es la carrocería del Audi A8 (space frame concept), la cual proporciona seguridad para todos los pasajeros, con zonas predefinidas de deformación en la parte frontal y trasera, proporcionando una alta protección en caso de impactos laterales, esta carrocería puede absorber más energía en un impacto que la misma carrocería en acero. El concepto de carrocería de aluminio consiste de perfiles de aluminio extruidos unidos por juntas especiales, acoplada a lámina estampada, donde la unión se realiza con soldadura MIG. En la Figura 2.5.5 se aprecia como está ensamblada la carrocería por perfiles extruidos y el producto ya ensamblado respectivamente [2]. La aleación usada por Audi contiene los mínimos elementos aleantes para asegurar el mejor extruido en piezas complejas y delgadas. La respuesta al envejecido, durante el horneado de la pintura, es requerida si realmente se quieren cumplir los límites de composición de la aleación permitiendo una mejora sobre la aleación existente. Todo el aluminio que se usa en la carrocería del Audi son laminas de la serie 6000 lo cual permite el reciclaje [27].

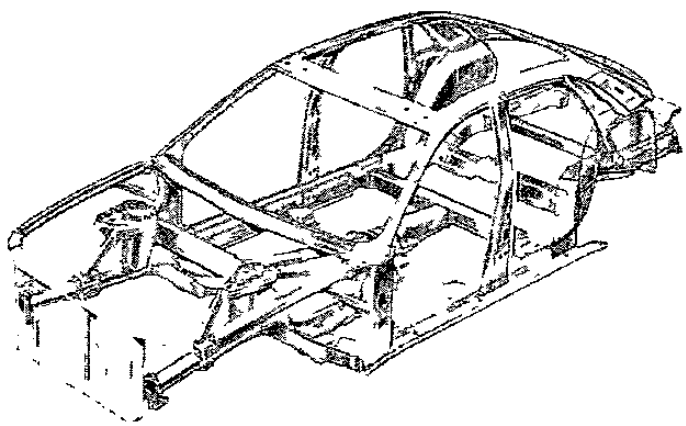


Figura 2.5.5 Carroceria fabricada de perfiles de aluminio [27]

2.6 Motores de combustión interna.

La búsqueda de mejorar la eficiencia en los motores, así como cumplir con las leyes ambientales de los Estados Unidos de América y de la Unión Europea, dio inicio a nuevas investigaciones que tienden a aligerar los motores [29]. Para cumplir los objetivos de mejorar la eficiencia y aumentar la durabilidad, la fricción que existe entre el pistón y la pared del cilindro tuvo que ser reducida, lo cual fue posible al desarrollo de nuevas aleaciones. Los diseños tradicionales de motores de combustión interna utilizan anillos de acero, monoblocks de hierro; pero con la introducción de monoblocks de aluminio se agudizó la necesidad de retener las propiedades tribológicas del hierro gris y surgió la idea de integrar el block de aluminio con camisas de hierro gris. Se trató de superar los problemas de la diferente expansión térmica del hierro y el aluminio por medio de varios ajustes de diseño. Una camisa de aluminio es una solución lógica a este problema, si sólo por el hecho de que su comportamiento térmico no difiera del monoblock en que esté puesto. La principal ventaja es que la extracción de calor de la cámara de combustión se mejora, primeramente debido a la alta conductividad térmica del aluminio. En la Figuras 2.6.1 y 2.6.2 se muestran respectivamente las partes internas del motor, así como un monoblock de aluminio

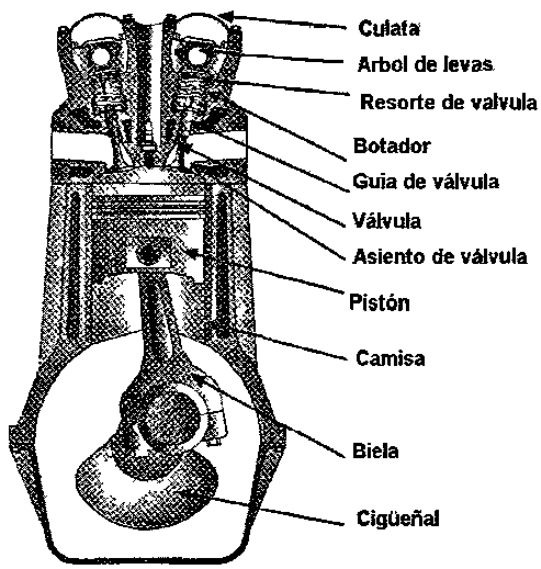


Figura 2.6.1 Sección de un motor con sus partes internas [8]

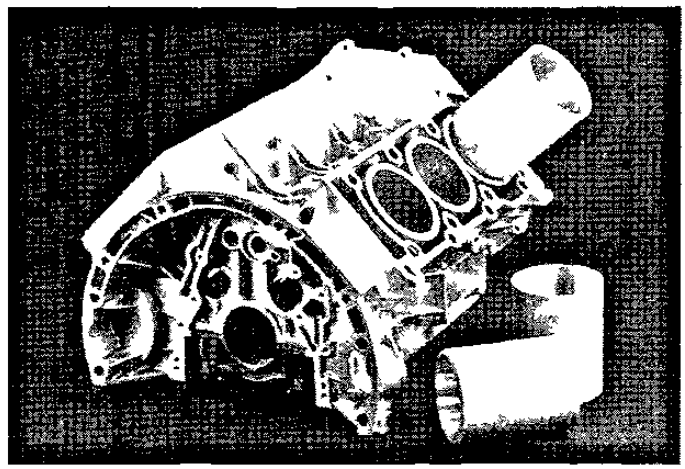


Figura 2.6.2 Monoblock de aluminio con camisas de aluminio [30]

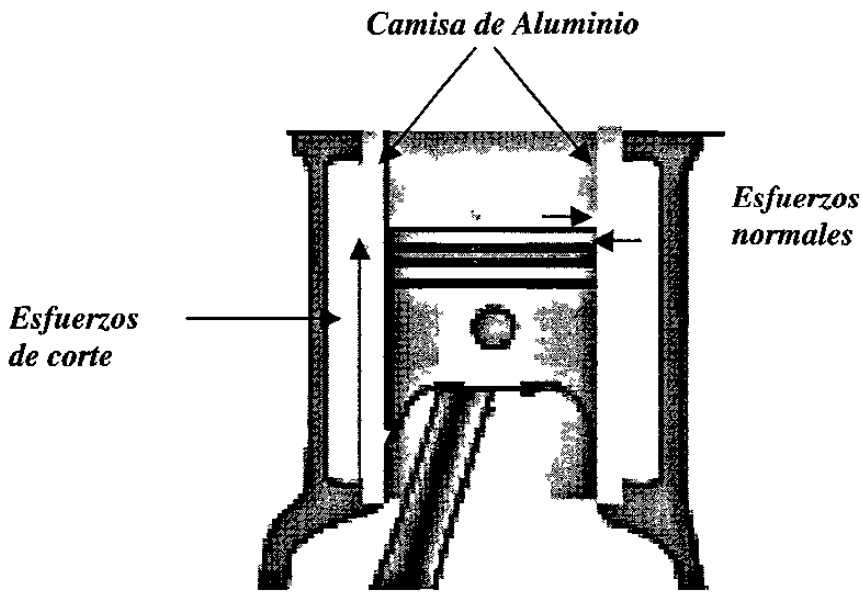


Figura 2.6.3 Esfuerzos debidos a la fricción de los anillos y la camisa

Para usar camisas de aluminio en un block de aluminio, se tiene que asegurar que las camisas queden firmemente unidas al block para evitar que en el funcionamiento de éste se lleguen a deslizar las camisas, provocando problemas de compresión. La camisa tiene que ir directamente montada al molde, independientemente del método de vaciado ya sea molde de arena a baja presión o molde permanente (die casting). Los esfuerzos que se generan en la camisa son debidos a los esfuerzos normales, debidos a la presión ejercida por los anillos en contacto con la camisa, y también a la fricción que existe por

el deslizamiento de los anillos del pistón, provocando esfuerzos de corte en la camisa, teniendo en cuenta que el pistón puede subir y bajar 3500 veces por minuto en un motor de alto rendimiento, sin embargo se tiene una película de aceite para disminuir esta fricción entre la pared de la camisa y los anillos, pero cuando se presenta un problema de lubricación, los esfuerzos debidos a la fricción aumentan de tal manera que si llega a presentarse deslizamiento de la camisa, el motor presentará problemas. Por esta razón se le realizan las pruebas de empuje a las camisas, con el fin de medir el deslizamiento en función de la carga de empuje, esto se presenta más adelante en el Capítulo 4.

2.7 Camisas de aluminio

Una camisa o también conocida como cilindro (ver Figura 2.6.1), es el núcleo de un motor. Cada camisa contiene un pistón, que desliza de arriba a abajo en el interior de la camisa o cilindro, produciendo los 4 tiempos de un motor de combustión interna (admisión, compresión, explosión y escape). El material comúnmente usado en las camisas es el hierro gris por la resistencia a la fricción que presenta. Actualmente se empiezan a fabricar camisas de aleaciones de aluminio. Las demandas para reducir el peso en los vehículos, así como también el cumplimiento de las normas ambientales de los niveles de contaminantes en el sistema de escape, ha influido fuertemente en el desarrollo de nuevas tecnologías de aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices. Esta tecnología usada en el desarrollo de las camisas de aluminio cumple con las demandas de reducción de peso y de ruido, además minimizan los niveles de contaminación. La optimización de los sistemas de pistones, anillos y camisas, fija nuevos estándares con respecto a las emisiones del sistema de escape, además del consumo de aceite y combustible.

La nueva tecnología desarrollada en camisas de aluminio-silicio, desarrollada en Europa está siendo usada por primera vez en vaciado por molde permanente y en corazones de arena sílica para los motores V8. Esta aleación hiper-eutéctica aluminio silicio se fabrica por el proceso de aspersión de metal líquido, ha mejorado

siginificativamente las propiedades mecánicas en comparación con los modelos actuales [29]. Las camisas de aluminio han probado tener muchas ventajas en comparación con las tradicionales camisas de hierro gris, que actualmente se siguen usando. Entre estas ventajas se menciona la reducción de peso de 500 g por cilindro (ya que la misma camisa, pero en hierro tiene un peso de 1 kg). No se forman grietas entre la interfase camisa-aluminio como sucede con las camisas de hierro al momento de vaciar. Hay una óptima transferencia de calor, lo cual repercute en una disminución de temperatura. La composición química de la aleación asegura que el tamaño de las partículas de silicio sea entre 2 a 15 μm, lo cual permite el mejorar el desempeño tribológico [30].

El proceso utilizado para fabricar las camisas de aluminio es el método Osprey (aspersión de metal líquido) el cual, comparado con la técnica de vaciado normal, tiene las características de una estructura isotrópica homogénea de grano fino, libre de segregación y de grietas. También posee buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a alta temperatura. Alta resistencia a la abrasión, ya que el contenido de silicio es alto y se encuentra en forma de cristales primarios, además de buena maquinabilidad [29].

El proceso usado para fabricar estas camisas como, se muestra en la Figura 2.7.1 El proceso comienza fundiendo y sobrecalentando la aleación que se alimenta a una tobera cerámica en la cámara de pulverizado, en donde el líquido se atomiza con nitrógeno, las particulas se aceleran hacia un disco rotatorio y posteriormente secompactadan en este disco. Los parámetros del proceso son fijados de tal forma que cerca del 80% de las partículas solidifica completamente durante la fase en que las partículas están en el aire. El resto de las partículas son todavía líquidas cuando se impactan en la superficie del substrato y se usan para crear el compuesto particulado. Como resultado de la rápida solidificación se forma una estructura homogénea de grano muy fino, con partículas de la fase de silicio de un tamaño promedio de 10 μm [31].

El uso del nitrógeno como gas de proceso asegura el mínimo contenido de oxígeno e hidrógeno en la aleación, para cumplir con las especificaciones de no tener poros en la camisa una vez vaciada. La Figura 2.7.2 muestra una microestructura de aleación SAE390 vaciada por gravedad, la cual tiene una distribución heterogénea de partículas de silicio primario de tamaño entre 40 y 70 μm. Esta microestructura se puede comparar con la que se muestra en la Figura 2.7.3, que presenta una estructura en la que las partículas de silicio están distribuidas en forma homogénea con un tamaño aproximado de 3 a 20 μm [31].

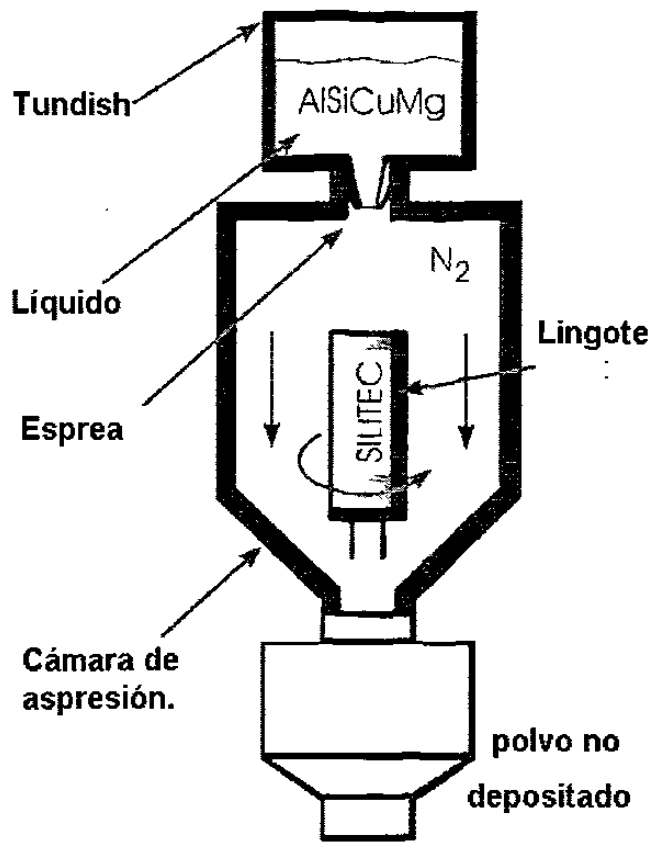
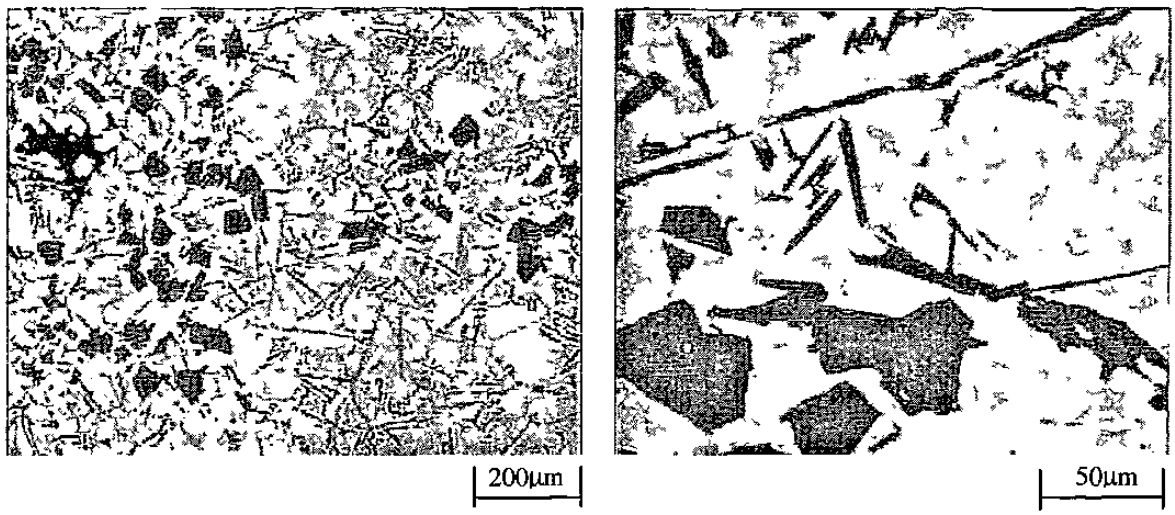
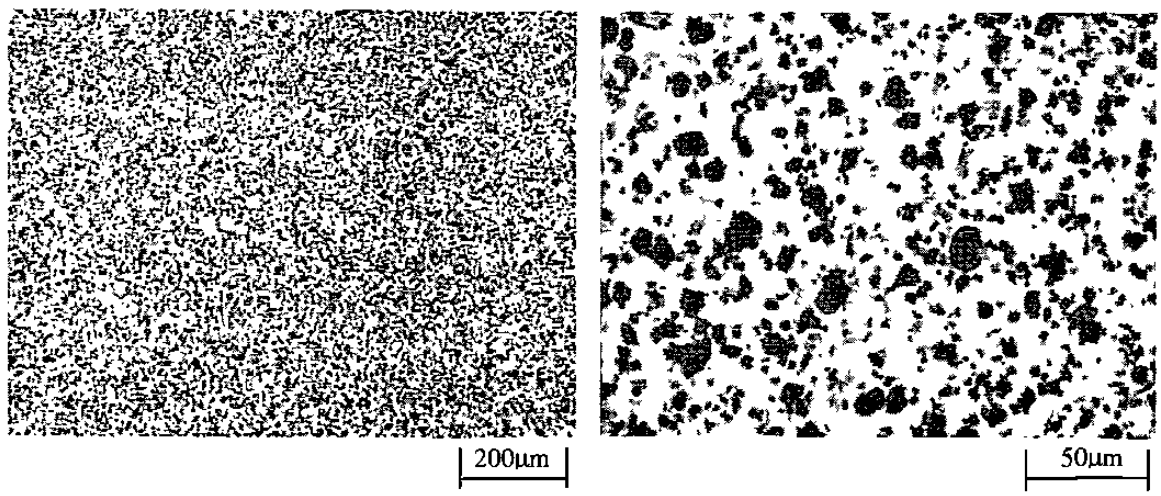


Figura 2.7.1 Método "Ospray" [31]



a) b)

Figura 2.7.2 a) Microestructura aleación SAE 390, vaciada por gravedad.100X. b) Misma microestructura a 500X. [30]



a) b)

Figura 2.7.3 a) Microestructura con distribución homogénea de partículas de silicio, vaciada por el método Ospray. 100X. b) Misma microestructura a 500X [30]

El proceso que se lleva a cabo para la fabricación de las camisas, después de que se forman los tochos o lingotes (ver Figura 2.7.4) es el de extruido para formar tubos con espesores de pared de 10 a 15 mm. Debido a la alta resistencia a ser deformados se utiliza extrusión indirecta. Una vez ya formados, se cortan en segmentos y se maquinan. Posteriormente se activa la superficie con el fin de propiciar la liga metálica [30].

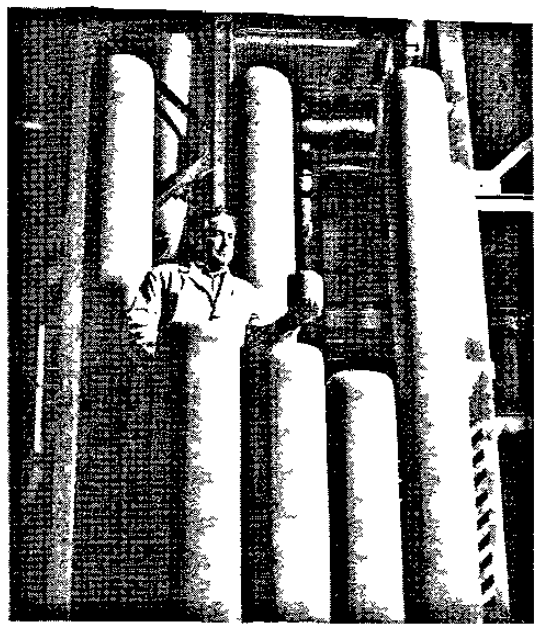


Figura 2.7.4. Formación de lingotes [31]

Una vez vaciados el monoblock con la camisa, se prueba la adhesión que hay entre ambos. Para esto se utiliza un sistema de inmersión ultrasónica como el que se muestra en la Figura 2.7.5. La prueba se basa en los impulsos ultrasónicos reflejados. Los espacios de aire que hay en la interfase camisa-aluminio (si es que lo hay) son un obstáculo para las ondas ultrasónicas y, por lo tanto, se reflejan. Este es el caso cuando no hay liga metálica entre la camisa y el aluminio. En el caso de tener una buena liga, las ondas de ultrasonido continúan su camino y no se reciben señales de impulsos reflejados. Debido a las altas frecuencias y a la geometría del monoblock es necesario transmitir los impulsos de ultrasonido a través del agua. El monoblock se acopla a un disco rotatorio, de tal manera que cuando la prueba esta en curso éste se mueve y se reciba una señal de eco decodificada en una computadora, de tal modo que se presenta una imagen por colores de la camisa. De este modo un color rojo representa espacios de aire en la interfase de 0.5 μm mínimo y 20 μm máximo, las áreas con buena liga metálica se representan coloreadas con color azul oscuro (ver Figura 2.7.6) [30].

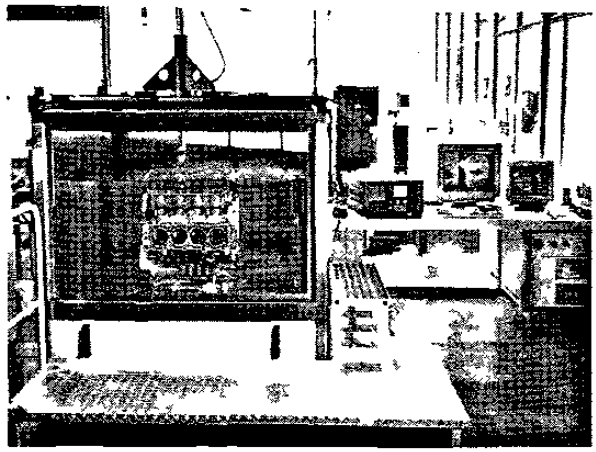


Figura 2.7.5. Equipo de ondas ultrasónicas para medir la liga metálica [30]

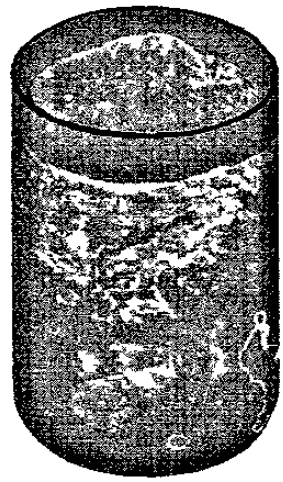
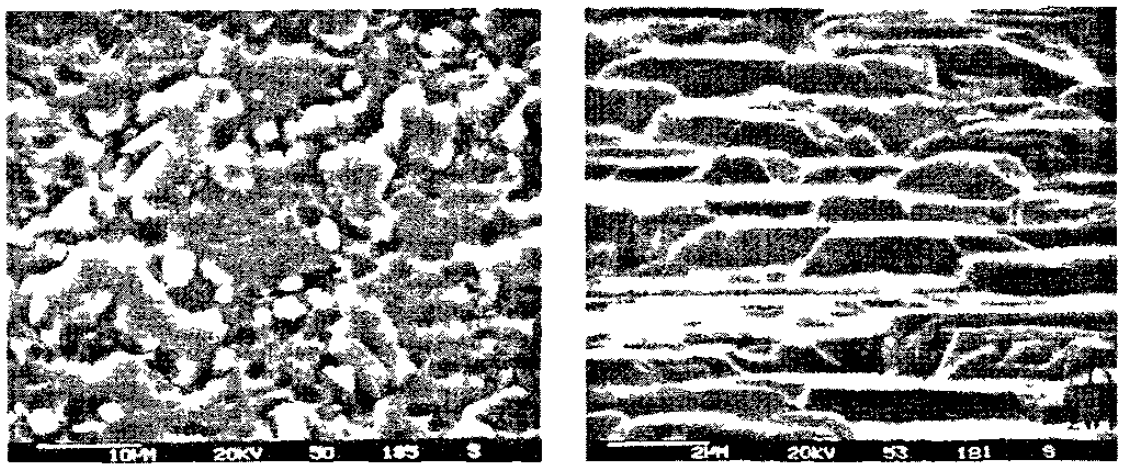


Figura 2.7.6 Representación de liga metálica por colores, donde el color rojo representa mala liga metalica y azul buena liga metálica

La topografía final de la camisa es determinada por un proceso de exposición con sosa cáustica de baja concentración (2%), el objetivo de esta exposición es el de disolver la matriz de aluminio de tal manera que solo los cristales de silicio resistentes a la abrasión estén en la pared del cilindro junto con el pistón y los anillos del pistón. En la Figura 2.7.7 se observa la topografía de la camisa una vez expuesta a sosa cáustica, los cristales de silicio levantados, sirven como retén de aceite de los anillos del pistón, mejorando la lubricación [30].



a) b)

Figura 2.7.7 a) Topografía de la camisa vista con microscopio electrónico de barrido después de exponerse a NaOH, vista en ángulo alto. b) Misma topografía vista en ángulo bajo [30]

CAPITULO 3

VACIADO DE ALUMINIO Y SOLIDIFICACIÓN

3.1 Introducción.

Los tres procesos de uso más común en la fundición de aluminio son: vaciado en molde de arena, vaciado en molde permanente y vaciado por inyección. Los moldes de arena se alimentan por gravedad con el metal fundido. Los moldes metálicos que se emplean en el vaciado en molde permanente se alimentan ya sea por gravedad o mediante aire y otro gas a baja presión para obligar a que el metal suba por un cuello de llenado (o canal) hasta dentro del molde; se pueden usar bombas electromagnéticas para este fin. Cuando se utilizan corazones de arena en los moldes permanentes el proceso se conoce a veces como vaciado en molde semipermanente. En el vaciado por inyección, el metal fundido se obliga a pasar al dado o matriz a una elevada presión por la acción de uno o más arietes hidráulicos.

