



L 2 L

ESCUELA **SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Mecánica



“PROCESO DE MOLDEO POR
SOLIDIFICACION BAJO PRESION”

PROYECTO DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERA MECANICA

Presentada por:

Aurora Alexandra, Idrovo Soto

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.993

A G R A D E C I M I E N T O

AL ING. IGNACIO WIESNER, DIRECTOR
DE TESIS, A LOS TALLERES DE
ASTINAVE, AL DR. MARTIN EASON, AL
ING. MARIO PATIÑO, POR SU AYUDA Y
COLABORACION PARA LA REALIZACION
DE ESTE TRABAJO.



BIBLIOTECA

DEDICATORIA

A MI MADRE.

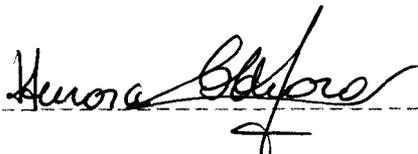
A MIS HERMANAS.

A MIS SOBRINOS.

DECLARACION EXPRESA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas
expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente:
, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA
SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

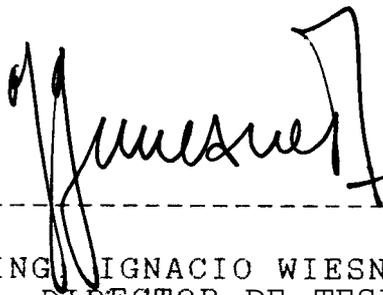
Reglamento de Exámenes y Titulos profesionales de la
EPOL).



AURORA A. IDROVO SOTO



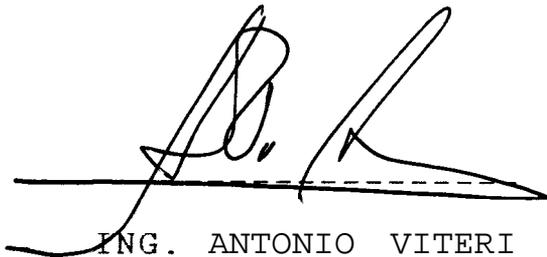
ING. JORGE DUQUE
DECANO DE FIM



ING. IGNACIO WIESNER
DIRECTOR DE TESIS



ING. JOSE PACHECO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. ANTONIO VITERI
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



BIBLIOTECA

R E S U M E N

El presente trabajo está dividido en dos partes: la primera es de carácter teórico y la segunda es la parte experimental.

En la primera parte se hace una breve historia del proceso, las características principales de éste, las aleaciones que han sido estudiadas y que pueden usarse para la fabricación de piezas, y por último las aplicaciones industriales y usos.

En la parte experimental se diseñó un dado, que se ajustará a la especificación de la prensa a usarse. Se obtuvieron tres piezas de la misma forma, pero obtenidas variando ciertos parámetros del proceso. Se realizó el ensayo metalográfico de cada una de las piezas, además de obtener de cada una de las piezas sus propiedades mecánicas (Esfuerzo de tensión, ductilidad, dureza).

El último capítulo de la tesis da a conocer un análisis de los resultados obtenidos en la parte experimental, y finalmente se citan las conclusiones y recomendaciones.

INDICE GENERAL

	PAG
RESUMEN:.....	V
INDICE GENERAL.....	VI
INTRODUCCION.....	15
I INFORMACION BIBLIOGRAFICA.....	17
1.1 Características del Proceso.....	17
1.2 Tipo de aleaciones usadas con este proceso.....	25
1.3 Ventajas Tecnológicas.....	77
1.4 Aplicaciones.....	88
II TRABAJO EXPERIMENTAL	
2.1 Descripción del equipo experimental utilizado.....	102
2.2 Objetivo de la experimentación.....	108
2.3 Metodología de la experimentación..	108
2.4 Pruebas y resultados de control de propiedades.....	124
III DISCUSION DE RESULTADOS.....	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
APENDICES.....	149
BIBLIOGRAFIA.....	156

INDICE DE FIGURAS

NO		PAG
1.1	Esquema del Proceso SQC.....	21
1.2	Microestructura de la aleación Al-7%Si, fundida a presión atmosférica y a 150 MPa.....	27
1.3	Comportamiento a la fatiga de algunas aleaciones al aluminio.....	31
1.4	Microestructura de la aleación al aluminio SQC 6061.....	41
1.5	Propiedades tensiles de la aleación SQC 7010 como función de la presión de solidificación.....	43
1.6	Curvas de fatiga de la aleación 7010....	45
1.7	Efecto del tamaño de grano sobre los valores de tenacidad a la fractura, K _{IC} , de la aleación SQC 7010.....	46
1.8	Microestructura de la aleación al aluminio SQC A380.....	51
1.9	Microestructura de la aleación al aluminio SQC 356.....	54
1.10	Comparación de la microestructura de la aleación al aluminio B850.....	56