3.2 Vaciado en Molde de arena

El vaciado en molde de arena es el método menos costoso dentro de las fundiciones de aluminio y que puede ser aplicado a casi todo tipo de aleaciones de aluminio, sea pequeño o grande, simple o complejo. De ser necesario, es posible alcanzar una textura

tersa en la superficie que se acerque a la del vaciado en molde metálico. Existen pocos límites técnicos para el vaciado por este método a pesar de que no es fácil vaciar secciones con resistencia adecuada por debajo de un espesor de 5 mm. El metal líquido se vacía dentro de un alimentador, el cual forma parte del sistema de alimentación, la parte vertical del sistema de alimentación es llamada mazarota, la cual actúa como recipiente de aluminio, que cuando empieza la contracción o rechupe por solidificación en la pieza, esta toma metal de este recipiente llamado mazarota para contrarrestar los rechupes o contracción, el porcentaje de contracción al momento de solidificar del aluminio es del 6% [11]. La mazarota debe ser mayor en las aleaciones de aluminio que en metales más pesados con el fin de asegurar una buena alimentación del molde según tienen lugar el enfriamiento y la contracción [28].

Hay dos tipos básicos de procesos en la fabricación de los moldes de arena, el primero es llamado molde en verde y consiste de una mezcla de arena, arcilla y agua, el moldeado en verde se utiliza ampliamente para vaciado de piezas pequeñas a grandes, el segundo es llamado molde en seco y consiste de arena, aglomerantes sintéticos, curados térmica o químicamente. La ventaja del sintético es que la composición puede ser controlada dentro de límites muy cerrados [32].

El vaciado en molde de arena es utilizado en piezas muy grandes, el metal es vaciado dentro de un alimentador que es formado usando un molde, generalmente de madera o, algunas veces, de metal. El molde para el alimentador está contenido en un agregado (arena) dentro de una caja de moldear. Se insertan moldes de madera o metal para dar cavida a los pasajes internos del metal, agujeros, etc. y, en general, a la forma final deseada. Una vez fraguada la mezcla de arena se procede a desmoldar, quedando el molde de arena listo para vaciar [32].

Las porciones horizontales de la Figura 3.2.1 son los corredores del metal que van a llenar la cavidad, para dar como resultado la forma deseada de la pieza; existen también en el molde unos respiraderos, cuya función es expulsar los gases (descomposición de resinas por evaporación) y aire desplazándolos a la atmósfera. En la

Figura 3.2.1 se muestra un molde de arena sencillo con sus partes, en tanto que en la Figura 3.2.2 se muestra un esquema del vaciado en molde de arena [32].

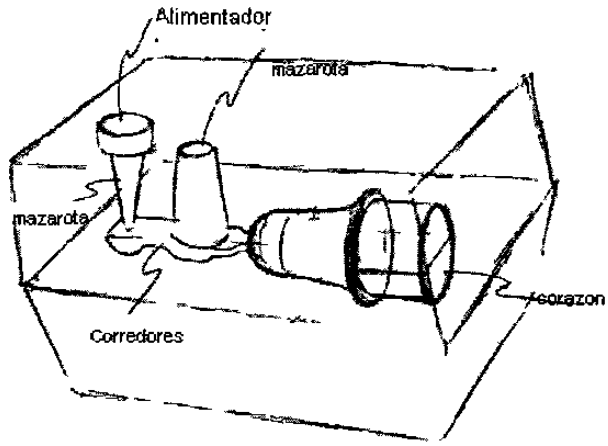


Figura 3.2.1 Molde de arena [14]

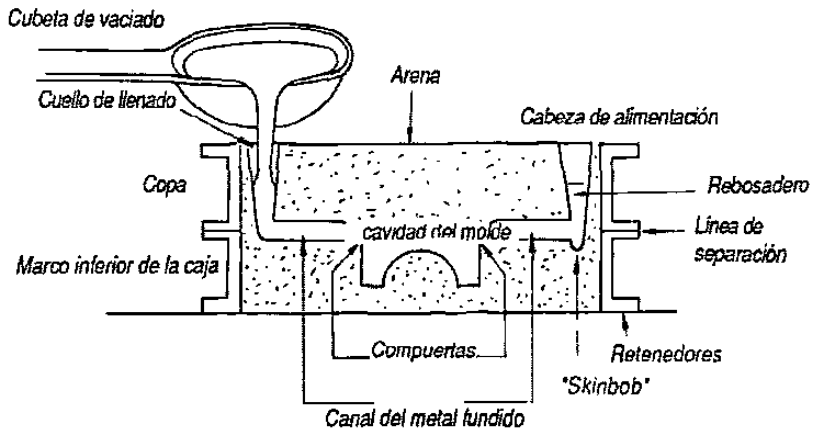


Figura 3.2.2 Esquema de vaciado en molde de arena [14]

Algunas de las aleaciones comúnmente usadas en el vaciado en molde de arena son las siguientes: 201, 206, 242, 295, 319, 355, 356, 357, 443, 444, 511, 512, 520, 535, 712, 713, 771, 772, 850, 851, 852 y sus respectivas variantes [11].

3.3 Vaciado en molde de arena a baja presión

El vaciado en molde de arena por baja presión es una variante del vaciado en molde de arena por gravedad. El principio se muestra en la Figura. 3.3.1. La cavidad de alimentación se llena por la parte inferior vía un tubo vertical de llenado y una tobera conectados a un crisol sometido a baja presión (mayor a 0.7 bar), que se mantiene durante el llenado. La presión durante la inyección puede ser variada cuando se requiera para asegurar un llenado del molde óptimo por medio de microprocesadores. Esta técnica permite el llenado de paredes de hasta 2.5mm de espesor y esto constituye una ventaja sobre el vaciado convencional en arena [14].

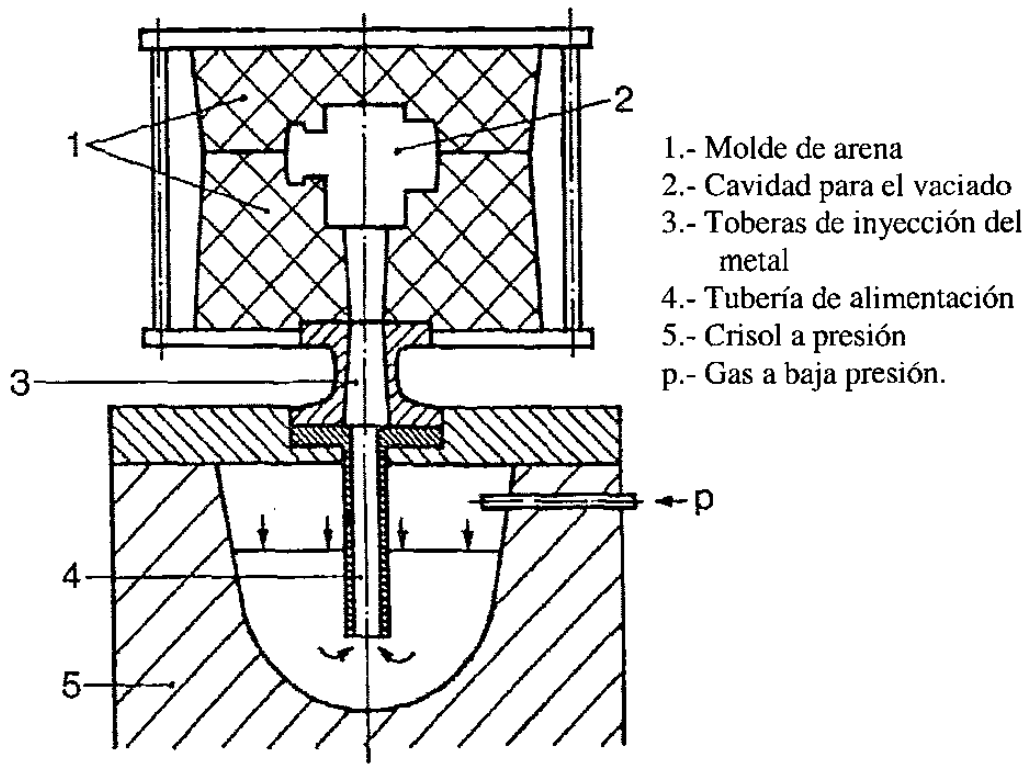


Figura 3.3.1 Componentes de una unidad de baja presión [14]

La Figura 3.3.2 muestra las aplicaciones en la industria aeroespacial que se pueden hacer con este tipo de vaciado a baja presión en molde de arena. Este proceso es apto para la producción de prototipos ya que simula el proceso de vaciado en molde permanente [2].

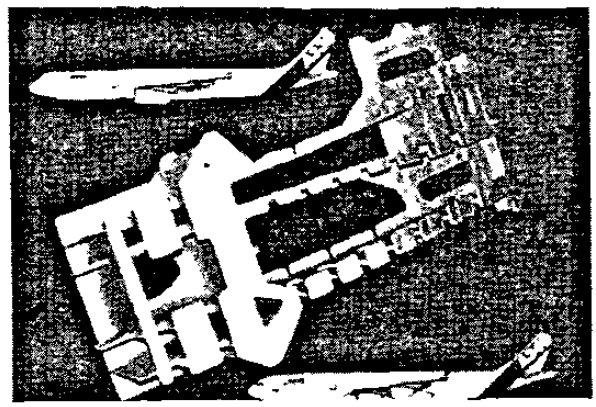


Figura 3.3.2. Tren de aterrizaje en aleación A356 hecha por el proceso de baja presión en arena, alcanzando un UTS=330 MPa, TYS = 270 MPa, Elongación = 5% [2]

3.3.1 Vaciado en molde metálico a baja presión

El vaciado en el molde metálico a baja presión usa aire comprimido a baja presión (>0.7 bar) para obligar al metal a subir por un ducto vertical hasta dentro de un molde colocado en su parte superior. Cuando el molde se llena y el metal solidifica, la presión se relaja y el metal que no se emplea fluye de regreso al baño de retención. El método resulta económico, desde el punto de vista térmico, con poco desgaste del metal. Los vaciados son sólidos, precisos y con muy buena apariencia, cabe recalcar que el proceso es similar al vaciado en arena por baja presión [14].

3.4 Moldes Permanentes

En el vaciado en moldes permanentes, algunas veces referido como vaciado en molde metálico por gravedad, se tiende a promover la formación de granos pequeños, que en el caso de las aleaciones de aluminio, se asocia con valores altos en propiedades mecánicas. El método, a pesar de ser muy versátil, impone algunas limitaciones prácticas cuando las piezas (y por consiguiente los moldes y las máquinas) son muy grandes y se acentúan los problemas relacionados con la alimentación de secciones delgadas y con los esfuerzos debidos a la contracción.

Cuando el molde metálico está en dos partes y una de ésta es de arena, el proceso se llama molde semipermanente. El vaciado en molde permanente o metálico es muy práctico para la producción de alto volumen. El proceso también puede ser usado para producir formas complejas, claro que la producción debe tener un alto volumen para justificar los costos del molde. El molde metálico, comparado con el de arena, permite un vaciado con tolerancias dimensiónales más uniformes y mejor acabado superficial y propiedades mecánicas [2]. El vaciado en molde metálico usualmente tiene mejores propiedades mecánicas que el vaciado en arena debido a que la solidificación es más rápida, por lo tanto un espaciamiento dendrítico secundario más fino (DAS). Mientras tanto, en el vaciado en molde metálico no se pueden obtener piezas tan complejas, como las que se obtienen en el vaciado en arena, ya que la alimentación del metal está maquinada al molde metálico. La vida útil promedio de un molde metálico es aproximadamente de $1x10^4$ a $1.2x10^6$ piezas vaciadas [11].

Las aplicaciones de las piezas producidas en molde metálico son muchas entre ellas se mencionan las siguientes: pistones, cabezas automotrices, partes internas de motores de combustión interna y de diesel. Otro de los usos principales es en la fabricación de bielas para motores de aviación, mísiles, carcasas para motores eléctricos, rotores para supercargadores, etc. Las principales aleaciones usadas en este tipo de vaciado son las siguientes: 443, 319, 332, A333, 333, 336, 390, C355, 513, y sus variantes [11].

Las consideraciones al usar molde permanente son [11]:

1. No todas las aleaciones son adecuadas para el vaciado en molde permanente y/o semipermanente.

2. El proceso puede ser muy caro, por los altos costos de herramental, en bajos volúmenes de producción.

3. Algunas formas no pueden ser fabricadas usando este método, por la dificultad que se presenta al remover el molde de la pieza.

4. Se requieren recubrimientos para proteger el molde del ataque del metal líquido y evitar que se suelden ambos, además los recubrimientos controlan la solidificación del metal, reducen el choque térmico, el espesor del recubrimiento debe ser entre 0.05-0.127mm.

3.5 Vaciado en molde metálico a presión

El costo de fabricación de los moldes para el vaciado en molde metálico a presión (conocido también como vaciado por inyección) es normalmente elevado y en general sólo se recupera a partir de una corrida de producción de 10 mil o más piezas vaciadas, aunque puede resultar económico para cantidades menores si las piezas son chicas y con diseños muy simples (como el que se ve en la Figura 3.5.1) [14].

Los vaciados en moldes metálicos a presión tienen por lo general las propiedades mecánicas más elevadas de todos los procesos de vaciado, en relación con el peso [14]. La calidad de la superficie es excelente, dependiendo de las condiciones de los dados. La superficie es usualmente más plana que en la mayoría de los demás procesos de vaciado con 25-125 μm rms, pero generalmente 63 μm rms se obtiene fácilmente con este tipo de vaciado. Una de las desventajas que presenta este proceso, es que el aire o los gases en la cavidad del dado frecuentemente quedan atrapados en la pieza formando huecos, los cuales reducen las propiedades mecánicas y si se encuentran cerca de la superficie pude causar burbujas ó vejigas durante un tratamiento térmico subsecuente; aunque con un buen sistema de alimentación y ventilación, se disminuirá la porosidad aumentando la sanidad de la pieza [11].

En este proceso una carga de metal fundido se inyecta a un dado enfriado con agua por medio de un pistón bajo presión (10000 a 20000 psi) a alta velocidad. La presión se aplica mientras ocurre la solidificación. Este proceso causa flujo turbulento

en el metal durante el proceso de llenado, provocando la formación de burbujas atrapadas. Las aleaciones de aluminio generalmente utilizan este método en las que se introduce una cantidad de metal líquido a la cámara de vaciado (generalmente en forma horizontal) la cantidad de metal que entra se regula automáticamente [2].

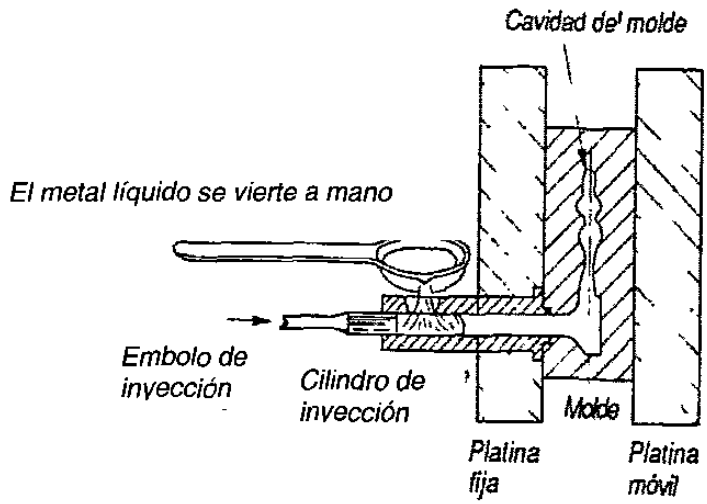


Figura 3.5.1 Sección esquemática del vaciado en molde metálico a presión [14]

La característica principal de este proceso es la gran velocidad a la que se inyecta el metal, el corto tiempo de llenado (alrededor de milisegundos) permite al metal moverse una gran distancia sin sufrir la pérdida de calor. La eficiencia del proceso depende del metal líquido, es decir, parámetros como temperatura, limpieza (desgasificado) y composición son primordiales para una buena eficiencia.

Las aleaciones que mayormente usan este proceso son las de aluminio, cobre y zinc. El aluminio puro es raramente vaciado por este proceso debido a rechupes y susceptibilidad de grietas en caliente, pero si se vacía aleado con silicio, el cual incrementa la fluidez y reduce la maquinabilidad; el cobre es otro elemento aleante que incrementa la dureza, reduce la ductilidad y reduce la resistencia a la corrosión.

3.6 Vaciado por el método de cera pérdida

Es el método utilizado para el vaciado de formas tan complejas que no pueden extraerse de sus moldes. El molde de yeso (patrón) se cubre con cera caliente hasta el espesor requerido en el vaciado metálico. Cuando se asienta, se cubre o reviste con una capa de yeso que se deja endurecer. El conjunto se calienta hasta que toda la cera se derrita o evapora. La cavidad que queda se llena con el metal líquido y cuando solidifica se elimina todo el molde y se obtiene una reproducción fiel del patrón.

El método se puede emplear para obtener una mayor precisión dimensional. En la industria, se utiliza un patrón maestro de acero para producir moldes divididos de metal suave alrededor de los cuales se forma un patrón de cera. Este reviste, como se indicó en el párrafo anterior y se procede al vaciado. Debido al hecho de que los moldes están en secciones se pueden sacar y usar otra vez [14].

3.7 Solidificación

La mayor parte de los materiales tienen que pasar por un cambio de fase durante algún momento en su proceso de fabricación. Una de las transformaciones más importantes es la transición del estado líquido al sólido, ya que todos los metales tienen que sufrir esta transformación para poder convertirse en un objeto útil, a este proceso se le conoce como solidificación.

Durante el proceso de solidificación, conforme disminuye la temperatura del líquido, la energía interna de los átomos va siendo cada vez menor y, por lo tanto, las fuerzas de atracción originan el agrupamiento de los átomos hasta que, finalmente, el líquido se solidifica. La mayoría de los materiales al solidificar experimentan una contracción de volumen, lo que indica una separación menor entre los átomos en el estado sólido. En este estado los átomos no permanecen en reposo sino que vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio, dando lugar a la disposición de las estructuras cristalinas.

3.8 Mecanismos de nucleación

Aunque en el estado líquido los átomos no tienen una distribución ordenada definida, puede ocurrir que, en un instante cualquiera, algunos de ellos se agrupen ocupando posiciones muy similares a las que les corresponde en la red espacial que se forma al solidificar el líquido, como se muestra en la Figura 3.8.1 [33].

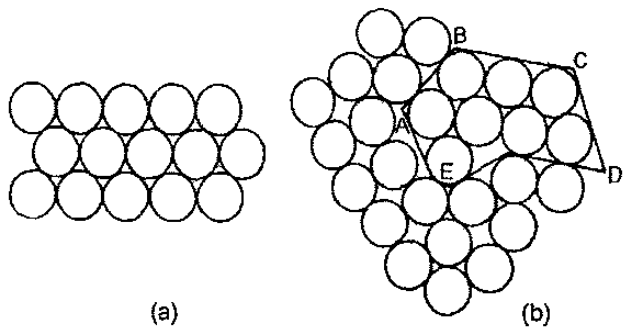


Figura 3.8.1. Representación de una estructura a) sólida y b) de un líquido. El área ABCDE presenta la misma ordenación en el líquido y en el cristal [33]

Estos conglomerados atómicos no son permanentes sino que se forman y destruyen rápidamente, su duración depende de la temperatura del medio y de su tamaño, de tal modo que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la energía cinética de los átomos y más corta la vida de los grupos. Los conglomerados pequeños son muy inestables, porque están formados por un número pequeño de átomos y la pérdida de uno de ellos puede ocasionar su destrucción. A medida que disminuye la temperatura del líquido, los átomos pierden libertad de su movimiento, lo que da lugar a un aumento de la vida del conglomerado, coexistiendo al mismo tiempo un número mayor de ellos; este aumento en la vida del conglomerado está acompañado de un aumento gradual de su tamaño, si esta partícula alcanza un tamaño crítico, será considerada un núcleo, a partir del cual crecerán los cristales metálicos.

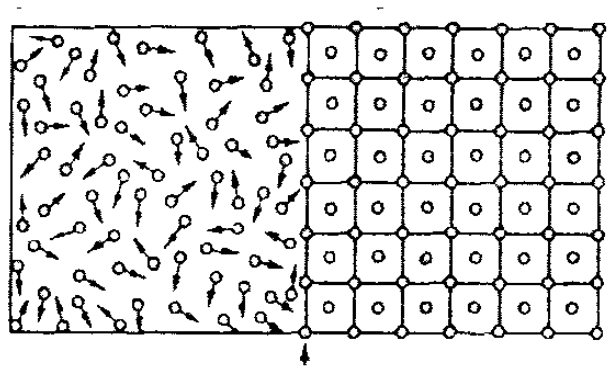
Existen dos procesos de nucleación [33]:

a) Nucleación homogénea, en este proceso la nueva fase sólida se forma uniformemente en todo el volumen de la fase líquida madre.

b) Nucleación heterogénea, en este proceso la nueva fase sólida no se forma en toda la fase madre, sino que busca sitios preferenciales para solidificar.

3.9 Solidificación en aleaciones de aluminio

El aluminio puro pierde su estructura cristalina cuando se calienta por arriba de su temperatura de fusión (660 °C). Los átomos están en completo desarreglo en el estado líquido, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.9.1, pero si son enfriados a la temperatura de solidificación, otra vez toman su posición en la red cristalina (ver Figura 3.9.2). Cada átomo de aluminio tiene una cantidad de energía asociada, la cual varía si está liquido o sólido [2, 34].



(a) (b)

Figura 3.9.1. Representación del acomodo y desarreglo de los átomos en su estado a) líquido y b) sólido [2]

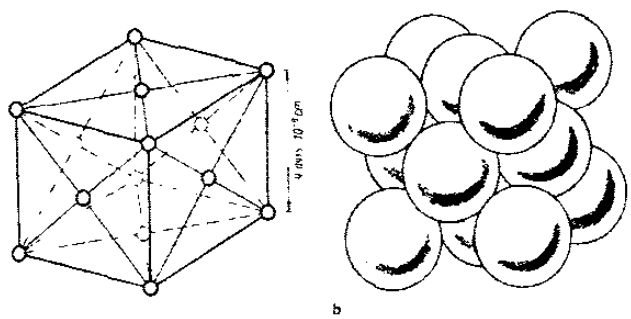


Figura 3.9.2 Estructura cristalina del aluminio [2]

La Figura 3.9.3 muestra esquemáticamente en 6 etapas la nucleación y crecimiento de los granos, durante la solidificación. El fondo negro corresponde a aluminio líquido, los cuadros blancos corresponden a una celda (ver Figura 3.9.2), en la

parte superior izquierda empieza la solidificación, en los cuales en la etapa 1 se han formado 7 cristales, de los cuales 6 han crecido a través del arreglo de celdas unitarias, las Figuras 2, 3 y 4 muestran el crecimiento de los cristales con el tiempo, hasta que finalmente en la etapa 5 casi todo el líquido se ha solidificado en granos, que después se juntan entre sí formando fronteras de grano como se muestra en la etapa 6. Durante la solidificación ocurre una serie de cambios que se describen mas adelante [2].

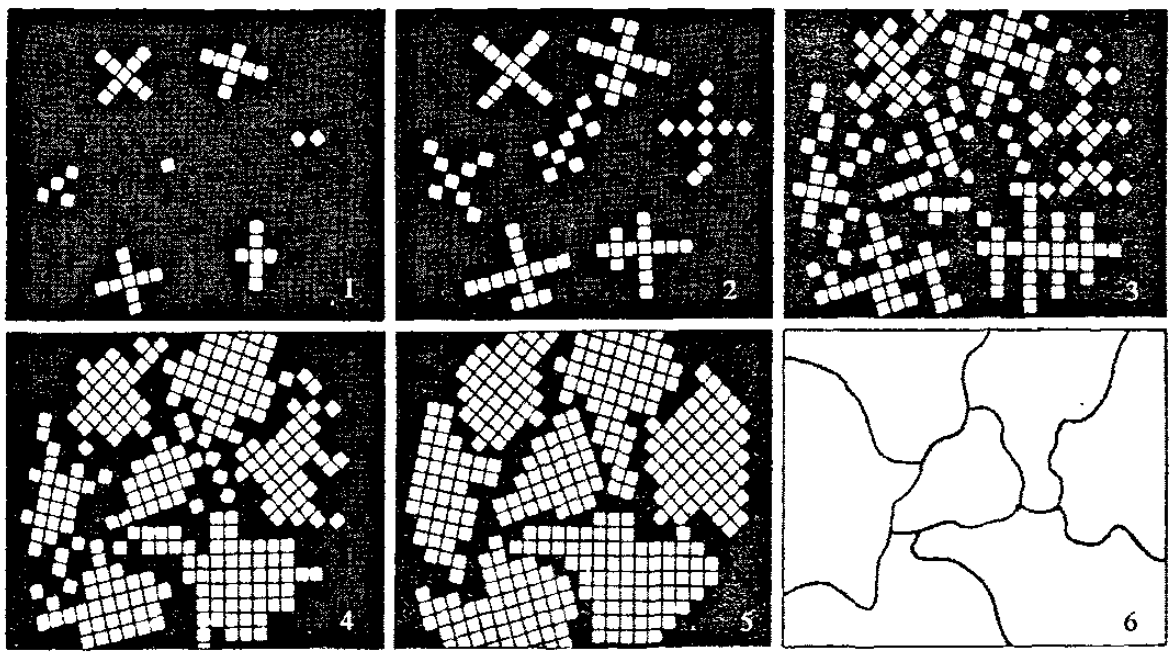


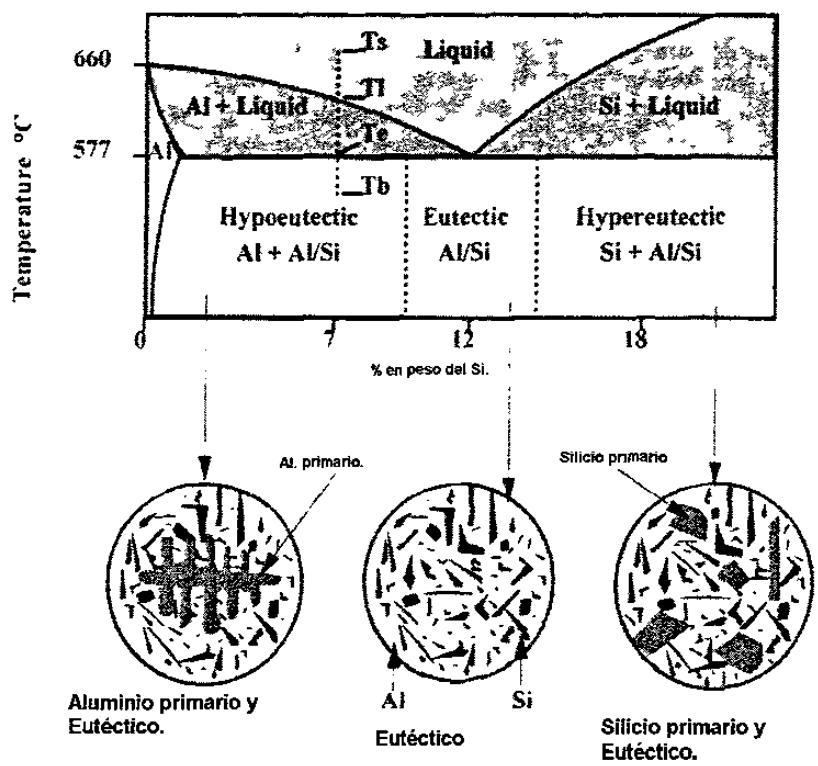
Figura 3.9.3. Representación de la solidificación de aluminio con 99.99 % de pureza [2]

3.10 Aleaciones Al-Si

Cuando solidifica una aleación de aluminio generalmente con contenido menor al 12 % de silicio, la primera fase a formar es aluminio (ver Figura 3.10.1), considerando una aleación conteniendo 7 % de silicio, en el enfriamiento de la fase líquida (Ts), el aluminio forma pequeñas dendritas (Figura 3.10.2) cuando la temperatura de solidificación (T1) se alcanza [2], esto debido a que es necesario cierto sub enfriamiento antes de la nucleación, la primera partícula sólida crecerá hacia el líquido subenfriado y el calor latente de solidificación podrá ser conducido hacia el líquido, así una partícula sólida que originalmente fue esférica desarrollará brazos en varias direcciones, como la

que se muestra en la Figura 3.10.2 [35]. La diferencia de temperaturas Ts-T1 es el sobrecalentamiento de fusión. La solidificación no ocurre a una sola temperatura [36], esta ocurre, en un intervalo y finaliza cuando se alcanza la temperatura del punto eutéctico (Te). La excepción, es el caso de las aleaciones de composición eutéctica (≈12 % ver Figura 3.10.1) donde la solidificación ocurre a la temperatura eutéctica. Siguiendo con el enfriamiento, la temperatura cae por debajo del punto de líquidus (T1), las dendritas de aluminio crecen más y son nucleadas hasta que la temperatura eutéctica se alcance [36].

Figura 3.10.1 Diagrama de fases para aluminio-silicio [36]



A la temperatura eutéctica, todo el líquido restante se congela o solidifica como una mezcla de fases (eutéctico). Mientras que otros compuestos intermetálicos se forman, tales como el $CuAl_2$, Mg_2Si se formarán a bajas temperaturas en aleaciones comerciales.

La solidificación libera calor y se esperaría ver una región plana en la gráfica de temperaturas en el análisis térmico (Figura 3.10.3). En la práctica, el enfriamiento por debajo del punto de la temperatura de solidificación es primordial para formar las primeras dendritas (ver Figura 3.10.2). Conforme crecen las dendritas, se libera calor y la temperatura se eleva. La caída de temperatura es llamada de sobreenfriamiento y es una medida de la dificultad de nucleación de las primeras dendritas. Las aleaciones con refinamiento de grano tienen muy bajo sobreenfriamiento comparadas con las aleaciones sin refinar ya que la acción del refinador de grano es ayudar a la nucleación. Siguiendo con la elevación de la temperatura, ésta caerá nuevamente mientras se extraiga el calor, será hasta que la temperatura eutéctica se alcance cuando se estabilice y la solidificación finalice [34, 36].

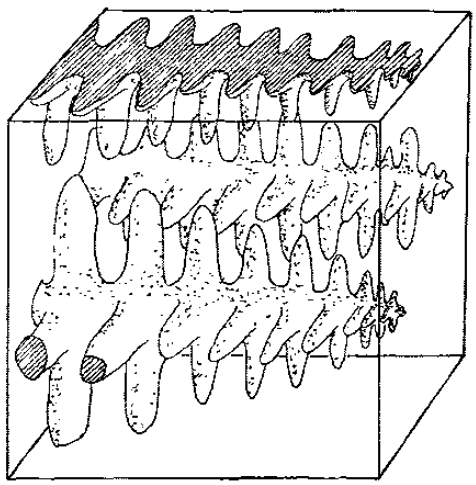


Figura 3.10.2 Formación de dendrita [34]

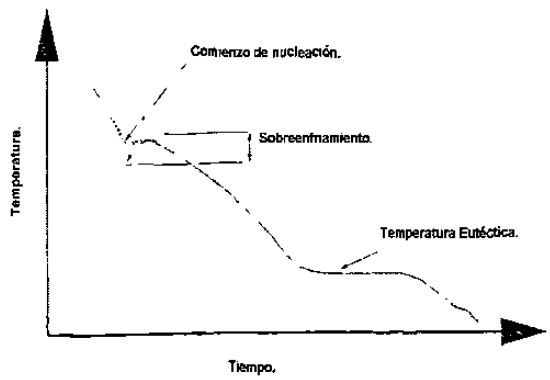


Figura 3.10.3 Gráfica de solidificación del análisis térmico [36]

3.11 Recalescencia

En la Figura 3.11.1 se observa en la curva de enfriamiento para un metal puro; para que la solidificación del metal inicie, tiene que sobreenfriarse por debajo de la temperatura de fusión y alcanzar la temperatura de nucleación. Después de que ocurre la nucleación a $T=T_{nucl}$, la temperatura sube rápidamente debido al calor latente desprendido durante la

solidificación. A este proceso se le conoce como recalescencia. Sin embargo, esta elevación de temperatura se detiene abruptamente cuando se alcanza la temperatura del punto de fusión, T_f. Ya que no puede haber sobrecalentamiento, la temperatura sólo se puede elevar por encima de T_f si se funde el sólido recién formado. El calor latente por si mismo es insuficiente para causar esta fusión y asi la elevación de la temperatura se detiene en T_f.

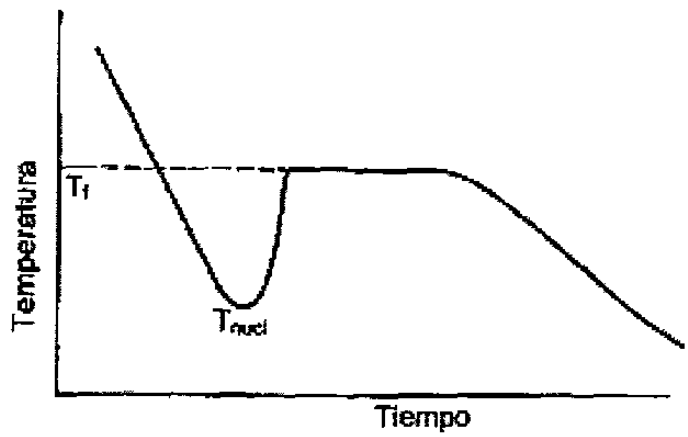


Figura 3.11.1Curva típica de enfrimiento que ilustra el sobrecalentamiento y la recalscencia de un metal puro [33]

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

Este trabajo consistió en determinar el grado de adhesión metálica entre dos aleaciones de aluminio, la A319.0 y la de la camisa de aluminio, la cual consiste de 23-26 % en peso de Si, 3.4-4.4 % de Cu, 0.8-1.2 % de Mg, < 0.3% de Fe y < 0.3 % de Mn. De este modo en este trabajo se referenciará a la aleación A319, como la aleación de aluminio y a su vez, la aleación de la camisa de Al se referenciará , simplemente como la aleación de la camisa. Las camisas de aluminio fueron tratadas mecánicamente para condicionar la rugosidad superficial de la cara externa, por medio de un proceso de granallado con partículas de carburo de silicio. También se acondicionó la superficie exterior con depositos de carbón. Para realizar las pruebas se diseñó un molde de arena en el cual se acopla la camisa (ya con el acabado superficial) y se vacía con la aleación A319.0. Una vez solidificada la pieza, se obtienen rebanadas o rodajas que se someten a una prueba de empuje.

4.2 Diseño del molde

La fabricación del molde de arena silica, se basó en un diseño de geometría sencilla. El molde consiste de un alimentador en el cual van colocados unos filtros cerámicos para atrapar impurezas y un cubo o cavidad donde va colocada una camisa de aluminio. La

fabricación del molde se realizó por medio de moldeo y apisonamiento manuales. La mezcla de arena silica se preparó con diferentes aditivos para darle la resistencia necesaria y una vez preparada la mezcla se procedió a vaciar el molde. Una vez calculado el sistema de alimentación y la cavidad donde se coloca la camisa (Figura 4.2.1), se procedió a realizar los trazos en madera y ensamblar las piezas para que quedaran como se muestra en la Figura 4.2.2

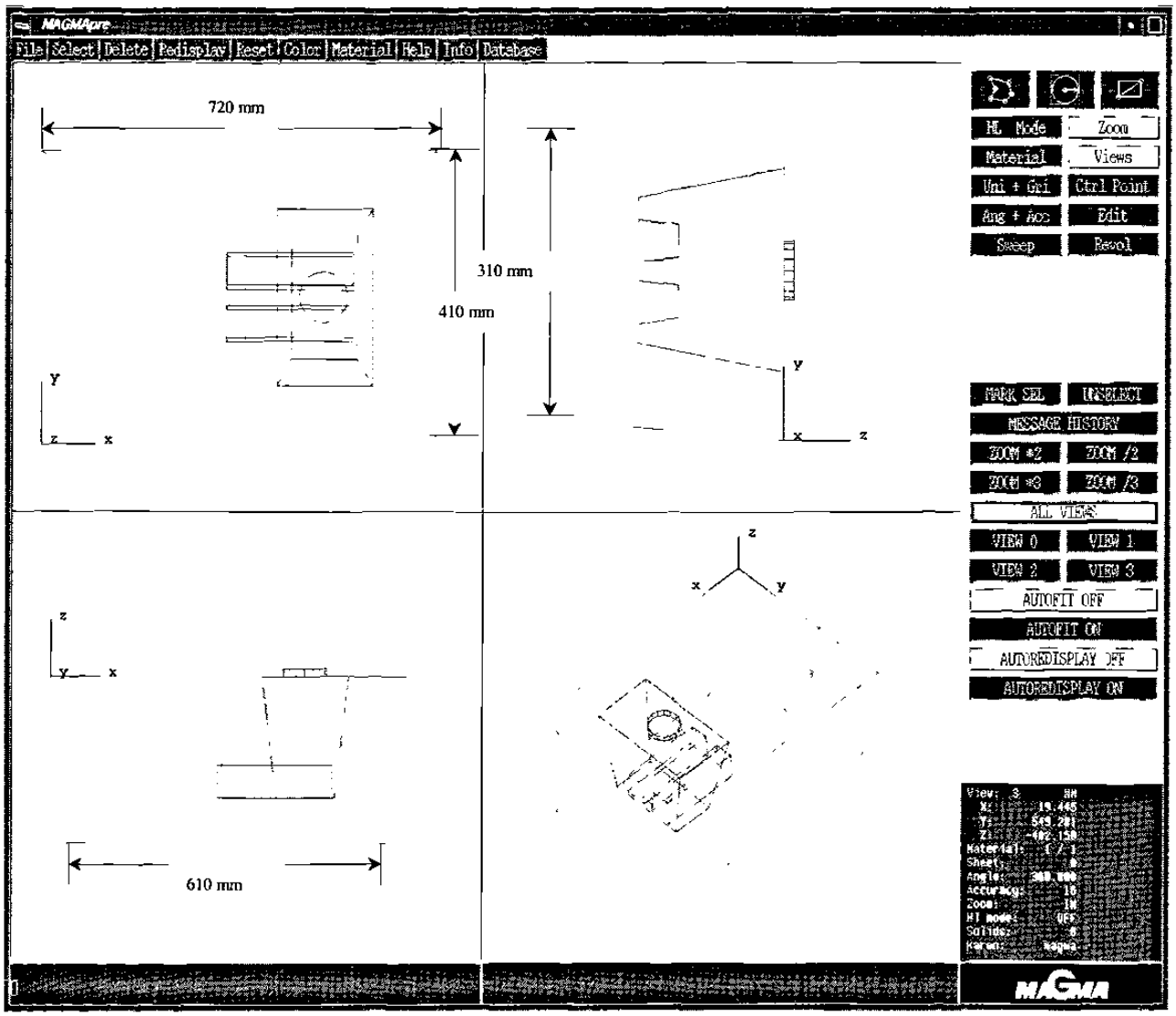


Figura 4.2.1 Diagrama del molde empleado

148617

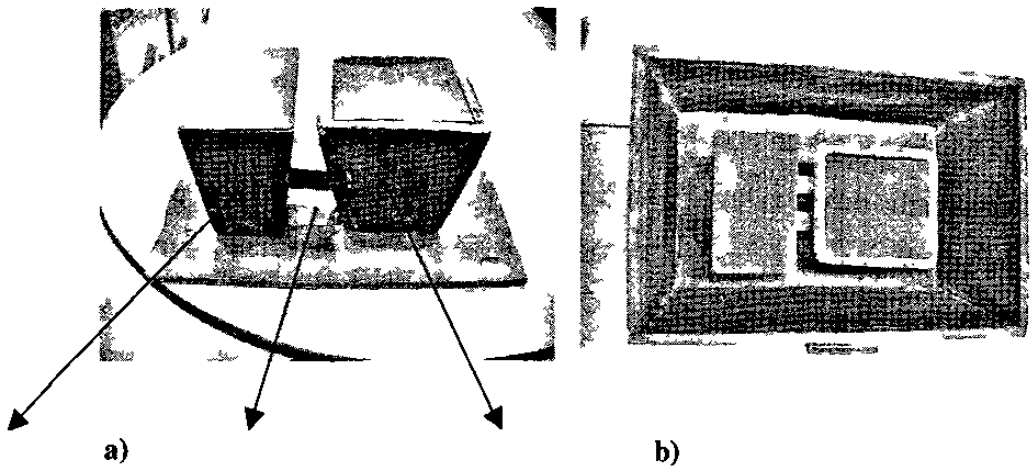


Figura 4.2.2 a) Piezas de madera para realizar molde de arena b) Se muestra como se encuentra posicionado el alimentador, entradas y cavidad

En la Figura 4.2.2a se muestran las piezas destinadas al alimentador, entradas y cavidad donde se coloca la camisa de aluminio, los espacios vacíos que se muestran en 4.2.2b, se llenan con la mezcla de arena.

El segundo paso es moldear con arena sílica, para esto se forma una cama de arena, para que asiente el sistema de alimentación y la cavidad, como se ve en la Figura 4.2.3. Posteriormente se colocó el sistema de alimentación y la cavidad donde se coloca la camisa como se muestra en la Figura 4.2.4a. Una vez ya colocados el sistema de alimentación y la cavidad, se rellena con la mezcla de arena e inmediatamente se apisona manualmente (Figura 4.2.4b). Se corre el riesgo de que el molde se rompa fácilmente durante el manejo del mismo si no se apisona inmediatamente.

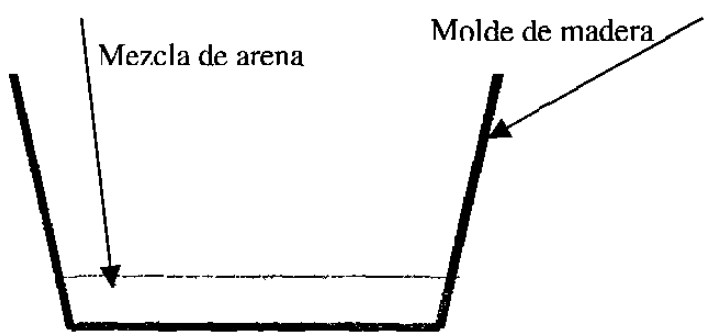
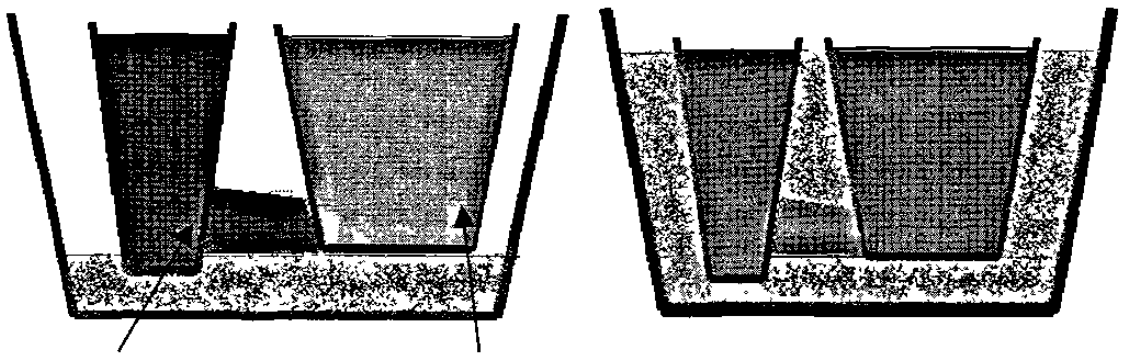


Figura 4.2.3 Preparación de cama de arena en el molde de madera

El molde una vez lleno de arena queda de la forma que se muestra en la Figura 4.2.5. Una vez ya lleno de la mezcla de arena se deja fraguar durante un período de 10 a 30 minutos, según sea la temperatura del medio. A mayor temperatura, menor será el tiempo de fraguado. Una vez fraguada la arena, se procede a desmoldar el sistema de alimentación y la cavidad donde se coloca la camisa, quedando tal y como se muestra en la Figura 4.2.6.



a) b)

Figura 4.2.4 a) Colocación de sistema de alimentación, y cavidad b) Cavidad y sistema de alimentación rodeados de arena

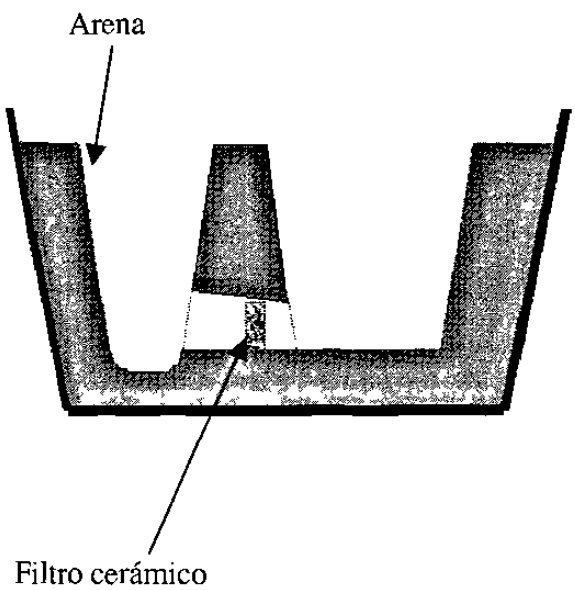


Figura 4.2.5 Sección del molde de arena

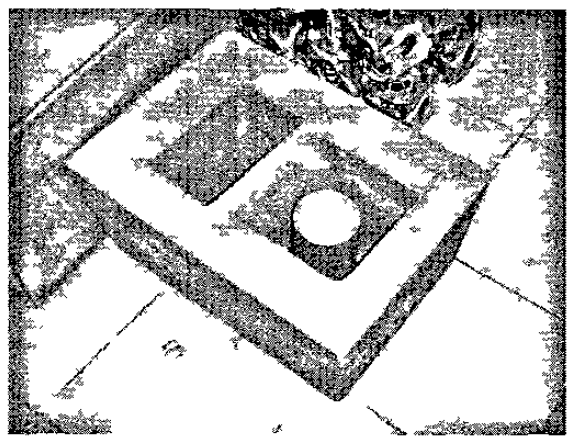


Figura 4.2.6 Molde de arena ya terminado

En las Figuras 4.2.6 y 4.2.7, se aprecia el sistema de alimentación y la camisa ya colocada en el molde de arena. La cavidad donde se coloca la camisa y el alimentador tienen forma de cuña para facilitar su desmolde.

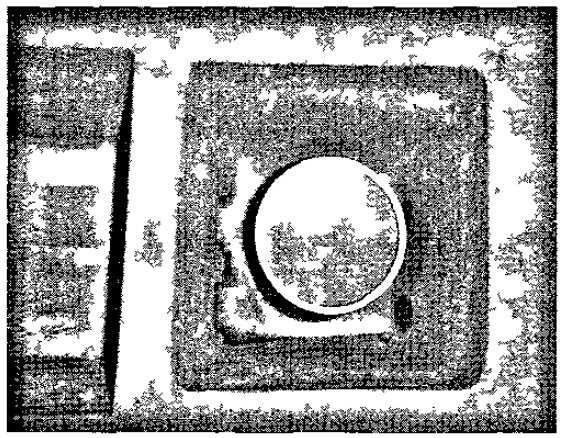


Figura 4.2.7 Camisa de aluminio ya colocada en molde de arena

4.3 Rugosidad de las camisas

Se tomó una camisa de aluminio y se trazaron una serie de líneas de 1 cm de longitud. Para que las mediciones fueran representativas se realizaron 9 trazos en la superficie de la camisa a tres alturas, espaciadas entre si 120°, como se muestra en la Figura 4.3.1.

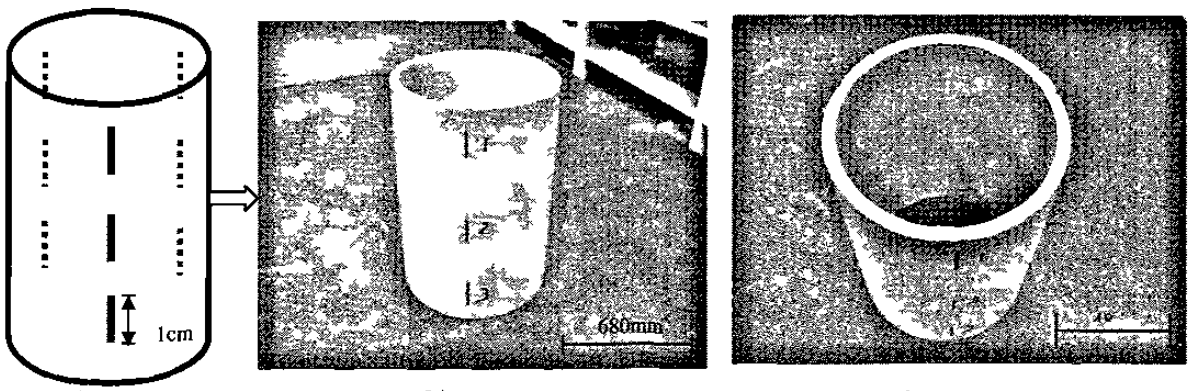
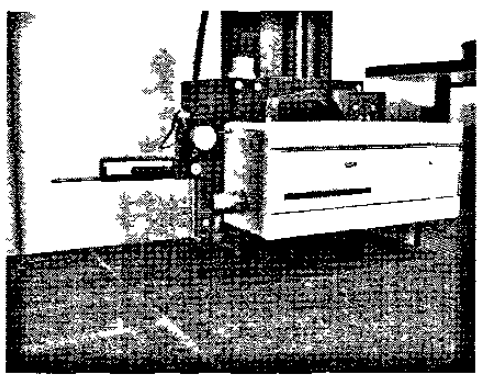
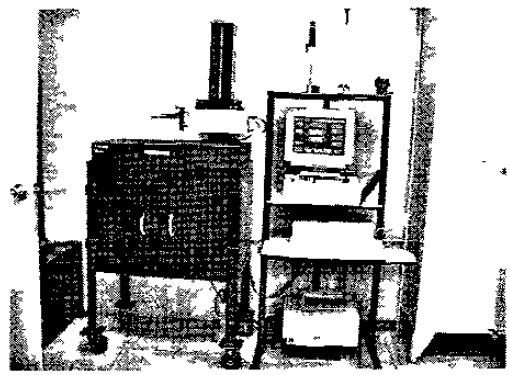


Figura 4.3.1 a) Camisa trazada. b) y c) Trazos en camisa.