Nº	PAG	
1.1:	Propiedades mecánicas de la aleación AZ91, en la condición de fundición bruta y tratamiento térmico, para varios procesos de fundición.....	58
1.12	Comparación de las propiedades mecánicas en la condición forjada y SQC para la aleación ZCM711.....	61
1.13	Comparación de la microestructura del latón forjado CDA 377.....	64
1.14	Microestructura del bronce de aluminio CDA 624.....	66
1.15	Microestructura de la aleación SQC CDA 943.....	69
1.16	Comparación de la microestructura de la aleación CDA 925.....	72
1.17	Esquema de la fabricación de componentes por procesos alternativos.....	84
1.18	Fotografía que muestra una selección de partes formadas mediante SQC.....	89
1.19	Piezas de bronce y latón hechas en SQC, enteras y seccionadas.....	90
1.20	Piezas hechas en SQC.....	92
1.21	Producción de una bobina textil hecha en SQC.....	92

Nº		PAG
1.22	Piezas hechas bajo SQC producidas por la IITRI.....	94
1.23	Aro automotriz hecho bajo SQC fabricado por la Toyota.....	97
1.24	Pistón experimental de motor.....	98
1.25	Discos de freno para pistones.....	98
1.26	Aplicaciones potenciales de SQC para la industria automotriz.....	99
1.27	Curvas de fatiga para pistones de motor diesel (E332-T5) producidos en SQC.....	100
2.1	Prensa Hidráulica.....	103
2.2	Horno de Crisol.....	104
2.3	Pirómetro de Radiación.....	105
2.4	Termopar Chromel-Constantan.....	106
2.5	Soplete.....	109
2.6	Dado y Punzón.....	110
2.7	Punzón.....	111
2.7	Dado.....	112
2.8	Dado y punzón montados en la Prensa.....	113
2.9	Barras de aleación Al-Si para colar.....	115
2.10	Calentamiento del dado por medio del soplete.....	116
2.11	Transferencia del metal colado dentro de la cavidad del dado.....	117

No

2.12 Aplicación de la presión durante la solidificación..... 118

2.13 Pieza obtenida y dado..... 127

2.14 Diagrama de Flujo del Proceso SQC..... 128

2.15 Probetas obtenidas de la pieza..... 130

2.16 Macrofotografía de la primera pieza obtenida..... 132

2.17 Macrofotografía de la segunda pieza obtenida..... 133

2.18 Macrofotografía de la tercera pieza obtenida..... 134

2.19 Microestructura de la primera pieza obtenida..... 136

2.20 Microestructura de la segunda pieza obtenida..... 137

2.21 Microestructura de la tercera pieza obtenida.....

2.22 Microestructura de la muestra sin ataque.....



INDICE DE TABLAS

Nº		PAG
I	Propiedades mecánicas típicas de tres aleaciones comerciales fundidas Al-Si usando diferentes técnicas.....	29
II	Efecto del tamaño de grano sobre las propiedades tensiles de la aleación SQC Al-4,5%Cu, comparándola con la aleación convencional.....	34
III	Comparación de las propiedades tensiles entre la aleación SQC Al-4,5%Cu y la aleación forjada de la misma composición.....	36
IV	Propiedades tensiles de algunas aleaciones SQC tipo-forja.....	38
V	Comparación de las propiedades tensiles entre los materiales SQC 6061 y aquellos de forjas a troquel.....	39
VI	Efecto de la presión de moldeo sobre las propiedades tensiles de la aleación 7010.....	42
VII	Propiedades tensiles de la aleación SQC A 380.....	49

Nº

PAG

VIII	Propiedades comparativas de aleaciones comerciales a base de aluminio.....	50
IX	Propiedades de la aleación al aluminio 356.....	52
X	Propiedades comparativas de la aleación de fricción al aluminio B850.....	55
XI	Propiedades comparativas de aleaciones comerciales al cobre.....	63
XII	Composición y propiedades tensiles de bronces al aluminio en SQC.....	67
XIII	Propiedades comparativas de la aleación CDA 925.....	71
XIV	Propiedades comparativas de aleaciones comerciales ferrosas.....	75
XV	Fibras de cerámica disponibles para compuestos de aluminio MMC para SQC.....	78
XVI	Esfuerzo de la matriz de la aleación de aluminio F-332 reforzada con fibra de cerámica.....	79
XVII	Esfuerzo de fluencia y UTS para refuerzos de fibra de cerámica y Sic Whisker.....	80
XVIII	Aplicaciones de materiales compuestos de matrices metálicas.....	101
XIX	Tabla de Resultados.....	131