Una vez marcados los trazos se procedió a medir el perfil de rugosidad utilizando un rugosímetro Taylor Hobson Talysurf Series 2, como el que se muestra en la Figura 4.3.2. El equipo empleado tiene una resolución de 12, 24 ó 30 nm según sea el intervalo de barrido de 10, 20 o 25 mm. El palpador usado es de punta de diamante 112/2619 con un radio de 1.5-2.5μm empleando una fuerza vertical del palpador de 0.7-1 mN. Las mediciones se realizaron colocando la camisa en forma horizontal y posteriormente alineando la superficie a medir de la camisa con el eje horizontal del rugosímetro. Este procedimiento se presenta paso a paso en las Figuras 4.3.3 y 4.3.4. Una vez terminado el barrido, el programa del rugosímetro genera el perfil que se muestra en la Figura 4.3.4 b.

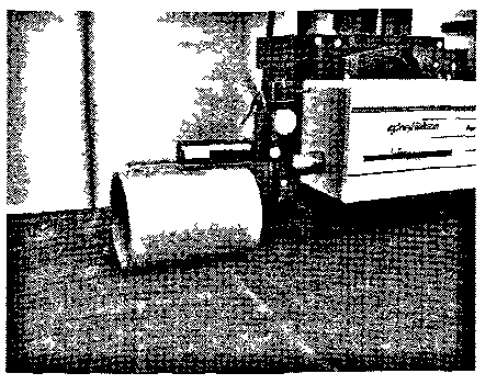


a)

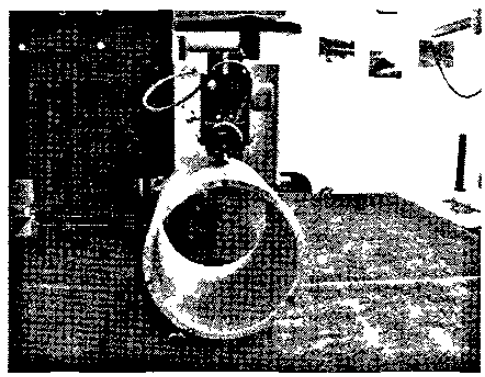


b)

Figura 4.3.2 a) Unidad transversal del rugosímetro b) Equipo completo del rugosímetro (cortesía de Nemak)

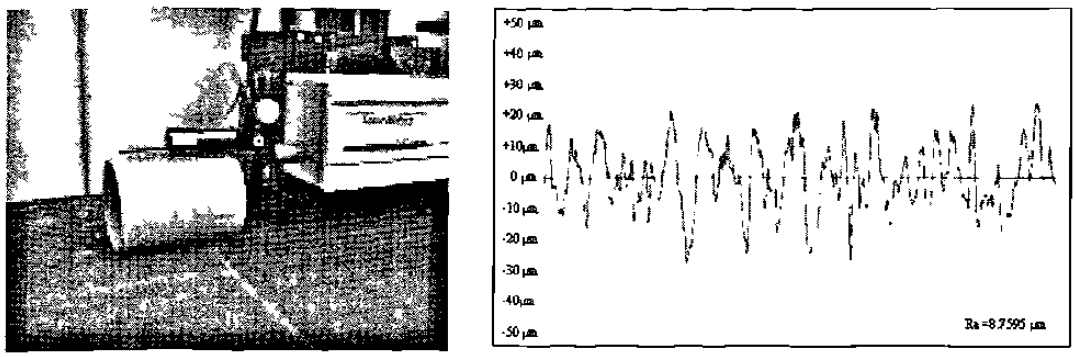


a)



b)

Figura 4.3.3 a) Colocación de camisa horizontalmente b) Alineación de la camisa con el rugosímetro (cortesía de Nemak)

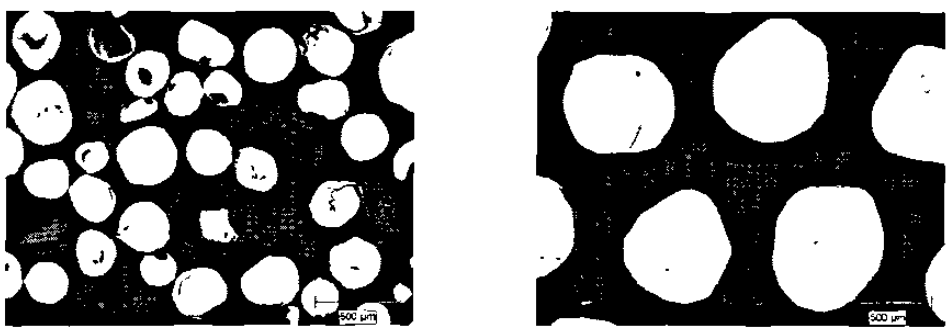


a) b)

Figura 4.3.4 a) Barrido de la camisa. b) Perfil obtenido por el barrido. (cortesía de Nemak)

4.4 Granallado de las camisas

La rugosidad de las camisas se modificó mecánicamente mediante granallado. Para esto se emplearon partículas finas y gruesas, por lo que en este trabajo se les denominará como granallado ligero y severo. Todas las camisas recibieron el mismo tiempo de exposición de granallado. En la Figura 4.4.1 y 4.4.2 se puede ver como se van introduciendo las camisas a la máquina de granallado ligero y severo. El granallado ligero se realizó empleando partículas redondas de carburo de silicio de 320 µm de diámetro promedio (ver Figura 4.4.1a). Para el granallado severo se empleó partículas de 660 µm de diámetro promedio (ver Figura 4.4.1b). Se presenta en las Figuras 4.4.2 y 4.4.3 la introducción de las camisas a la maquina de granallado. Se presenta en las Figuras 4.4.1 y 4.4.2 la introducción de las camisas a la maquina de granallado.



a) b)

Figura 4.4.1 a) Particula de SiC para granalla ligera. b) Particula de SiC para granalla severa.

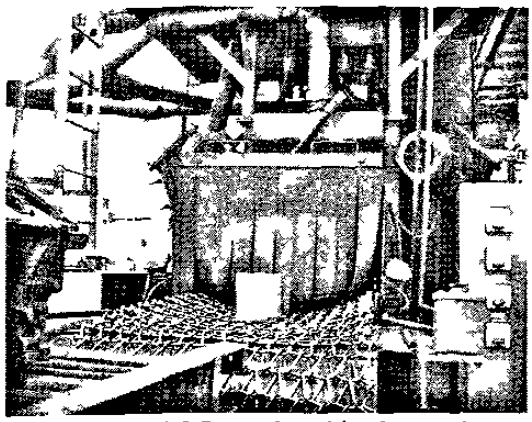


Figura 4.4.2 Introducción de camisas a máquina de granallado ligero (cortesía NEMAK)

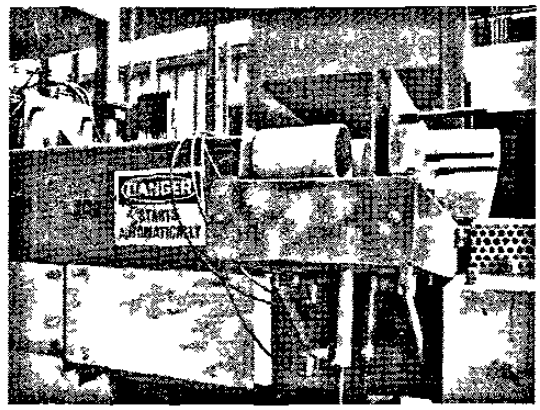


Figura 4.4.3 Introducción de las camisas a la máquina de granalla severo (cortesía NEMAK)

4.5 Recubrimiento de camisas

El negro de humo o ahumado es carbón finamente dividido que contiene hidrógeno, oxigeno, nitrógeno y azufre con una estructura semejante a la del grafito; es un buen adsorbente. Se obtiene de la combustión incompleta de mezclas de hidrocarburos. El recubrimiento de las camisas que se utilizará le llamaremos ahumado, el cual consiste en depositar una capa de carbón uniformemente distribuida en la superficie externa de la camisa. Para ahumar las camisas se utilizó un soplete usando solamente acetileno con el fin de obtener una flama carburante y que deposite hollín en la superficie. En la Figura 4.5.1 se puede ver como se está ahumando una camisa.

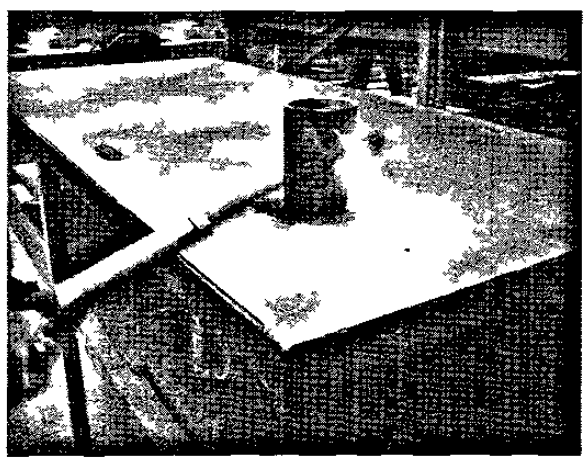


Figura 4.5.1. Ahumado de camisa

4.6 Procedimiento de vaciado

La obtención de los cubos de aluminio con la camisa en el interior se llevó a cabo vaciando manualmente en el molde de arena. El vaciado se realizó de acuerdo con las consideraciones que se detallan a continuación.

La estructura de silicio se modifica químicamente con estroncio. La adición de estroncio se realiza en una olla de 1.5 toneladas de peso. Este procedimiento se lleva a cabo en la estación desgasificadora. Una vez ahí se agrega "Master Alloy" de estroncio, con el fin de obtener 170 ppm de estroncio. Inmediatamente después de la modificación con estroncio, se desgasifica el metal (reducir el contenido de hidrógeno) al inyectarle nitrógeno. La olla en la parte inferior cuenta con dos entradas para nitrógeno que hacen pasar el gas por dos filtros porosos para ayudar a disipar el flujo y obtener burbujas de 2-5 mm de tamaño. En la Figura 4.6.1, se muestra un esquema de una olla desgasificadora.

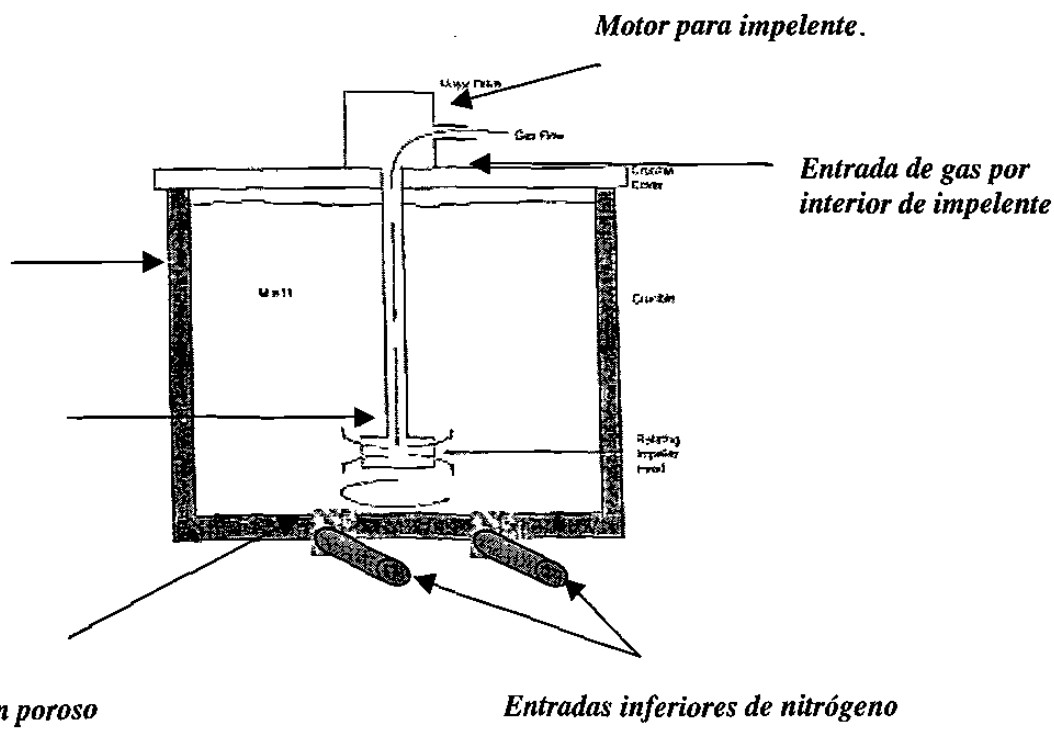


Figura 4.6.1 Olla desgasificadora.

El ciclo de desgasificado consiste en inyectar nitrógeno por las entradas correspondientes y hacer girar el impelente a 500 RPM por espacio de 15 minutos, esto se mantuvo en todas las condiciones de vaciado. Una vez terminado el ciclo se procedió a vaciar manualmente con vasos de hierro recubiertos de pintura de grafito, la representación del vaciado se muestra en las Figuras 4.6.2 y 4.6.3. Una vez ya completado el vaciado, se deja solidificar alrededor de 15 min.

Una vez ya solidificada la pieza en el molde de arena; queda de la forma que se muestra en la Figura 4.6.4. La pieza solidificada se separa del sistema de alimentación y el cubo que contiene a la camisa, se manda a maquinar.

Figura 4.6.2 Vaciado del molde

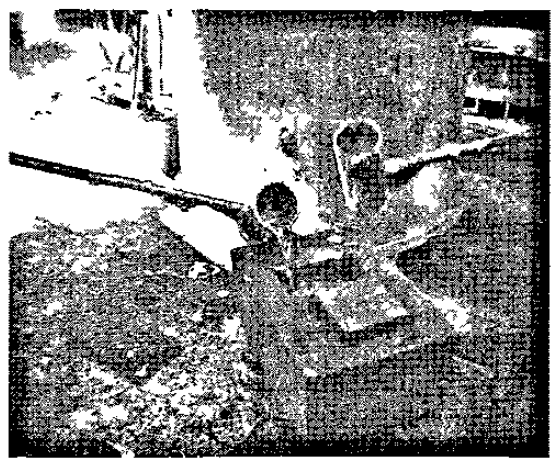
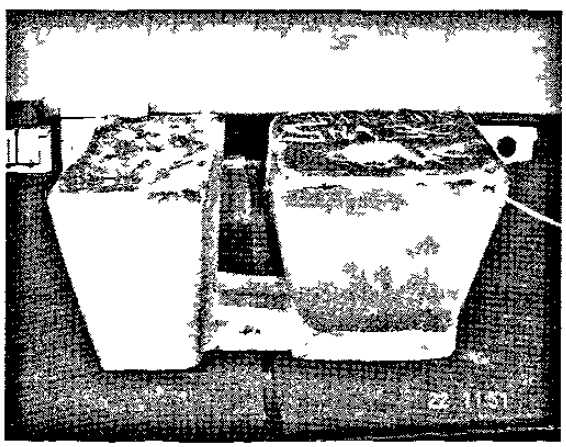
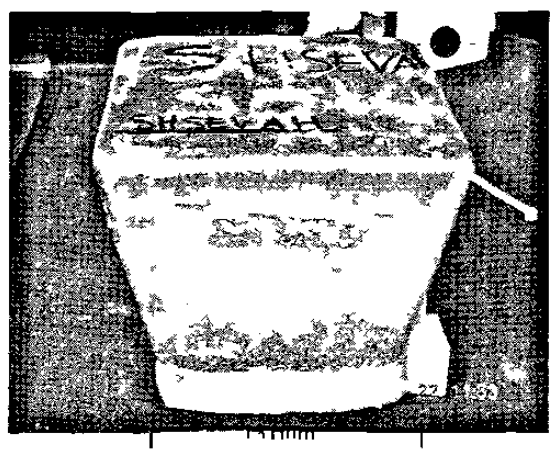


Figura 4.6.3. Llenado completo del molde



a)



b)

Figura 4.6.4 Pieza solidificada a) Pieza con sistema de alimentación. b) Pieza donde se encuentra la camisa con sistema de alimentación ya cortado.

4.7 Preparación de las piezas vaciadas

Se maquina el "casting" como se muestra en la Figura 4.7.1. Posteriormente la pieza resultante es seccionada en rebanadas, de aproximadamente 2.5 cm de espesor, tal como se muestra en la Figura 4.7.2. Estas se pulen en papel de carburo de silicio 60, 180, 320, 500, 800, 1200, 2400 y alúmina de 3 μm en paño, con el fin de observar la interfase y asegurar la planitud necesaria para las pruebas mecánicas. Cabe recalcar que a cada pieza se le midió la planitud con un vernier calibrado en todas las caras de la pieza hasta tener un error dentro del $\pm$ 5%. Las tablas 4.1 y 4.2 señalan las diferentes muestras preparadas, indicando la condición de granallado y recubrimiento. Las temperaturas reales de vaciado, para cada condición se presentan en la Tabla 4.3. La temperatura programada de de vaciado fue de 730°C $\pm$ 15°C.

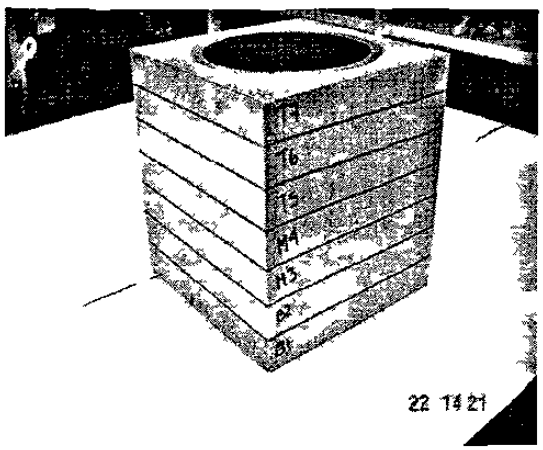


Figura 4.7.1 Pieza maquinada ya trazada

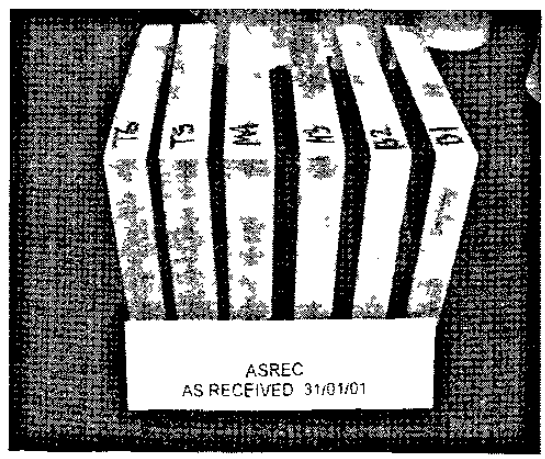


Figura 4.7.2 Pieza cortada y pulida

Tabla 4.1 Identificación de muestras, condición sin ahumar

			Espesor de cada rodaja (mm)											
Descripción	Identificación	No. de rodajas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CONDICION NORMAL SIN AHUMAR														
Normal como se recibe sin ahumar- 1	1-1-1	6	19	18.1	18.9	20.5	21	18.4						
Normal como se recibe sin ahumar -2	1-1-2	7	16.6	17.3	16.8	15.5	16.2	14	22.7					
Nomal como se recibe sin ahumar -3	1-1-3	7	16.3	16.0	15.8	16.3	15.2	15.3	15.8					
CONDICION GRANALLADO NORMAL SIN AHUMAR														
Granallado normal sin ahumar -1	1-2-1	6	18.3	15.3	16	15.6	16.3	15.8						
Granallado normal sin ahumar -2	1-2-2	6	20.7	18.1	17.7	19.9	17.9	20.7						
Granallado normal sin ahumar -3	1-2-3	12	12.4	9.04	8.16	16.4	8.18	9.65	7.43	8.65	9.19	7.88	8.03	7.55
CONDICION : GRANALLADO SEVERO SIN AHUMAR														
Granallado severo sin ahumar -1	1-3-1	6	18	16.8	19.1	18.6	19	18.8						
Granallado severo sin ahumar -2	1-3-2	8	15.1	16.1	14.6	15.2	15.2	14.3	14.1	8.08				

Tabla 4.2 Identificación de muestras, condición ahumado

			Espesor de cada rodaja (mm)											
Descripción	Identificación	No. de rodajas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CONDICION NORMAL AHUMADO														
Normal como se recibe ahumado -1	2-1-1	3	40.2	37.8	36.6									
Normal como se recibe ahumado -2	2-1-2	6	18.3	17.0	15.9	17.5	16.6	18.6						
CONDICIÓN: GRANALLADO NORMAL AHUMADO														
Granallado normal ahumado -1	2-2-1	5	25.2	22.7	24.3	24.0	10.9							
Granallado normal ahumado -2	2-2-2	6	19.4	21.0	18.4	18.4	18.6	20.7						
Granallado normal ahumado -3	2-2-3	7	18.0	15.9	15.9	17.3	15.8	14.3	20.9					
CONDICION : GRANALLADO SEVERO AHUMADO														
Granallado severo ahumado -1	2-3-1	3	41.6	41.0	41.0									
Granallado severo ahumado -2	2-3-2	6	18.6	18.5	20.9	22.3	18.6	18.6						

Tabla 4.3 Temperaturas de vaciado

Sin ahumar		Ahumado	
Probeta	**Temperatura (°C)**	**Probeta**	**Temperatura (°C)**
1-1-1	730	2-1-1	730
1-1-2	740	2-1-2	740
1-1-3	715	2-1-3	715
1-2-1	720	2-2-1	720
1-2-2	725	2-2-2	725
1-2-3	725	2-2-3	725
1-3-1	715	2-3-1	715
1-3-2	730	2-3-2	730

4.8 Pruebas Mecánicas

Las piezas o rodajas ya pulidas, se colocan en el dispositivo para realizar la prueba de empuje. Esta se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos mecánicos marca SATEC, modelo T20000 con tope de carga de 10000 kg. La prueba se realizó adaptando un par de herramentales (punzón y dado) especialmente diseñados para ésta experimentación. El punzón y el dado se acoplan a la máquina universal, colocando la muestra en la base. En las Figuras 4.8.1, 4.8.2 y 4.8.3 se describe el proceso.

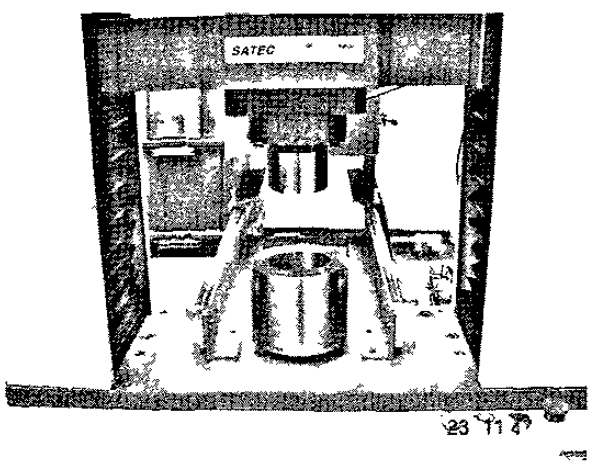


Figura 4.8.1 Acople de punzón y dado a la máquina de ensayos[cortesía Nemak]

Figura 4.8.2. Posicionamiento del punzón con la pieza.

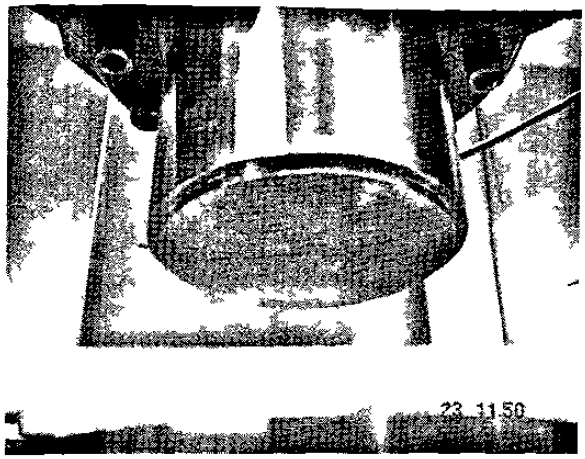


Figura 4.8.3. Perfil del punzón, para evitar deslizamiento de la pieza al momento de la prueba

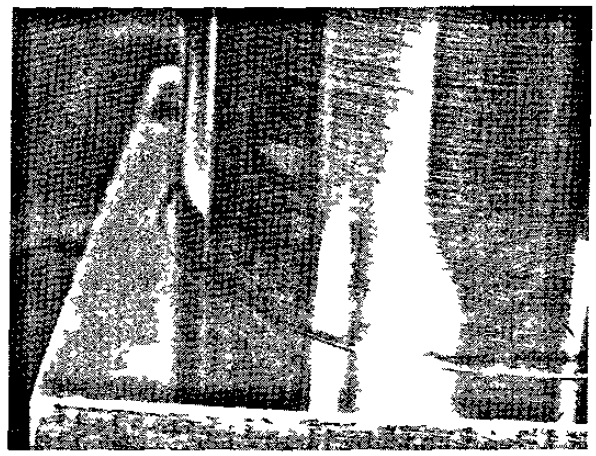
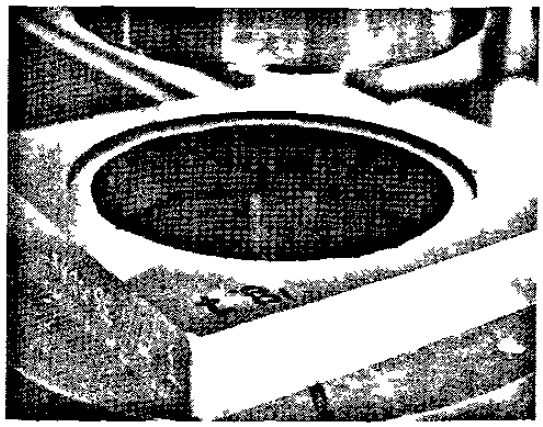


Figura 4.8.4 Punzón en posición de prueba de empuje

Una vez ya acoplada la pieza y alineada, sé inicia la aplicación de carga mediante el paquete de computo de la máquina universal. Los parámetros utilizados son: Velocidad de carga 0.35 mm/min siendo el límite de carga 9500 Kg. Durante la prueba, el punzón sólo desplaza a la camisa, como lo muestra la Figura 4.8.4. La prueba finaliza cuando se alcanza un desplazamiento de 2.5 mm en la camisa o cuando la carga alcanza los 9500 Kg. El paquete computacional de la máquina almacena todos los valores de carga, posición y tiempo. En la Figura 4.8.6 se muestra una vista general del equipo empleado.



4.8.5 Prueba finalizada, se muestra el desplazamiento que sufrió la camisa

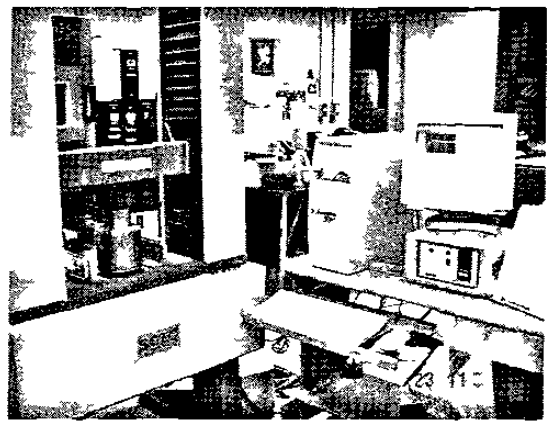


Figura 4.8.6 Equipo usado para la prueba mecánica [cortesía Nemak]

4.9 Obtención de temperaturas de vaciado a diferentes alturas.

Se vaciaron tres pruebas adicionales para obtener el perfil de temperatura al llenar el molde experimental, las temperaturas de vaciado fueron 680°C, 720°C y 740°C. Para esto se utilizó el mismo corazón de arena empleado anteriormente y el mismo tipo de camisa de Al. Se hicieron 5 agujeros al corazón de arena, separados una distancia de 2.5 cm desde la base y se colocaron termopares tipo K. Esto se aprecia en las Figuras 4.8.7 y 4.8.8. Para la obtención de datos se utilizo un programa y equipo diseñados para la adquisición de datos [refcolas], como se muestra en la Figura 4.8.9. Posteriormente cada muestra se cortó a la altura del termopar y se pulió para determinar cualitativamente el grado de adhesión metálica entre la camisa y la aleación A319.0, así como la microestructura de la aleación de aluminio.

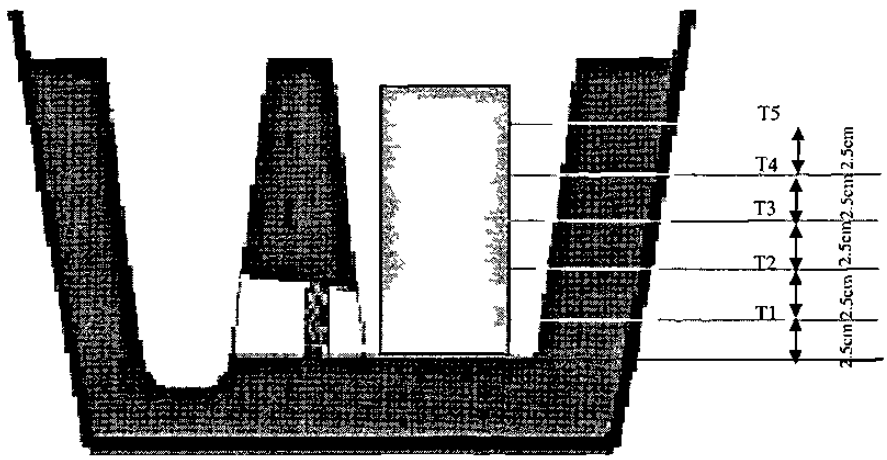


Figura 4.8.7 Corazón de arena con los termopares puestos a una distancia de 2.5 cm

Figura 4.8.8 Corazón de arena y camisa de aluminio, en donde se aprecian los termopares a diferentes alturas.

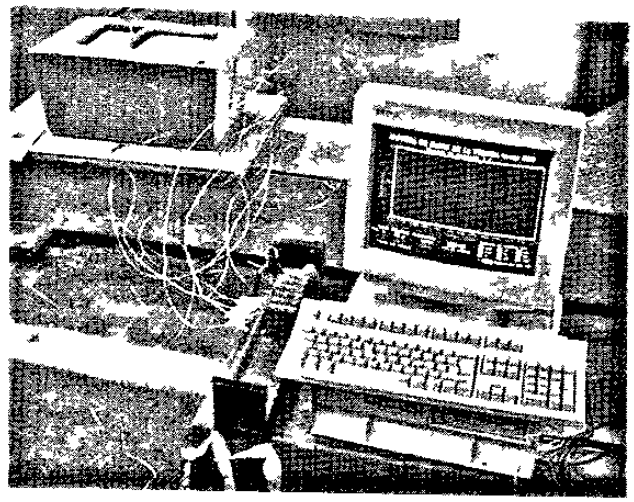


Figura 4.8.9 Equipo de adquisición de datos [refcolas]

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de empuje, el análisis de las curvas carga contra desplazamiento y los valores de rugosidad en las diferentes camisas, se incluyen las pruebas en las que se registraron los perfiles térmicos durante el llenado de la pieza.

5.2 Valores de rugosidad

Se obtuvo la rugosidad promedio (Ra) a partir de las nueve mediciones realizadas del perfil de rugosidad, correspondientes a los puntos trazados alrededor de la camisa. El valor de Ra corresponde al área entre el perfil de rugosidad y su línea, o la integral del valor absoluto de la altura del perfil de rugosidad sobre la longitud evaluada. Es decir :

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |r(x)|\,\mathrm{d}\,x$$

Ra es una integral del valor absoluto del perfil de rugosidad. Ra, es el área sombreada dividida por la longitud evaluada, L. La Figura 5.2.1 muestra el perfil de rugosidad con el cual se calcula un Ra promedio.

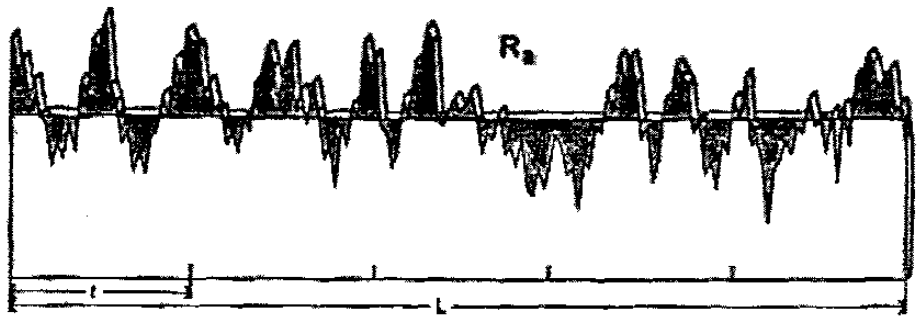
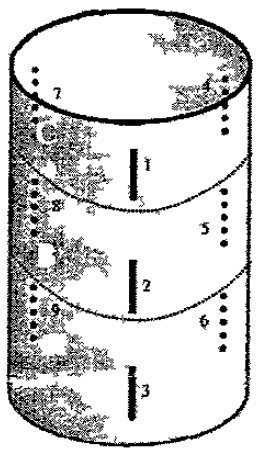
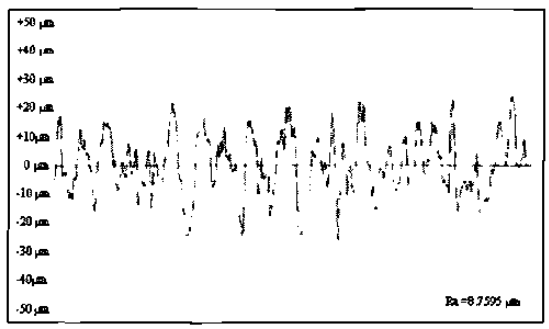


Figura5.2.1 Perfil de rugosidad

En la Figura 5.2.2 se muestra la distribución de los puntos tomados de la camisa, los cuales se dividen en tres partes A, B y C, además se presenta un perfil de rugosidad medido en un punto de la camisa. Las camisas fueron sometidas a tres condiciones de acabado superficial, con el fin de variar la rugosidad. Las condiciones fueron las siguientes: 1) normal como se recibe 2) con granallado ligero y 3) con granallado severo.





b)

Parte	Punto I	Punto II	Punto III
A	3	6	9
B	2	5	8
C	1	4	7

a)

Figura 5.2.2 a) Distribución de los 9 trazos alrededor de la camisa dividida en tres partes A, B y C. b) Perfil de rugosidad medido en un punto de la camisa

En las Tablas 5.1 a 5.6 se presenta el promedio y la desviación estándar (S) para cada prueba. Cabe destacar que el perfil de rugosidad en las camisas ahumadas se obtuvo antes de depositar la capa de carbón. En el Anexo 1 se presentan los perfiles de rugosidad registrados. Los valores de rugosidad presentados en las Tablas 5.1 y 5.4 corresponden a la condición normal sin ahumar y con ahumado. Además se realizaron dos mediciones adicionales A1 y B1 que se presentan en la Tabla 5.1 (las camisas denominadas A1 y B1 no se vaciaron). En la Figura 5.2.3 se graficaron los promedio de cada probeta de la condición normal, esto con un nivel de confiabilidad del 95%. A partir de esta figura se observa se la inconsistencia en el acabado superficial que se tiene del proveedor en la manufactura de las camisas.

En las Tablas 5.2 y 5.5 se presentan los valores de Ra correspondientes a la condición de granallado ligero sin ahumar y ahumado respectivamente. Además de estas mediciones se realizaron dos mediciones adicionales de ésta condición, A2 y B2 que se presentan en la Tabla 5.2. Los valores promedio de Ra en esta condición, varían desde 6.44 μm a 7.96 μm, y su variación se aprecia en la Figura 5.2.4, la cual fue construida con un nivel de confiabilidad del 95%

Los valores de Ra promedio correspondientes a la condición de granallado severo sin ahumar y con ahumado se presentan en las Tablas 5.3 y 5.6 respectivamente. Además de estos valores se realizaron 2 mediciones adicionales A3 y B3 presentados en la Tabla 5.3 (estas camisas no se vaciaron). Los valores de Ra promedio varían desde 14.07 μm a 16.35 μm y su variación se presenta en la Figura 5.2.5.

Tabla 5.1 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición normal sin ahumar.

Probeta condición normal						
Zona	**Punto**	**1-1-1(μm)**	**1-1-2 (μm)**	**1-1-3 (μm)**	**A1(μm)**	**B1(μm)**
A	3	6.5816	8.4896	7.2841	10.4440	5.8258
	6	6.0704	8.9256	9.4229	8.0839	5.8014
	9	6.6613	9.1636	8.5626	9.0840	6.2029
B	2	5.8258	9.4329	6.8767	8.5020	5.6810
	5	5.8014	9.4068	7.666	9.9419	5.7554
	8	6.2029	8.958	9.0015	9.8956	6.6703
C	1	5.8652	8.7766	7.8167	8.4970	6.6613
	4	5.7554	9.8935	7.9856	9.2503	6.5816
	7	6.6703	8.8454	7.8063	9.1767	6.0704
X		**6.1594**	**9.0991**	**8.0469**	**9.2078**	**6.1389**
S		**0.3857**	**0.4229**	**0.8125**	**0.7766**	**0.4075**

Tabla 5.2 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición granallado ligero sin ahumar

Probeta granallado ligero						
Zona	**Punto**	**1-2-1 (μm)**	**1-2-2 (μm)**	**1-2-3 (μm)**	**A2 (μm)**	**B2 (μm)**
A	3	6.288	7.5009	7.9418	7.5041	6.9257
	6	7.0755	6.1275	6.7966	6.6495	8.9638
	9	7.3426	6.8147	6.6485	6.7945	6.6665
B	2	7.1538	7.2152	6.6029	7.4593	6.8264
	5	6.7123	5.5933	6.0208	7.1652	10.7390
	8	7.1683	6.2862	5.6861	7.8659	7.3389
C	1	6.6876	6.4176	7.7869	6.9474	6.7809
	4	8.1768	6.0198	6.6722	8.8462	8.8551
	7	5.7869	6.0074	6.5906	7.9559	6.5041
X		**6.9324**	**6.4425**	**6.7496**	**7.4653**	**7.7334**
S		**0.6780**	**0.6193**	**0.7266**	**0.6877**	**1.4574**

Tabla 5.3 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición granallado severo sin ahumar

Probeta condición severo					
Zona	**Punto**	**1-3-1 (μm)**	**1-3-2 (μm)**	**A3(μm)**	**B3 (μm)**
A	3	16.0324	14.4406	14.4958	17.6477
	6	12.6837	17.1158	16.5041	17.3404
	9	11.1234	16.8591	15.3016	16.1900
B	2	15.5931	14.0178	16.5467	14.9622
	5	16.9065	17.0589	14.9713	16.2274
	8	12.1037	11.0005	14.7935	14.3671
C	1	15.7441	15.3269	17.1140	17.1503
	4	12.2125	12.9587	15.3685	16.5774
	7	14.3114	11.1746	16.4700	16.7691
X		**14.0790**	**14.4392**	**15.7295**	**16.3591**
S		**2.0915**	**2.3854**	**0.9367**	**1.0857**

Tabla 5.4 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición normal ahumado

Probeta condición normal ahumado			
Zona	**Punto**	**2-1-1 (μm)**	**2-1-2(μm)**
A	3	6.8202	7.9031
	6	8.1384	7.4255
	9	6.4252	7.1356
B	2	8.3712	7.7254
	5	9.1556	7.4861
	8	7.1452	7.3314
C	1	7.6538	7.386
	4	8.139	6.6248
	7	7.11	7.0114
X		**7.6621**	**7.3366**
S		**0.8659**	**0.3803**

Tabla 5.5 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición granallado normal ahumado.

Probeta condición granallado ligero ahumado				
Parte	**Punto**	**2-2-1(μm)**	**2-2-2(μm)**	**2-2-3(μm)**
A	3	6.906	7.609	8.5132
	6	7.3808	9.0694	7.7211
	9	6.1062	6.4766	8.7691
B	2	8.5065	7.4862	7.753
	5	7.6987	8.6619	8.6629
	8	6.4936	7.8107	7.6585
C	1	8.7478	8.1835	7.4533
	4	7.2394	8.4175	6.2452
	7	7.1781	6.6996	8.8982
X		**7.3619**	**7.8238**	**7.9638**
S		**0.8611**	**0.8642**	**0.8457**

Tabla 5.6 Valores de rugosidad promedio correspondientes a la condición granallado severo ahumado .

Probeta condición granallado severo ahumado			
Zona	**Punto**	**2-3-1 (μm)**	**2-3-2(μm)**
A	3	13.4441	14.0042
	6	13.1097	16.3193
	9	13.8671	13.7013
B	2	14.5834	14.5049
	5	14.9733	14.2414
	8	14.9961	14.7464
C	1	15.079	14.8534
	4	18.0535	16.7019
	7	14.2955	13.7183
X		**14.7113**	**14.7545**
S		**1.4373**	**1.0794**

Tabla 5.7 Valores de Ra promedio por condición

Condición	X (um)	S
Normal	7.73	1.51
Granallado ligero	7.06	0.53
Granallado severo	15.15	1.07

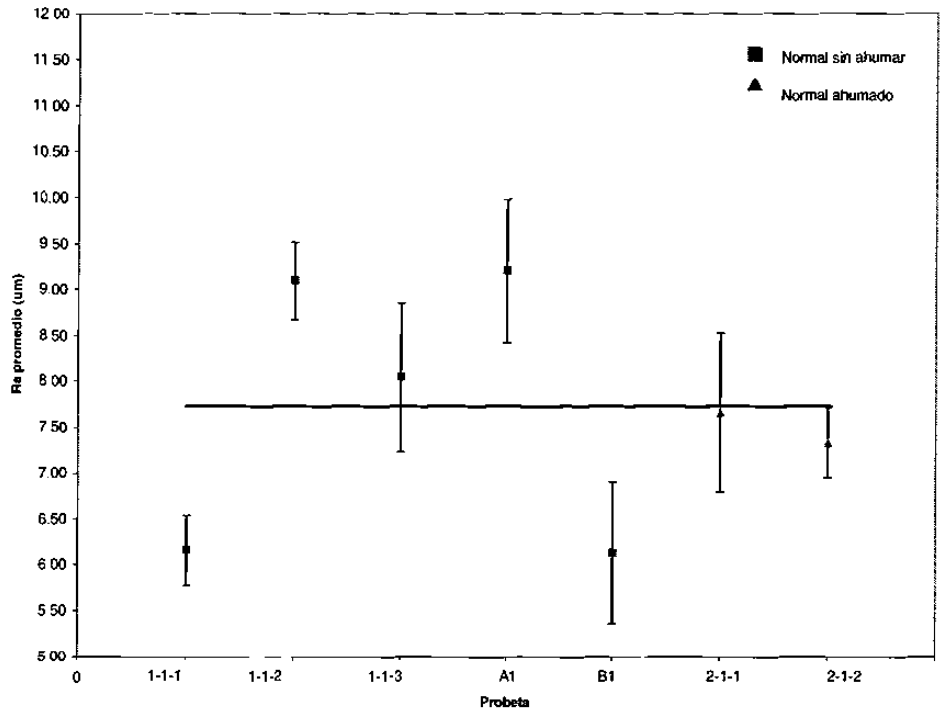


Figura 5.2.3 Variación de los valores de Ra promedio para las probetas que presentan condición normal

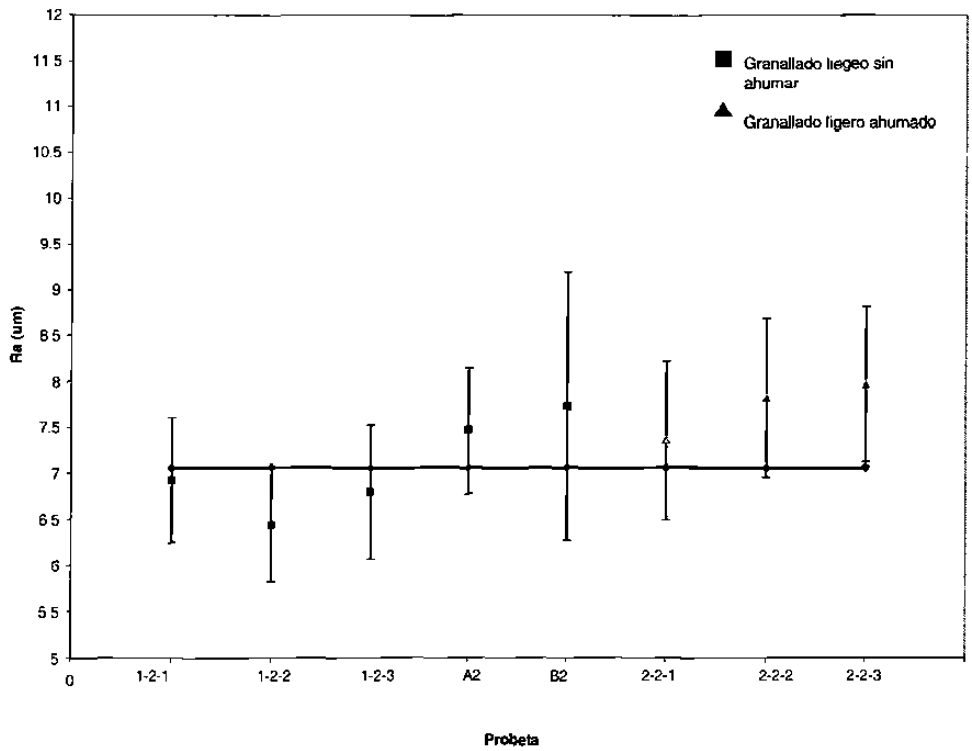


Figura 5.2.4 Variación de valores de Ra promedio para las probetas que presentan condición granallado normal

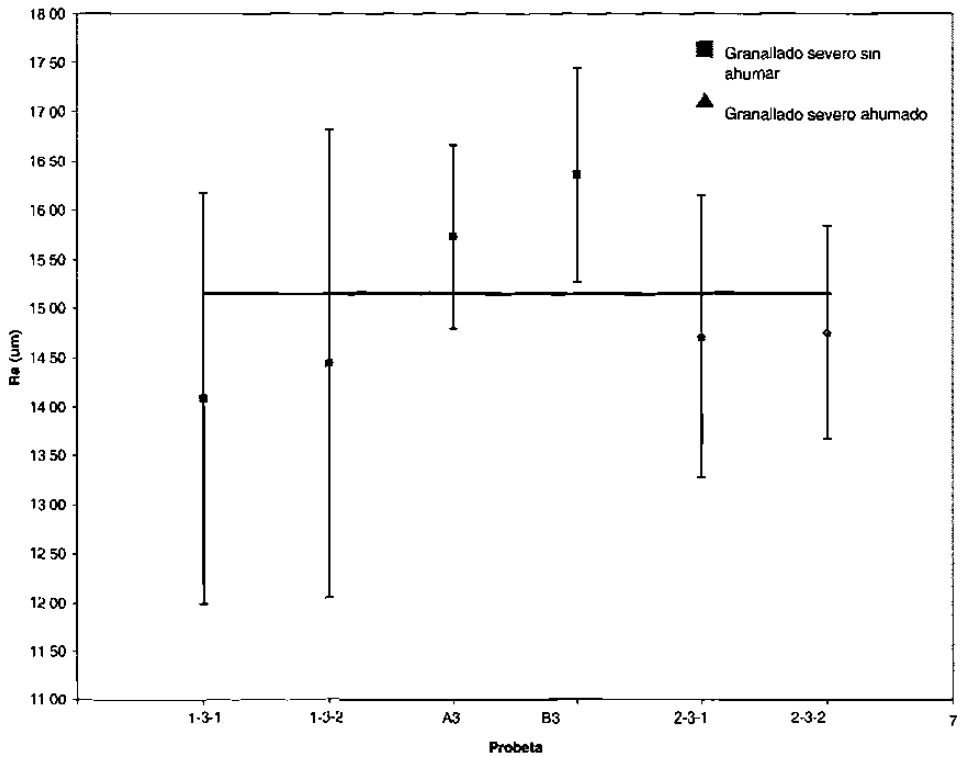


Figura 5.2.5 Variación de valores de Ra promedio para las probetas que presentan condición granallado severo

Como se puede ver en las Tablas 5.1 a 5.6, y en las Figuras 5.2.3 a 5.2.5 la menor dispersión, corresponde a la condición de granallado ligero. Es decir se presenta mayor uniformidad en comparación con las demás condiciones. En la condición de granallado severo el contacto de las partículas de SiC con la camisa no es del todo uniforme (el diámetro de las partículas no es constante) lo cual, presenta una mayor dispersión en los valores de rugosidad de cada camisa como se ve en la Figura 5.2.5. por otro lado, la mayor dispersión en las tres condiciones se presenta en la condición normal, tal y como se recibe del proveedor esto debido principalmente a la inconsistencia del acabado superficial que le da el proveedor a las camisas.

Para cuantificar el porcentaje de disminución o incremento de rugosidad en las diferentes condiciones, se midió el perfil de rugosidad a tres camisas en la condición normal para obtener un valor de Ra promedio de cada camisa, posteriormente, estas mismas camisas se sometieron al granallado ligero y después se midió el perfil de rugosidad promedio. Al comparar los valores de Ra antes y después del granallado

ligero se concluye que el granallado ligero disminuye un 11.7% con respecto al valor de rugosidad original. Estos valores se presentan a continuación en la Tabla 5.8

Tabla 5.8 Cambio en la rugosidad de tres camisas después de ser sometidas al granallado ligero

	Ra promedio (μm)				
	Camisa 1	*Camisa 2*	*Camisa 3*	*X*	*S*
Ra, condición normal	*9.21*	*8.70*	*7.61*	*8.51*	*0.66*
Ra,condición granallado ligero	*7.92*	*7.70*	*6.92*	*7.51*	*0.53*

Una comparación similar se llevó a cabo con camisas sometidas a la condición de granallado severo. El incremento, con respecto a la condición normal es del 60.7% Estas mediciones se presentan en la Tabla 5.9

Tabla 5.9 Cambio en la rugosidad de tres camisas después de ser sometidas al granallado severo

	Ra promedio (μm)				
	Camisa 1	*Camisa 2*	*Camisa 3*	*X*	*S*
Ra, condición normal	*9.50*	*9.83*	*7.34*	*8.88*	*1.35*
Ra, condición granallado severo	*15.32*	*15.36*	*12.13*	*14.27*	*1.85*

En la Figura 5.2.6 se aprecia la forma en que la rugosidad se modifica a partir de la condición normal, tal y como se recibe del proveedor en función del acabado superficial de granallado ligero o severo. Se observa que mientras la rugosidad original de la camisa sea menor, menor será el valor del acabado superficial.