ABREVIATURAS

Al = Aluminio

C = Carbono

Cal = Calorías

CC = Fundición en coquilla

Co = Cobalto

Cond. = Condición

Cu = Cobre

DC = Fundición por inyección a presión

DF = Forjas a troquel

Fe = Hierro

F.H.T. = Tratamiento térmico completo

GC = Fundición por gravedad

in = Pulgadas

IITRI = Instituto de Investigación de Illinois

Kc = Tenacidad a la fractura

Kg = Kilogramo

Ksi = Miles de libras por pulgada cuadrada

L = Sección Longitudinal

lb = Libra

Mg = Magnesio

Min = Mínimo

mm = Milímetro

MNm = Mega-Newton-metro

MPa = Mega-Pascal

N = Número de Ciclos

Ni = Niquel

Pb = Plomo

PM = Fundición en molde permanente

PS = Esfuerzo de fluencia

SC = Fundición en arena

Si = Silicio

Sn = Estaño

SQC = Moldeo por solidificación bajo presión

ST = Sección transversal-corta

Ton = Toneladas

U.K. = Reino Unido

UTS = Esfuerzo último de tensión

Zn = Zinc

μm = Micro-metro

μin = Micro-pulgada

I N T R O D U C C I O N

El presente trabajo presenta una nueva técnica de fundición denominada SOLIDIFICACION BAJO PRESION (SQC). Este proceso, que aunque es conocido en la antigua Unión Soviética hace ya 100 años, está siendo recientemente comercializado en algunos países como Japón, U.S.A. e Inglaterra.

El proceso SQC consiste básicamente en la solidificación del metal líquido bajo la acción directa de la presión aplicada por medio de una prensa hidráulica. Esta presión debe ser lo suficientemente elevada como para prevenir la aparición de porosidades debido a los gases o las porosidades debido a la contracción. Este proceso es esencialmente una combinación de fundición en molde permanente y forja a troquel.

Una de las principales ventajas de este proceso es que se pueden obtener configuraciones de piezas más complejas en un solo paso, comparándolas con forja, pero las propiedades mecánicas son mucho mejores en forja que en SQC. Otra de las ventajas como proceso de fundición, es el

buen acabado superficial que poseen las piezas obtenidas.

Para la obtención de piezas mediante este proceso es recomendable utilizar una prensa hidráulica de acción doble en vez de una de simple acción, para facilitar la salida de la pieza. Otro factor importante durante la fabricación de las piezas es el control de la temperatura de colado y de la temperatura de moldeo para controlar la microestructura.

CAPITULO I

INFORMACION BIBLIOGRAFICA

1.1. CARACTERISTICAS DEL PROCESO.

El proceso ZGC tiene sus orígenes en una experiencia de *Chernov* en 1872 en el cual la presión de vapor debería ser aplicada al metal fundido, mientras éste se solidificaba en el molde. En realidad, un proceso ZGC ha sido utilizado para fabricar carajones fundidos en Inglaterra por más de 50 años. Aunque el primer intento registrado del

200 piezas de formas diferentes hechas por este método utilizando hierro fundido, aceros y varias aleaciones no ferrosas.

Los estudios provenientes de Norte América de la solidificación bajo presión de metales provinieron alrededor del año 1.960. Un estudio más amplio fue hecho por *Reiss y Kron* investigando el efecto de la presión en la solidificación, la temperatura de colado, y la temperatura del utillaje sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de la aleación al aluminio A356. Desafortunadamente los niveles de presión estudiados fueron demasiado elevados(*) (350 y 700 MPa).

El texto de *Plyatskii* sobre el proceso SQC, es el responsable de proveer un guía para las investigaciones futuras que se han ido haciendo. Él hizo un bosquejo de las limitaciones y avances, las aplicaciones industriales, del equipo y utillaje necesarios para el proceso e impulsó el estudio de éste proceso fuera de la Unión Soviética. Desde

*Se ha encontrado que una presión de 70 MPa(10 ksi) es generalmente suficiente para optimizar las propiedades mecánicas de muchas aleaciones, incluyendo la aleación al aluminio A356.

entonces el desarrollo comercial de la técnica SQC ha tenido lugar en Europa, América del Norte y Japón.

DESCRIPCION DEL PROCESO.-

La fabricación de piezas fundidas en una forma muy distintiva y diferente es posible con la técnica SQC; un nuevo proceso para el moldeo de metales.

La combinación del metal líquido y del movimiento vertical de la prensa sugiere una combinación híbrida de fundición y forja, el cual ha llevado a utilizar calificativos tales como FORJADO DE METALES LIQUIDOS, CONFORMADO POR ESCURRIMIENTO, otros nombres que se utilizan para denominar este proceso son: FUNDICION POR EXTRUSION, EMBUTICION DE LIQUIDOS y CRISTALIZACION BAJO PRESION.