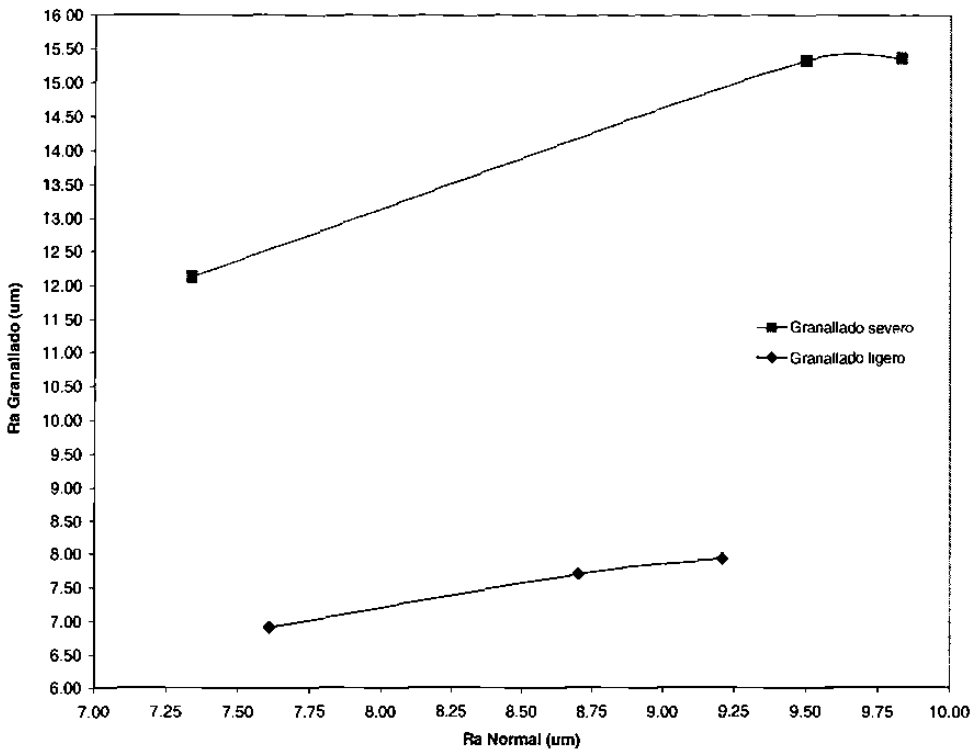


Figura 5.2.6 Comportamiento de rugosidad original después de aplicar un acabado superficial de granallado ligero o severo.

5.3 Análisis de temperaturas de vaciado

A continuación, en las Figuras 5.3.1 a 5.3.3, se presentan los perfiles de solidificación de las pruebas realizadas a diferentes temperaturas de vaciado: 680°C, 720°C y 740°C. Las temperaturas durante el llenado en cada punto en la camisa se presentan en la Tabla 5.3.1 En la Figura 5.3.4 se grafican estas temperaturas contra la altura de la camisa y, como se observa en esta última Figura, la temperatura más alta corresponde a la parte inferior de la camisa ya que es donde el metal llena primero; la temperatura más baja corresponde a la parte superior, sin embargo cabe mencionar que el decremento en la temperatura no varía con la altura, ya que en el punto donde se localiza el termopar No.3 (6.72 cm de altura), se aprecia un incremento en la temperatura Figura 5.3.4, y este fenómeno ocurre independientemente la temperatura de vaciado. Este fenómeno se puede deber a que cuando el metal va llenando la cavidad del molde, la camisa actúa como una templadera hasta que se satura, lo que

ocurriría en el punto número 3, a 6.75 cm desde la base de la camisa, reflejándose el incremento de temperatura que se observa en el punto a 6.75 cm de altura desde la base de la camisa. La diferencia en el llenado en las tres pruebas se debe a la forma en que éste se efectuó, pues las realizadas a las temperaturas de vaciado de 680°C y 740°C se hicieron a mano y se requirió emplear dos vasos, en tanto que el llenado a 720°C hizo uso de un robot automático, por lo que para fines de comparación, solo se hará referencia a las temperaturas registradas por los dos termopares localizados en la porción inferior del molde. Así, se puede apreciar como desde las temperaturas máximas registradas por estos dos termopares varían con la temperatura de vaciado. Figura 5.3.4

Tabla 5.3.1 Temperaturas de vaciado a diferentes alturas.

Altura (cm)	Temperaturas de vaciado		
	680 °C	720°C	740°C
2.25	646.00	666.56	685.12
4.5	638.40	649.00	672.85
6.75	656.00	673.00	672.00
9	635.70	667.80	646.52
11.25	637.80	657.97	648.00

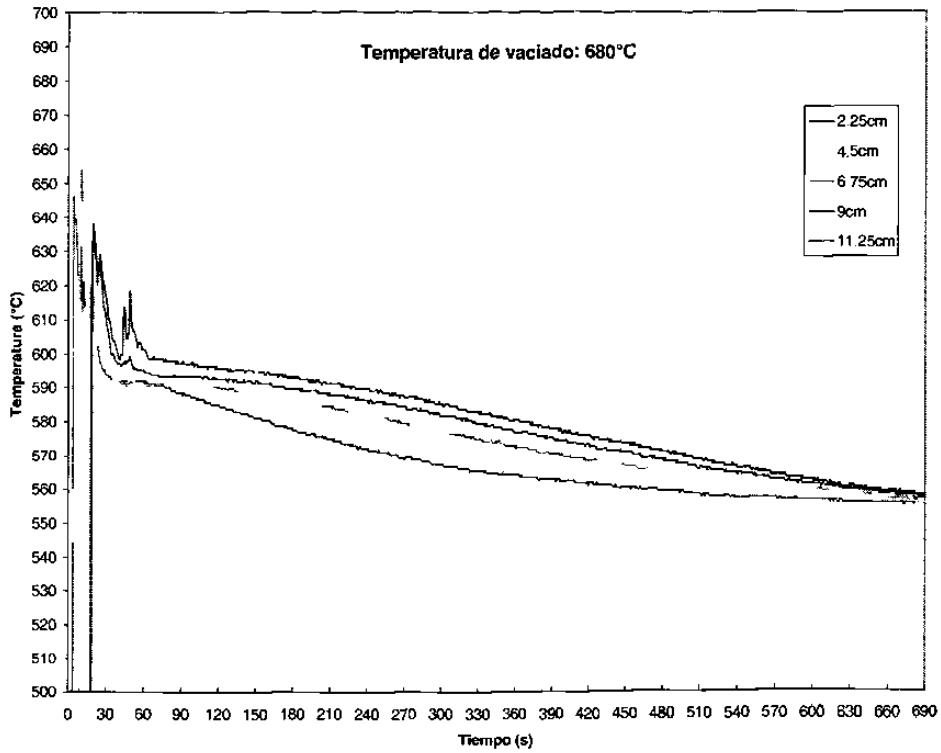


Figura 5.3.1 Perfil de solidificación, prueba vaciada a 680 °C

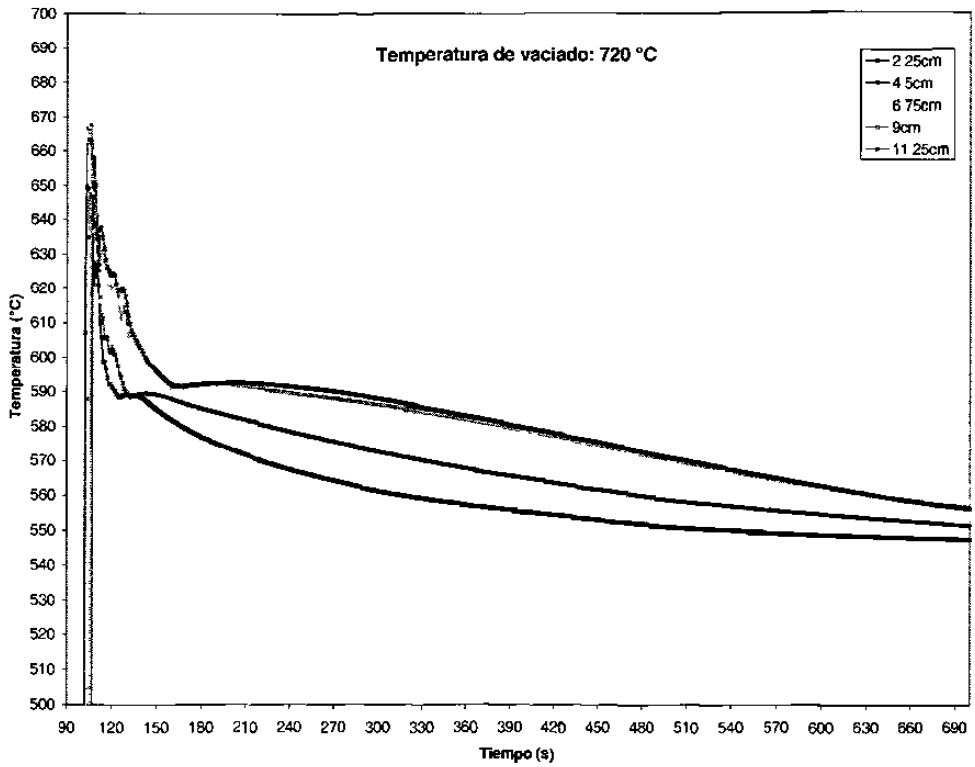


Figura 5.3.2 Perfil de solidificación, prueba vaciada a 720 °C

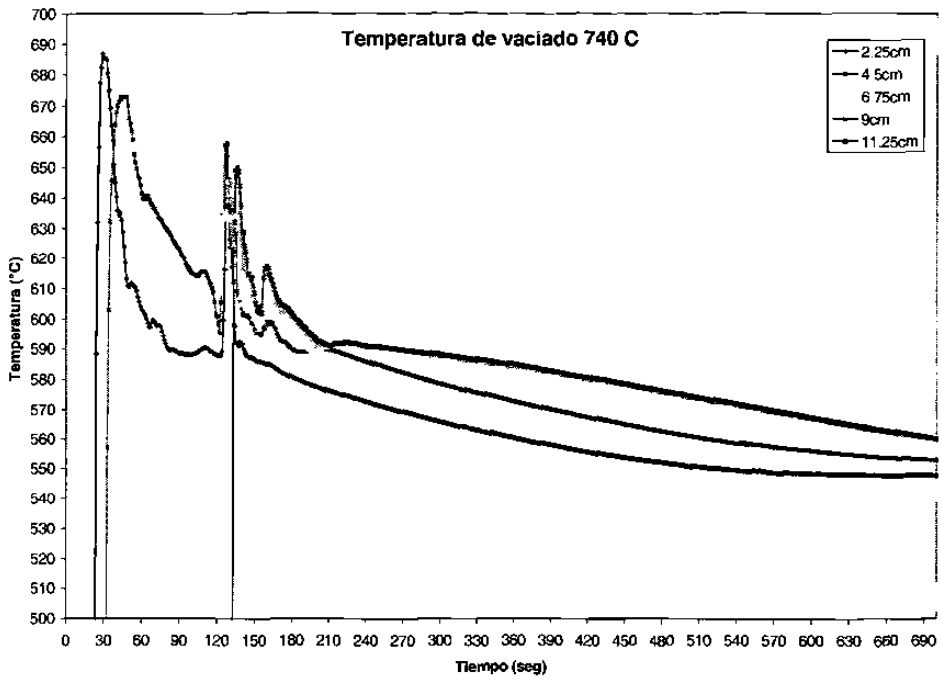


Figura 5.3.3 Perfil de solidificación prueba vaciada a 740 °C

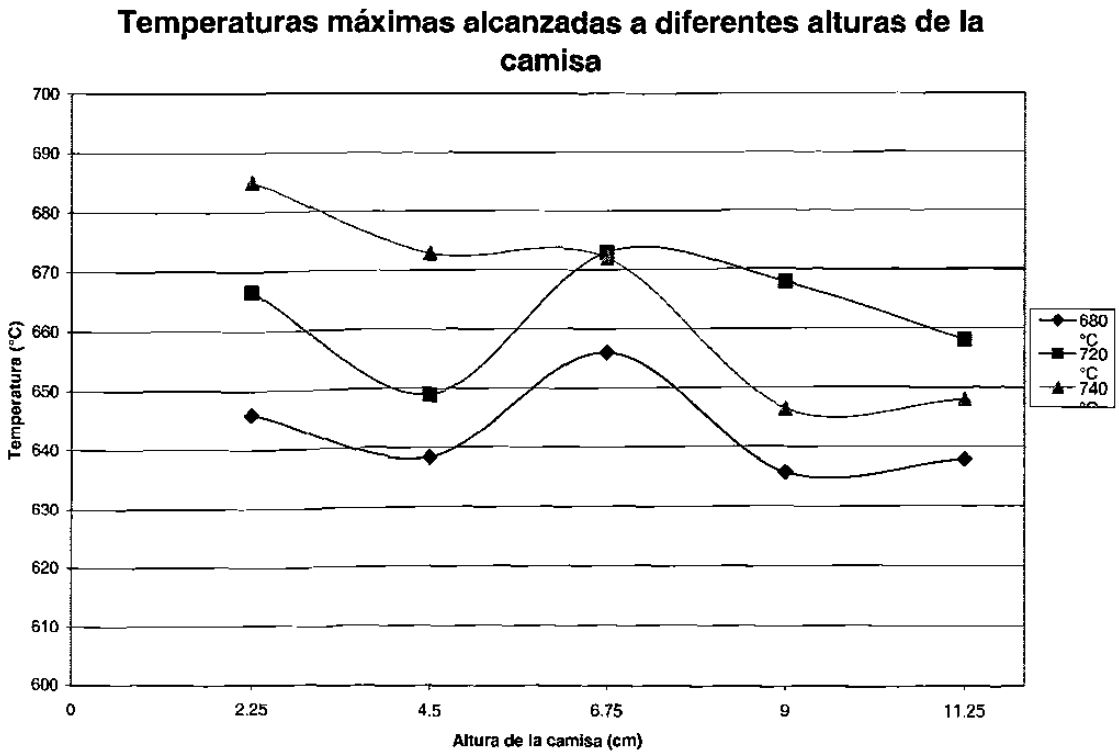


Figura 5.3.4 Temperaturas alcanzadas a diferentes alturas de la camisa

5.4 Influencia de la temperatura de vaciado en el enlace metálico

Los resultados del grado de adhesión metálica entre la aleación A319 y la camisa se presentan en la Tabla 5.4.1. Estos resultados fueron determinados cualitativamente mediante microscopia óptica. En las Figuras 5.4.1 a 5.4.3 se grafican estos valores. Analizando los gráficos dc cada prueba, se observa que a una temperatura de vaciado de 680°C, el grado de adhesión disminuye en forma lineal conforme la altura de la camisa (Figura 5.4.1) ya que el metal pierde temperatura y esta no es suficiente para promover una liga metálica entre la camisa y la aleación A319.0, promoviendo solamente enlace mecánico. En las pruebas a 720°C y 740°C el grado de adhesión es semejante entre ambos, aunque ligeramente mayor en la condición de temperatura de vaciado a 740°C, ésto se observa en las Figura 5.4.2 y 5.4.3; cabe destacar que hay un punto fuera del promedio en la Figura 5.4.3, lo que se puede deber a inconsistencias al realizar las mediciones cualitativas de adhesión.

Se observa que en todas las pruebas, a una altura de 11.25cm no hay unión metálica debido a que el gradiente de temperatura no es lo suficiente para promover la adhesión entre ambos metales.

Tabla 5.4.1 Porcentaje de adhesión metálica entre la camisa de Al y la aleación A319.

Porcentaje de adhesión metálica (análisis a 2σ)						
Altura	680°C		720°C		740°C	
(cm)	Promedio	Desv. Std	Promedio	Desv. Std	Promedio	Desv. Std
2.25	82.47	9.1	78.15	9.21	76.87	5.97
4.5	82.6	9.34	71.88	5.03	92.98	7.69
6.75	53.6	20	68.21	7.23	67.59	7.68
9	50.24	24.24	75.48	6.75	75.91	5.43
11.25	0	0	0	0	0	0

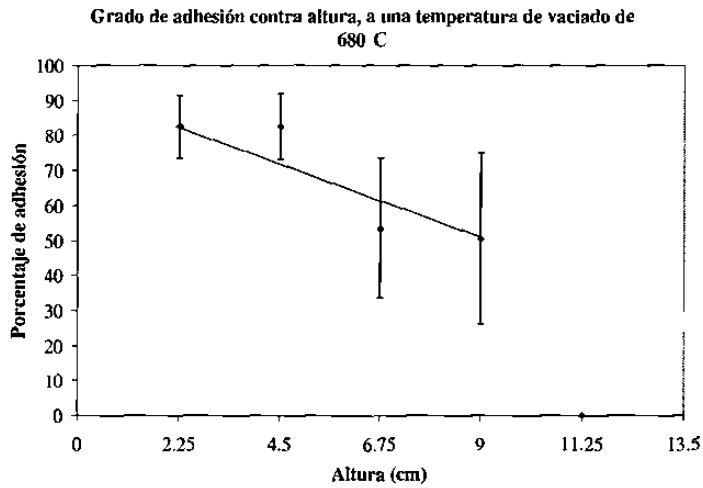


Figura 5.4.1 Porcentaje de adhesión metálica a 680°C de temperatura de vaciado.

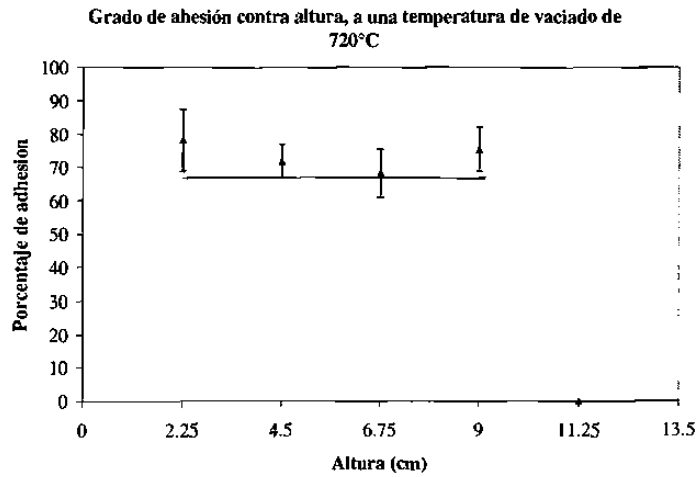


Figura 5.4.2 Porcentaje de adhesión metálica a 720°C de temperatura de vaciado.

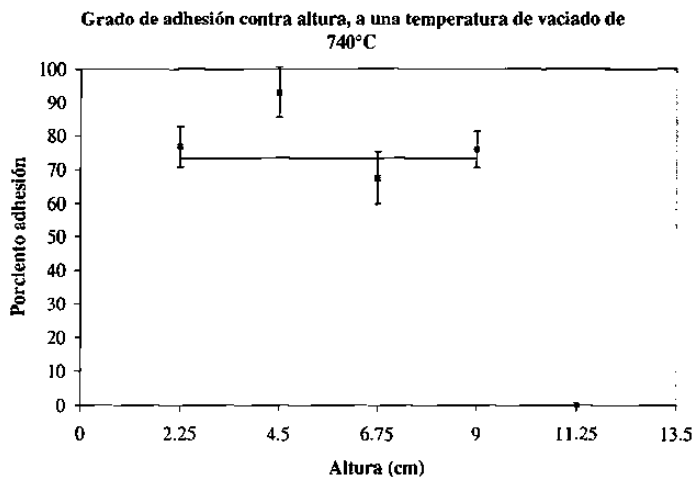


Figura 5.4.3 Porcentaje de adhesión metálica a 740°C de temperatura de vaciado.

5.5 Resultados de los ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo en muestras que fueron vaciadas de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Normal sin ahumar.
- Granallado normal sin ahumar.
- Granallado severo sin ahumar.
- Normal ahumado.
- Granallado severo ahumado
- Granallado normal ahumado.

En las Tablas 5.8 y 5.9, se presentan los valores correspondientes al esfuerzo de cedencia o esfuerzo de ruptura.

Tabla 5.8 Resultados de ensayos sin recubrimiento de carbón (sin ahumado)

Esfuerzo de ruptura (σ MPa)								
	Probeta							
Rodaja	1-1-1	1-1-2	1-1-3	1-2-1	1-2-2	1-2-3	1-3-1	1-3-2
1	14.89	34.09	8.36	30.58	26.86	31.71	29.31	5.52
2	30.96	32.50	10.93	37.15	30.92	68.75	33.53	6.53
3	29.59	33.70	18.36	35.37	31.60	77.94	29.19	5.55
4	27.12	36.60	17.70	36.28	27.89	34.62	30.04	4.98
5	26.40	34.91	9.55	34.45	31.21	77.04	21.05	4.30
6	13.89	12.00	5.77	35.67	26.83	62.33	29.61	3.28
7	//////////	7.80	6.68	//////////	//////////	86.92	//////////	5.68
8	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	76.19	//////////	4.53
9	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	66.17	//////////	//////////
10	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	83.72	//////////	//////////
11	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	69.76	//////////	//////////
12	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	31.42	//////////	//////////

Tabla 5.9 resultados de ensayos con recubrimiento de carbón (ahumado)

Esfuerzo de ruptura o (σ MPa)							
	Probeta						
Rodaja	2-1-1	2-1-2	2-2-1	2-2-2	2-2-3	2-3-1	2-3-1
1	5.84	3.45	4.64	7.96	4.07	8.02	9.63
2	0.60	3.05	3.30	6.63	10.81	5.53	5.72
3	3.97	3.24	2.68	5.28	8.65	2.25	6.30
4	//////////	3.00	3.01	6.20	8.39	//////////	5.63
5	//////////	2.85	3.98	3.72	6.28	//////////	6.08
6	//////////	1.74	//////////	4.00	6.16	//////////	3.08
7	//////////	//////////	//////////	//////////	8.87	//////////	//////////

A continuación se hace un comparativo de los resultados obtenidos de las probetas ensayadas, en donde (ver Figura 5.3.1), Todas las pruebas fueron realizadas a una velocidad constante del cabezal de 0.35mm/min.

● - Representa que el ensayo soportó una carga de 9500 kg.

▲ - Representa que la probeta soportó una carga menor de los 9500 kg y la curva carga vs desplazamiento sigue un comportamiento de zig-zag.

X - Representa que la probeta soportó cargas menores de 9500 kg, pero la curva carga vs desplazamiento sigue un comportamiento en el que la carga disminuye progresivamente, una vez que alcanzó un valor máximo.

Rodaja	Normal					Granallado ligero						Granallado severo			
	Sin ahumar			Ahumado		Sin ahumar			Ahumado			Sin ahumar		Ahumado	
	1-1-1	1-1-2	1-1-3	2-1-1	2-1-2	1-2-1	1-2-2	1-2-3	2-2-1	2-2-2	2-2-3	1-3-1	1-3-2	2-3-1	2-3-2
1	X	●	X	▲	▲	●	●	X	▲	▲	▲	●	▲	▲	▲
2	●	●	X	▲	▲	●	●	●	▲	▲	▲	●	▲	▲	▲
3	●	●	X	▲	▲	●	●	●	▲	▲	▲	●	▲	▲	▲
4	●	●	X		▲	●	●	●	▲	▲	▲	●	▲		▲
5	●	●	X		▲	●	●	●	▲	▲	▲	X	▲		▲
6	X	X	X		▲	●	●	●			▲	●	▲		▲
7		X	X					●					▲		
8								●							
9								●							
10								●							
11								X							
12								X							

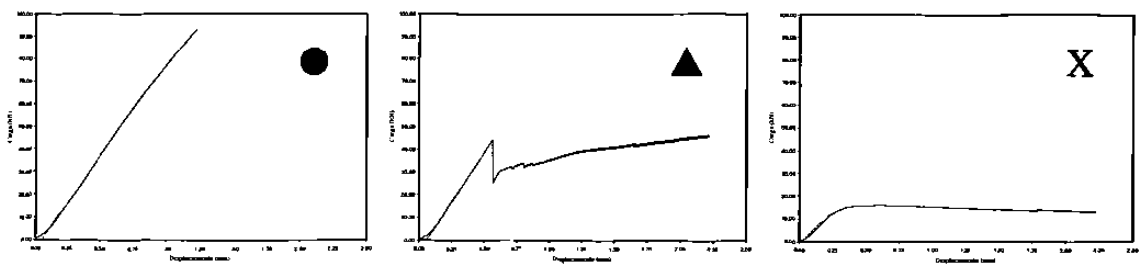


Figura 5.3.1 Curvas carga-desplazamiento observadas al ensayar las piezas seccionadas.

Las gráficas carga vs desplazamiento de cada rodaja, con las cuales se obtuvieron los valores de las Tablas 5.8 y 5.9, se muestran en el Anexo 2. En estas gráficas se determinó un punto que corresponde al punto de ruptura de la interfase. Este concepto

es el de importancia, debido a que el objetivo del estudio es el de determinar la carga máxima que puede soportar la interfase sin producir desplazamiento permanente.

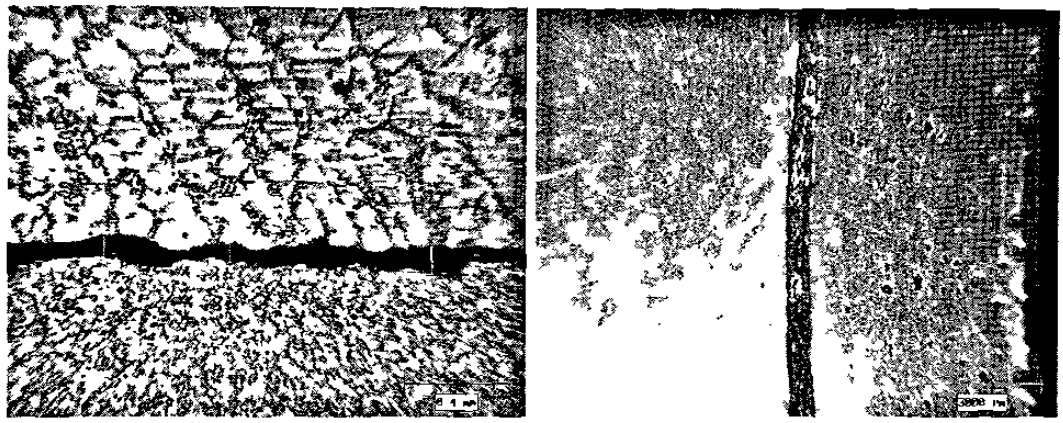
5.5.1 Descripción del punto de ruptura de la interfase

El punto de ruptura de la interfase se puede considerar como equivalente al de cedencia si la prueba se hubiera realizado en un material continuo y homogéneo. Antes de llegar a este punto la interfase sufre deformación elástica con la carga aplicada. El punto donde se pierde este comportamiento lineal representa el punto donde la interfase experimentará desplazamientos permanentes (comportamiento plástico). Estos desplazamientos permanentes están caracterizados por fuertes desplazamientos con incrementos mínimos en la carga. Inclusive, muchas curvas presentan una disminución de la carga en el punto de ruptura de la interfase.

Lo anterior es debido a que en la parte elástica la interfase se comporta similar a un material contínuo, con comportamiento elástico lineal. Al alcanzar el punto de ruptura, la interfase experimentará la fractura de las adhesiones mecánicas o metalúrgicas formadas durante la solidificación de la aleación de aluminio sobre la camisa. Al romper estas uniones, la interfase se debilita y es más fácil desplazarla con la misma carga o con cargas menores.

5.6 Discusión de resultados de ensayos mecánicos

Como se puede ver en la Figura 5.3.1, los resultados que tienen mejor comportamiento, es decir probetas que soportan cargas superiores de 9500 kg sin tener desplazamiento , corresponden a camisas sin recubrimiento de grafito y granallado ligero, en la que no hay contacto directo entre la camisa y el metal de llenado. Una microestructura típica correspondiente a probetas con recubrimiento de grafito se presenta en la Figura 5.6.1 En el Anexo 3 se presentan las microestructuras de cada rodaja y de cada condición.



a) b)

Figura 5.6.1 a) Microestructura típica de muestra con recubrimiento de grafito, en donde se observa que no hay adhesión metálica (condición granallado ligero, a una altura de 4.5cm desde la base de la camisa) b) Misma muestra ya ensayada

Este tipo de microestructura es la que representa en la curva carga vs desplazamiento que la carga disminuye progresivamente, una vez que alcanza un valor máximo. Al ir disminuyendo la carga, la resistencia que se opone al desplazamiento es solamente mecánica y al ir desplazándose la camisa se va rasgando la camisa por fricción mecánica, ésto se observa en las Figura 5.6.2

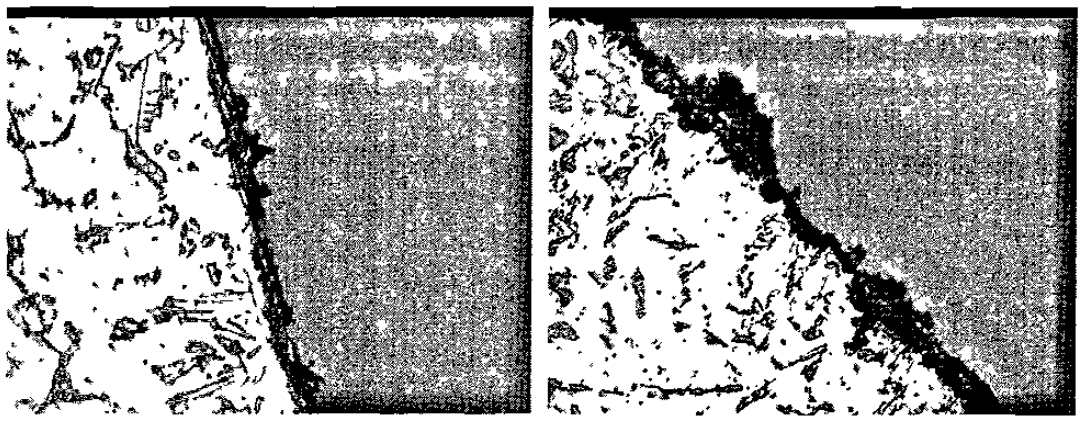


Figura 5.6.2 Rasgadura de la superficie producida por fricción mecánica.

Dentro de las tres diferentes variables de acabado superficial de la camisa que se probaron (normal, granallado ligero y granallado severo) en la condición sin recubrimiento de grafito, la que mejor resultado presentó es la de granallado ligero al presentar adhesión metálica entre la camisa y la aleación A319. En la Figura 5.6.3 se

representa una curva típica carga contra desplazamiento. Una micrografía típica de esta condición se presenta en la Figura 5.6.4

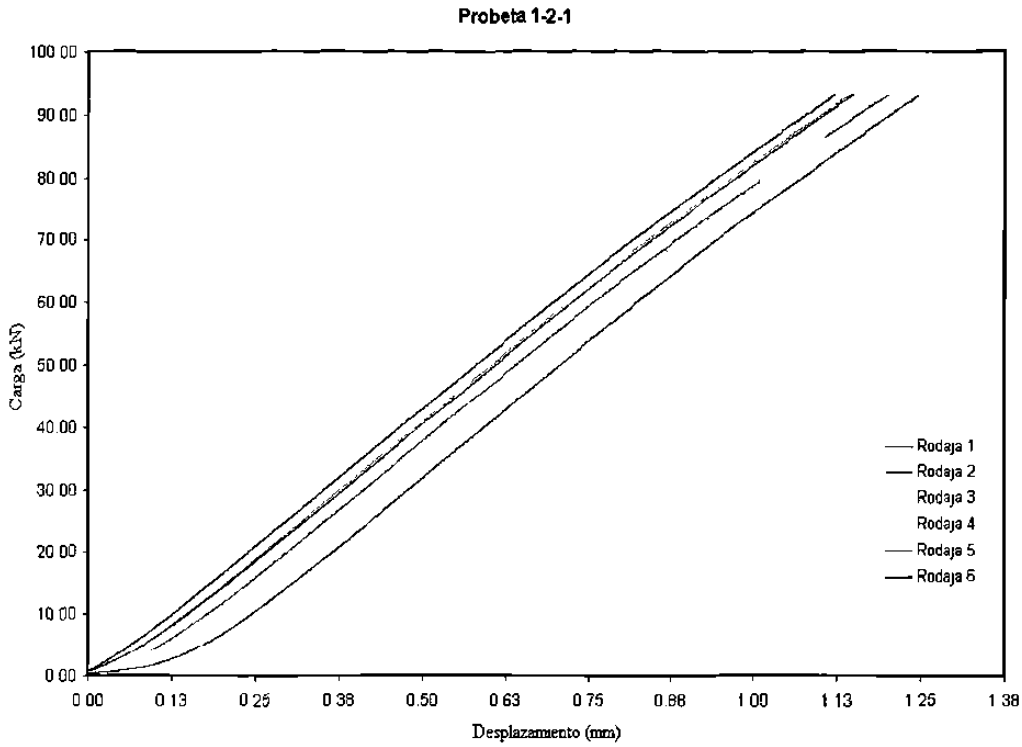


Figura 5.6.3 Curva carga contra desplazamiento para la condición granallado ligero sin ahumar, en donde se presentan las seis rodajas de esta probeta.

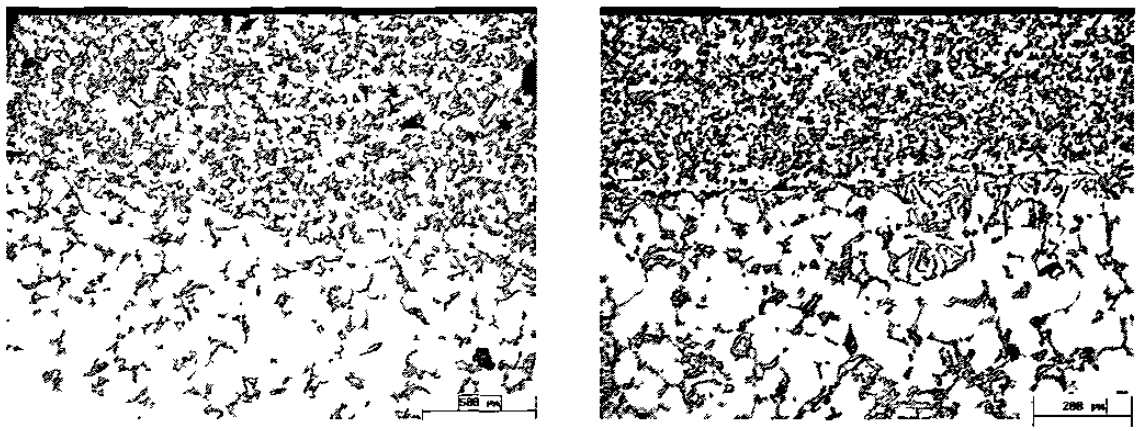
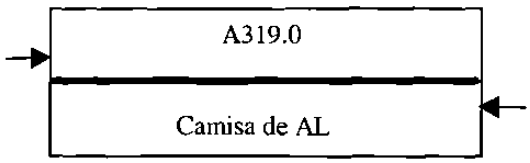
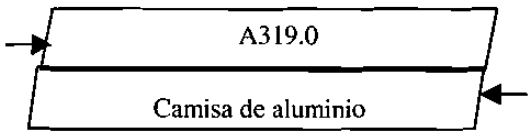


Figura 5.6.4 Micrografías típicas de la condición granallado ligero sin recubrimiento (2.25 cm desde la base , lado inzquierdo. 6.75 cm desde la base, lado derecho)

El mecanismo de deslizamiento que tiene la camisa y la aleación A319.0 cuando se presenta esta situación se presenta a continuación.

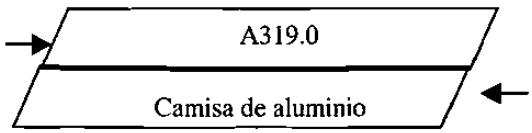


Punto 1: La aleación de aluminio A319.0 y la camisa de aluminio se encuentran unidos mediante un enlace metálico. Se le aplica una carga a las caras para comprobar la resistencia al deslizamiento.

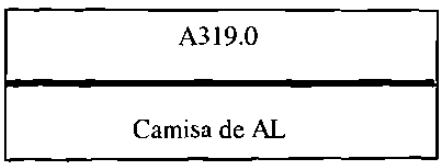


Punto 2: Conforme aumenta la carga, la camisa y la aleación A319.0 se deforman elásticamente en conjunto.

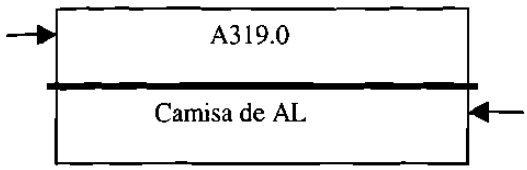
Punto 3: Al seguir aumentando la presión, la camisa y la aleación A319.0 se siguen deformando elásticamente ya que el enlace metálico es resistente que no falla y por lo cual no hay desplazamiento permanente.



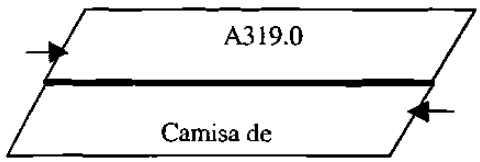
Punto 4: Al llegar a los 9500 kg de carga (tope máximo de la máquina de tensión) se da por finalizada la prueba. La camisa y la aleación A319.0 no sufren deformación plástica, se grafica la carga y el desplazamiento presentándose una curva similar a la de la Figura 5.6.2.



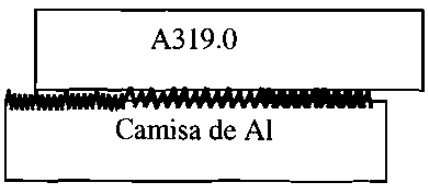
A su vez el mecanismo de deslizamiento que presenta la camisa y la aleación de aluminio A319.0, en la condición de granallado severo se presenta a continuación:



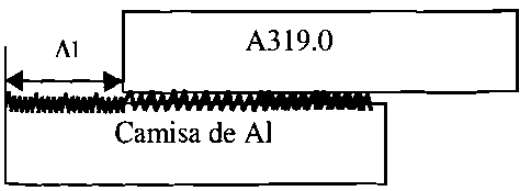
Punto 1: La aleación de aluminio A319.0, se encuentra enlazada metálicamente a la camisa de aluminio. Al aplicar una carga a las caras, se inicia una deformación elástica.



Punto 2: Conforme aumenta la carga va a tratar de deformar la camisa y la aleación A319.0 en conjunto y ocurre una deformación elástica



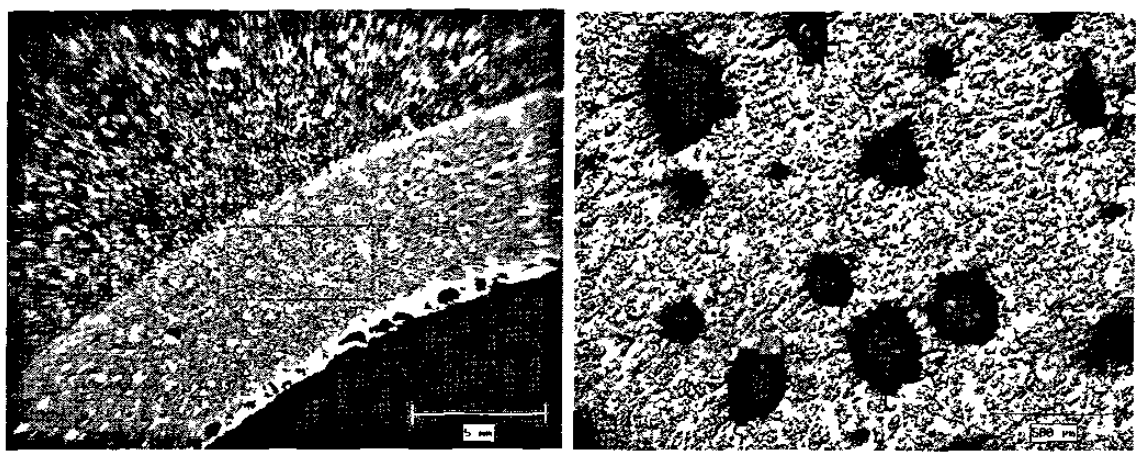
Punto 3: Una vez que el enlace metálico falló comienza el deslizamiento entre la camisa y la aleación A319.0, además de una caída en la carga.



Punto 4: El desplazamiento continua, ya que la camisa y la aleación A319.0 en este punto sólo se encuentra unidos mecánicamente y la resistencia al deslizamiento se debe al agarre mecánico. La prueba finaliza cuando el Δl es aproximadamente de 2.5 mm

5.7 Porosidad en camisas

Como se presenta en la Figura 5.7.1, algunas camisas presentan porosidad superficial existente en la camisa de aluminio.



a) b)

Figura 5.7.1 a) Poros superficiales en la camisa b) Parte central de 5.4.5a

Esta porosidad ocurre frecuentemente en las aleaciones de aluminio y es causada principalmente por H_2, el cual entra en solución en el metal líquido. El H_2 puede estar presente en la atmósfera o en objetos que se le añadan al metal líquido, tal es el caso de la porosidad en las camisas como se observa en la Figura 5.7.1.

La Figura 5.7.2 muestra el proceso de fabricación de las camisas, en el cual la humedad queda atrapada, durante el proceso de fabricación de éstas. El proceso consiste en fundir y sobrecalentar la aleación y atomizarla sin embargo se puede presentar humedad en el ambiente quedando ésta atrapada entre las capas de aluminio depositado en el molde de la camisa. Por lo tanto, el hidrógeno presente puede entrar en solución en el metal y quedar atrapado. Por lo tanto, al momento de vaciar el molde de arena y al tener una baja rapidez de enfriamiento (hasta 20 min. en solidificar) el hidrógeno nucléa, presentando los niveles de porosidad observados.

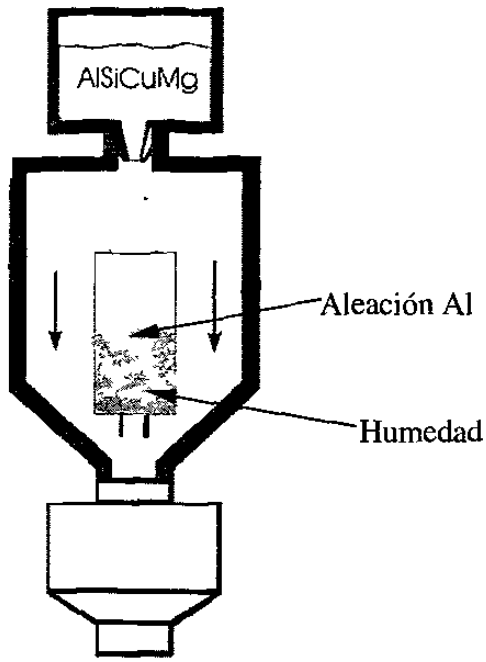


Figura 5.7.2 Proceso de vaciado de camisa de Al, en la cual humedad queda atrapada

Otra fuente de porosidad es la fusión de los intermetálicos de cobre (≈ 550 °C temperatura de fusión). A si mismo al bajar la temperatura, éstos intermetálicos se contraen produciendo poros en la matriz de aluminio [37]. En las Figuras 5.7.3 y 5.7.4 se pueden ver los intermetálicos de cobre presentes en la camisa.

Figura 5.7.3 Intermetálicos de cobre presentes en camisa de aluminio

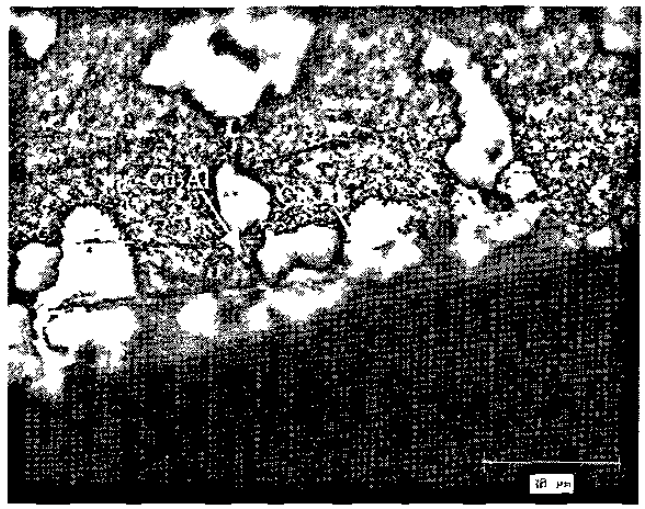


Figura 5.7.4 Intermetálicos de cobre en camisa, presentes a un lado de un poro

5.8 Prueba a camisas de hierro gris, insertadas a presión.

Como referencia a las pruebas realizadas, se realizó una prueba de empuje a una sección de un cilindro de un motor de alto desempeño con monoblock de aluminio, dicho motor cuenta con 10 cilindros y camisas de hierro gris insertadas a presión, por el método "press in". En la Figura 5.8.1 se muestra la sección ensayada y en la Figura 5.8.2 se muestra la curva carga vs desplazamiento. Los resultados de esta prueba fueron los siguientes:

Carga en el punto de ruptura de la interfase	: 1354 Kg.
σ en el punto de ruptura de la interfase	: 2.64 MPa
Desplazamiento en el punto de ruptura de la interfase	: 0.45 mm
Carga en el punto máximo	: 1373 Kg
σ normal en el punto máximo	: 2.68 MPa
Desplazamiento en el punto máximo	: 0.46 mm

Figura 5.8.1 Sección de una camisa de hierro gris en un monoblock de aluminio, al momento de realizar la prueba de empuje

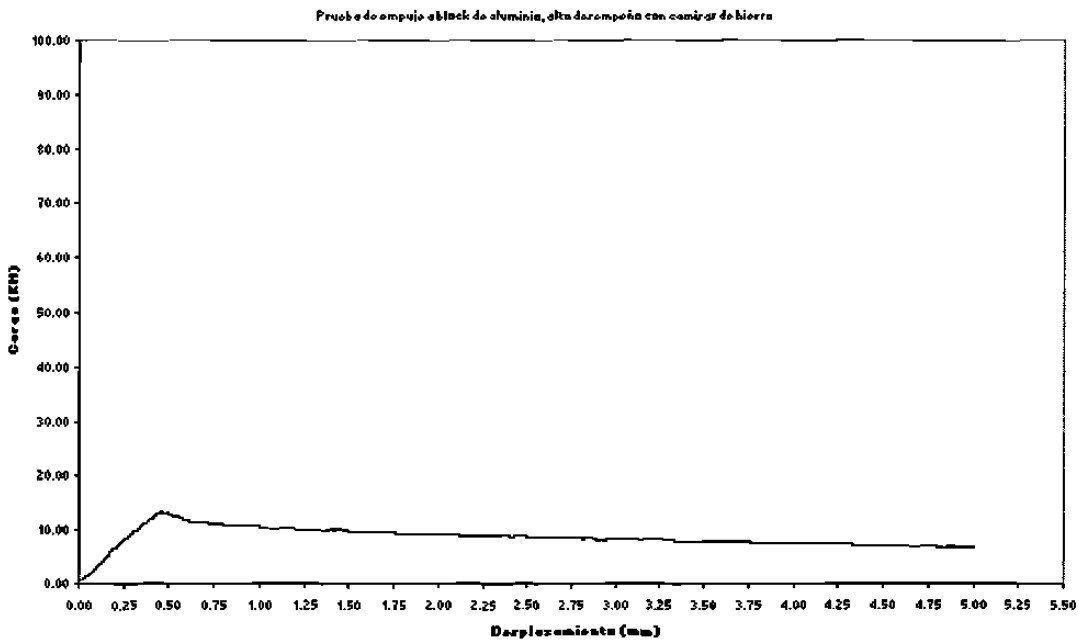


Figura 5.8.2 Curva promedio carga vs desplazamiento de un block de aluminio, con camisas de hierro gris.

5.9 Resumen de resultados de pruebas mecanicas.

Se presenta un resumen de los esfuerzos calculados que se presentaron en la Figura 5.3.1 en la Tabla 5.9.1, se marcan con asterisco aquellos esfuerzos en los que la carga excedió los 9500 kg llamado en este estudio esfuerzo de ruptura de la interfase. Solamente este esfuerzo fue el que se tomó en cuenta para evaluar la mejor condición de adhesibilidad entre la camisa y la aleación A319.0. En las Figuras 5.9.1 a 5.9.6, se grafican los

esfuerzos de ruoptura de la interfase de las tres zonas (inferior, media y superior) de cada probeta, cada zona corresponde a una altura de camisa de aproximadamente de 38 mm para dar un total de 115mm de altura total de cada camisa

Tabla 5.9.1 Valores de cedencia en la parte inferior de las diferentes condiciones.

	1-1-1 Normal sin chamar -1 (MPa)			1-1-2 Normal sin chamar -2 (MPa)			1-1-3 Normal sin chamar 3 (MPa)			2-1-1 Normal chamado 1 (MPa)			2-1-2 Normal chamado 2 (MPa)			
Procesos	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv. Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv. Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv. Std. Ra	
Inferior	15.11	6.438	0.32	23.24	8.86	0.34	9.04	9.42	1.08	5.84	7.128	0.9	3.45	7.488	0.39	
	23.63			26.33			10.95						3.04			
Media	22.06	5.9443	0.23	25.86	9.266	0.27	18.32	7.85	1.07	0.6	8.224	1.01	3.24	7.514	0.2	
	19.14			26.63			17.65						3			
Superior	20.86	6.097	0.5	28.68	9.172	0.63	8.07	7.87	0.1				2.85			
	13.92			11.92			5.73			3.97	7.634	0.51	1.74	7.837	0.38	
				7.8			6.6									
# max.	23.63			28.68			18.32			5.84			3.45			
	1-2-1 Granallado normal sin chamar -1 (MPa)			1-2-2 Granallado normal sin chamar -2 (MPa)			1-2-3 Granallado normal sin chamar -3 (MPa)			2-2-1 Granallado normal chamado -1 (MPa)			2-2-2 Granallado normal chamado -2 (MPa)			2-2-3 Granallado normal chamado -3 (MPa)		
Procesos	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std. Ra
Inferior	24.77	6.9	0.55	21.63	6.81	0.69	25.28	7.13	0.71	4.64	6.998	0.64	7.96	7.718	1.3	4.07	8.334	0.55
	29.63			25.69			59.5			3.29			6.63			10.81		
							63.41											
Media	31.34	7.01	0.26	23.73	6.36	0.81	21.13	6.1	0.46	2.68	7.556	1.01	5.28	7.986	0.61	8.65	8.025	0.55
	26.23			22.91			70.01						6.2			8.39		
							46.79											
							54.97											
							61.67											
Superior	29	6.88	1.21	23.59	6.15	0.23	53.59	7.02	0.67	3	7.722	0.89	3.72	7.767	0.93	6.28	7.532	1.33
	33.27			21.4			55.61			3.97			4			6.16		
							45.39									8.87		
							31.46											
# max.	33.27			25.69			70.01			4.64			7.96			10.81		
	1-3-1 Granallado severo sin chamar -1 (MPa)			1-3-2 Granallado severo sin chamar -2 (MPa)			2-3-1 Granallado severo chamado -1 (MPa)			2-3-2 Granallado severo chamado -2 (MPa)						
Procesos	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom (um)	Desv Std Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom. (um)	Desv Std. Ra	Esfuerzo cedencia (MPa)	Ra prom (um)	Desv Std. Ra				
Inferior	24.46	13.28	2.51	5.52	16.14	1.476	8.01	13.47	0.38	9.62	14.67	1.43				
	25.64			6.53						3.71						
Media	23.44	14.87	2.48	5.55	14.03	3.029	5.53	14.85	0.23	6.29	14.5	0.25				
	22.15			4.98						5.62						
				4.3												
Superior	20.65	14.09	1.78	3.28	13.13	2.082	2.25	15.81	1.98	6.08	15.09	1.31				
	26.33			5.68						3.08						
				4.53												
# max.	26.33			5.68			8.01			9.62						

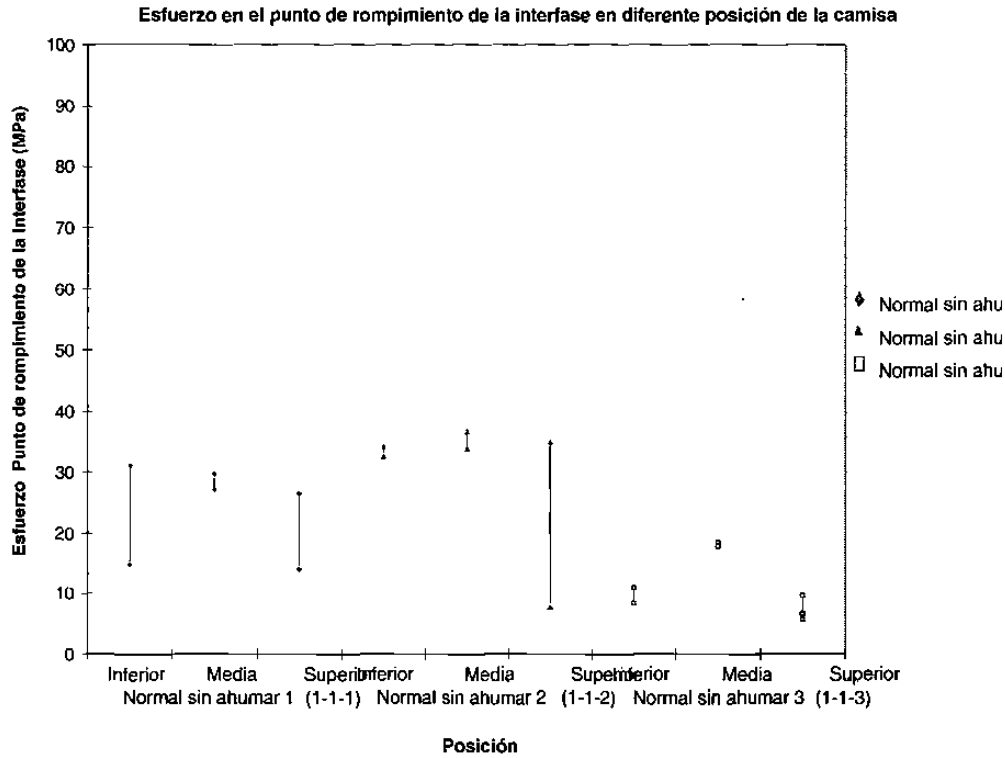


Figura 5.9.1 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas normales sin recubrimiento de grafito

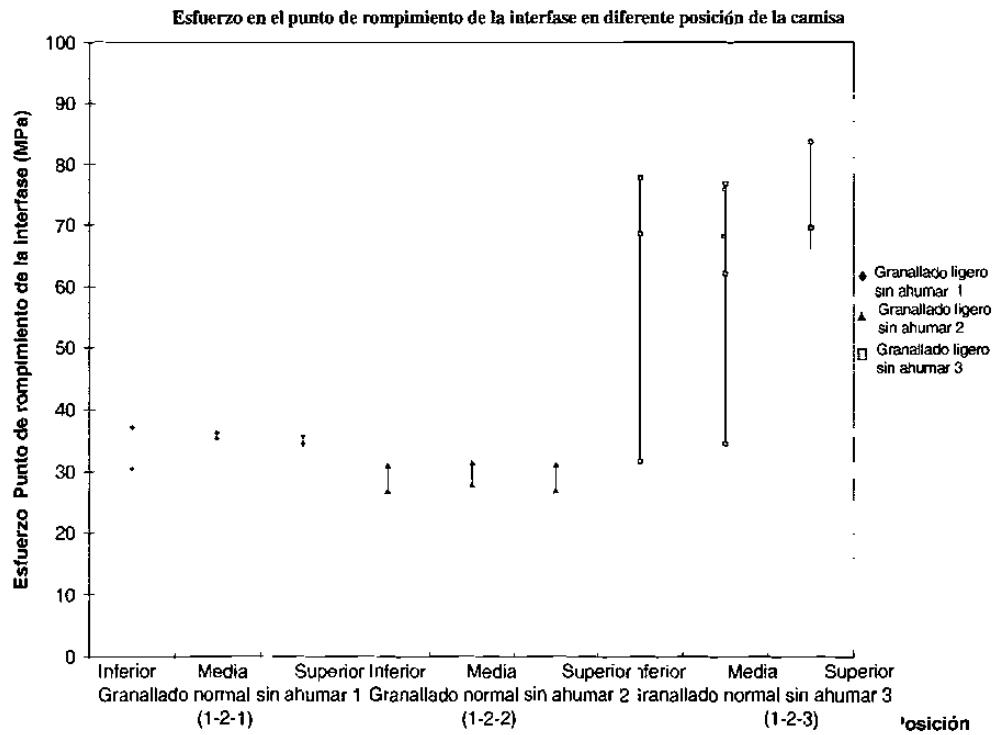


Figura 5.9.2 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas con granallado ligero sin recubrimiento de grafito.

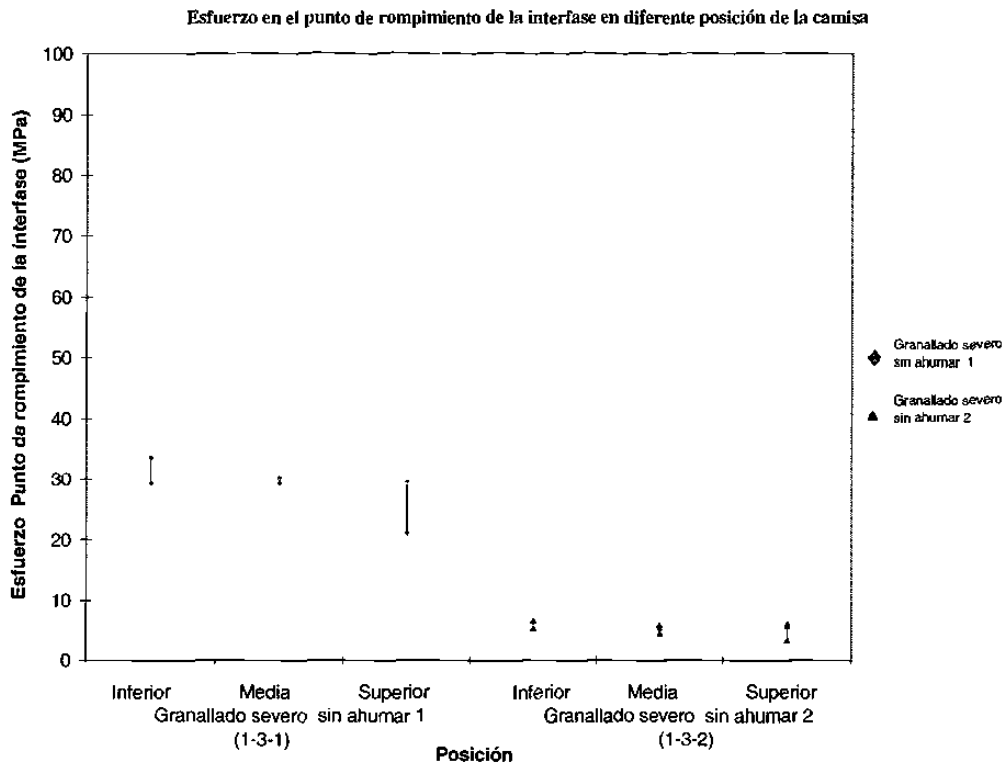


Figura 5.9.3 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas con granallado severo sin recubrimiento de grafito.

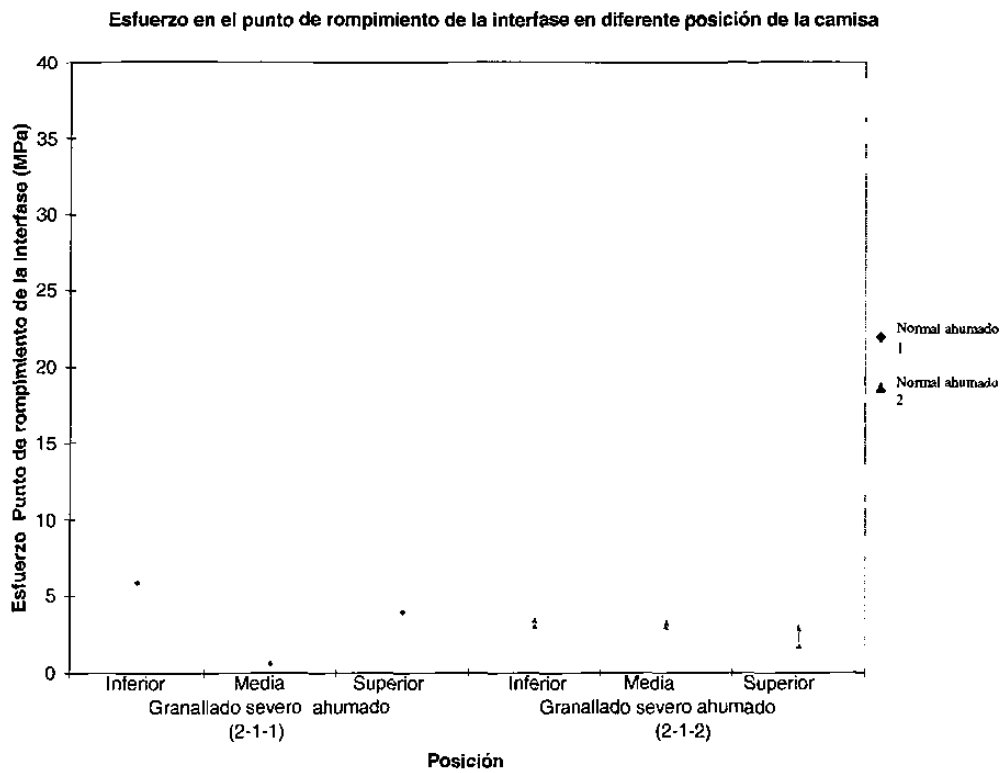


Figura 5.9.4 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas normales con recubrimiento de grafito.

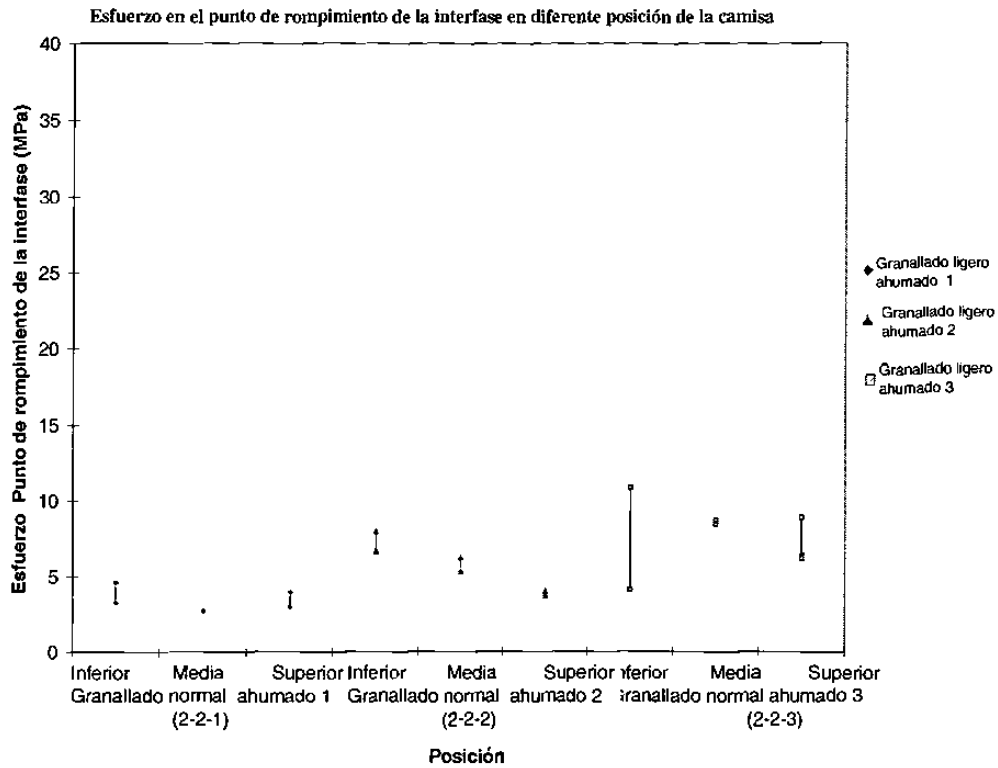


Figura 5.9.5 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas con granallado ligero con recubrimiento de grafito.

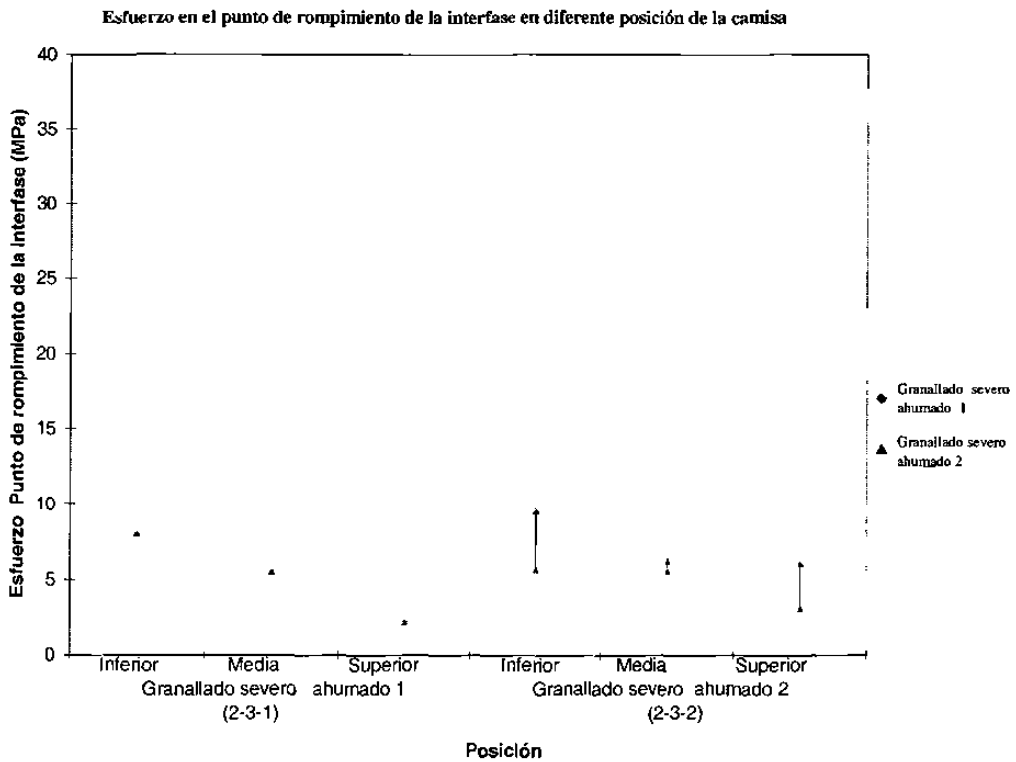


Figura 5.9.6 Esfuerzo de ruptura de la interfase en probetas con granallado severo con recubrimiento de carbón.

Comparando la condición normal con y sin recubrimiento de grafito (ahumado), se puede observar en las Figuras 5.9.1 y 5.9.3 que hay diferencia entre ambas pruebas con el mismo acabado superficial, lo cual el recubrimiento de carbón no promueve el enlace metálico entre la aleación A319.0 y la camisa de aluminio. La menor dispersión de los esfuerzos, en la condición sin recubrimiento se presenta en la zona media de la camisa, ya que en esta zona también se presenta la menor dispersión de rugosidad. El valor máximo de esfuerzo de la condición normal sin recubrimiento es de 34.9 MPa, mientras que el máximo valor en la misma condición pero con recubrimiento es de 5.84 MP, lo cual representa solo un 16.7 % del valor de la condición sin recubrimiento. En las probetas 1-1-1 y 1-1-2 se presentan 4 rodajas de cada probeta que soportan cargas de 9500 kg sin sufrir deformación plástica

En la condición de granallado ligero con y sin recubrimiento de carbón, como se aprecia en las Figuras 5.9.2 y 5.9.5 existe mucha variación en los esfuerzos en el punto de ruptura de la interfase presentados. El valor máximo del esfuerzo de la condición sin recubrimiento es de 83 MPa, mientras que el valor máximo con recubrimiento de carbón es de 10.8 MPa, lo cual representa sólo un 13% con respecto al valor máximo de la condición sin recubrimiento. En la probeta 1-2-1, todas las rodajas soportaron cargas de 9500 kg sin sufrir deformaciones, lo mismo que en la probeta 1-2-2 y en la probeta 1-2-3 de 12 rodajas 9 soportaron cargas de 9500 kg sin deformación permanente.

En la condición de granallado severo, con y sin recubrimiento, como se observa en las Figuras 5.9.3 y 5.9.6 sólo se aprecia diferencia en la probeta 1-3-1 sin recubrimiento donde el valor máximo de esta probeta es de 33.53 MPa, presentándose en esta probeta 4 rodajas de 6 que soportaron cargas de 9500 kg sin deformación plástica. En la Figura 5.9.7 y 5.9.8 se presentan algunas gráficas representativas de los resultados obtenidos en este trabajo, se hace la comparación con la camisa de hierro gris.

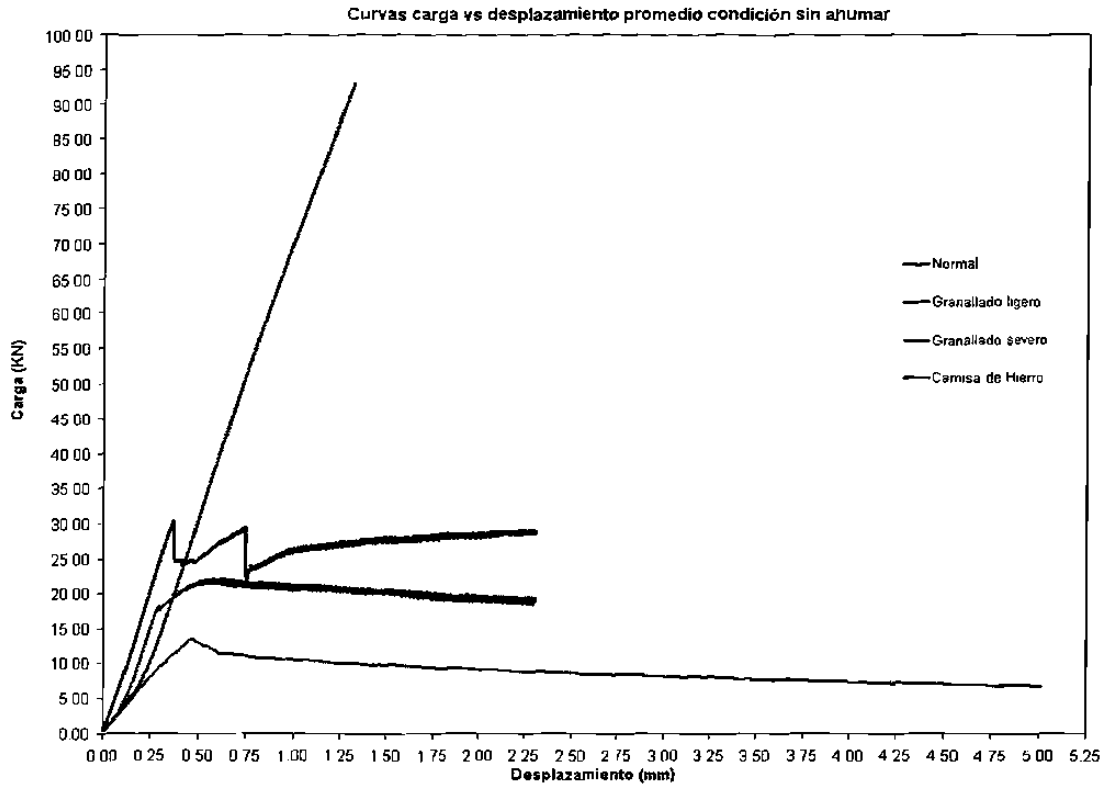


Figura 5.9.7 Curvas carga vs desplazamiento de diferentes pruebas sin recubrimiento de grafito (ahumado)

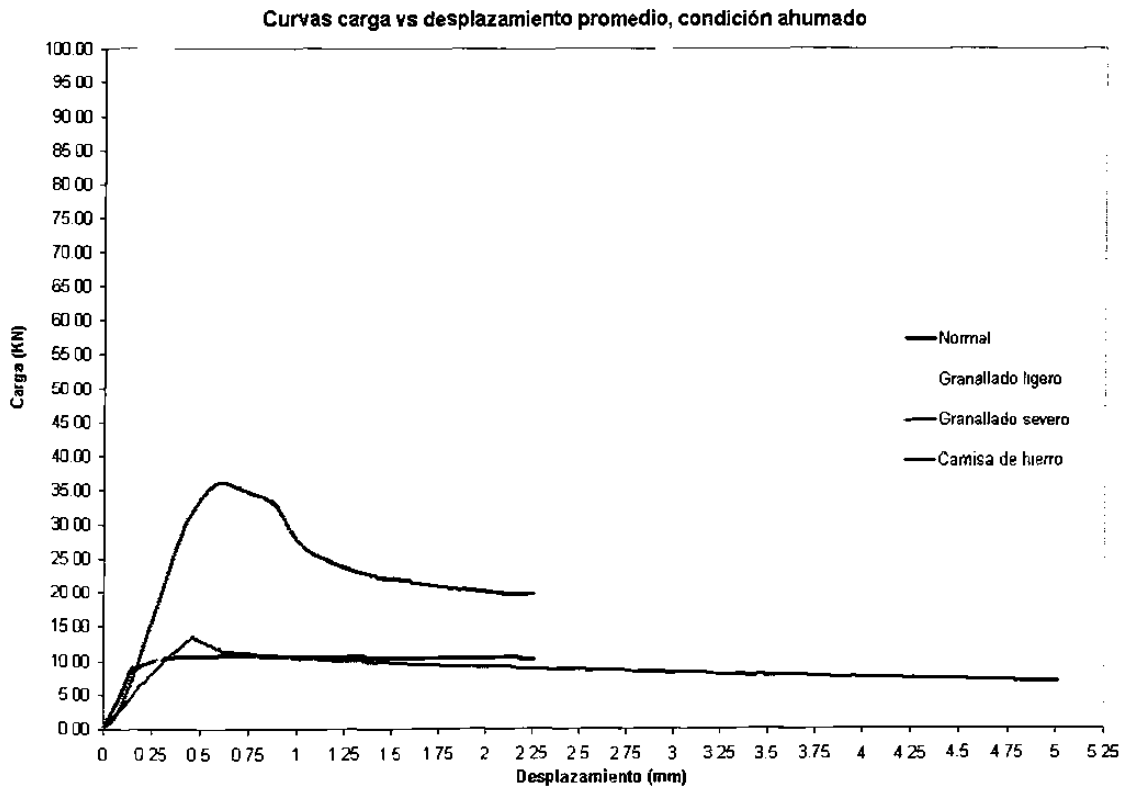


Figura 5.9.8 Curvas carga vs desplazamiento de diferentes pruebas sin recubrimiento de carbón (ahumado)

De las Figuras 5.9.7 y 5.9.8, se observa que la camisa tradicional de fundición de hierro gris presenta falla por deslizamiento a una carga de 1345 kg (≈ 14 000 N) y a un esfuerzo de 2.64 MPa. En la condición de camisas con recubrimiento de carbón se presentaron fallas al deslizamiento entre 8.5 MPa para la condición de granallado severo. Las camisas sin ahumar con granallado ligero, soportan cargas hasta de 9500 kg (93 000N) y resistencias de 35 MPa sin presentar falla. Cabe recalcar que el acabado superficial interior de la camisa, en la condición sin ahumar presenta porosidad como ya se mostró en la Figura 5.7.1, a diferencia del acabado superficial en la condición con recubrimiento de carbón (ahumado) que presenta mejor calidad en la superficie, esto debido a que la capa de carbón dificulta la conductividad de calor y promueve en menor grado la porosidad observada en la condición sin recubrimiento de carbón .