La transformación del metal fundido hecha en un solo paso, con componentes de densidad-total está complementado con el uso de un molde rígido, Fig.1.1. El metal fundido es primeramente depositado en la cavidad del molde, Fig 1.1A., la configuración de la pieza deseada es entonces formada, Fig 1.1B, a medida que las partes del dado se van moviendo para ajustarse estrechamente y

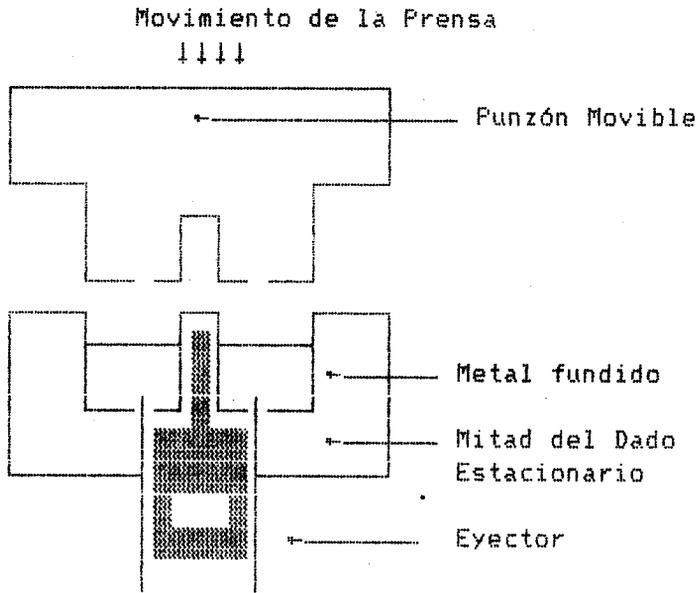
establecer seguidamente un sello de metal fundido. Una presión fuerte es mantenida durante la solidificación, la cual es varias ordenes de magnitud mayor que la presión desarrollada en prácticas de fundiciones convencionales. Consecuentemente, la solidificación ocurre a altas presiones y por transmisión directa de la fuerza aplicada en la parte del dado movable, como lo que ocurre en forja.

Debido a esto, las porosidades por contracción pueden ser prevenidas por la alimentación continúa del metal fundido hasta la interface de solidificación desde el interior de la parte formada. SQC es un proceso único al respecto: Todos los otros procesos de fundición dejan algún residuo de porosidad.

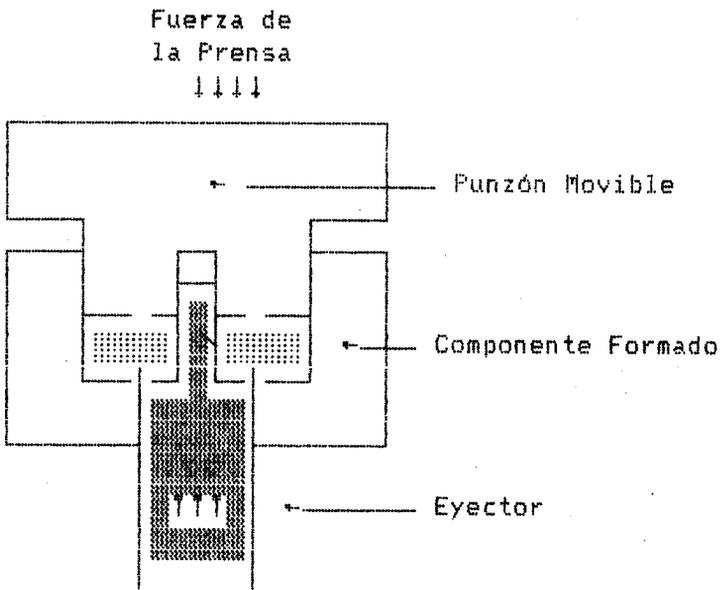
La alta presión aplicada también mantiene los gases de solución entrampados y fomentan el contacto íntimo entre la fundición y el utillaje, con extracción rápida de calor, y obtener como resultado una microestructura refinada. El marcado control de las variables del proceso tales como: la temperatura del metal, temperatura del dado, presión aplicada, tiempo de dilación de la presión, y tiempo de aplicación de la presión, son esenciales para una



BIBLIOTECA



A) Prensa abierta



B) Prensa Cerrada

operación uniforme. Como resultado SQC ha demostrado producir las propiedades más altas de maquinado asequibles de un producto de fundición.

Ventajas infinitas de acción se obtienen de este único método de moldeo de metales. Puede producirse compuestos con densidad-total tanto para aleaciones forjadas como fundidas, permitiendo la obtención de propiedades a nivel de los materiales de forja. El buen estado del material que se obtiene en forja puede ser combinado con configuraciones complejas posibles en procesos de fundición: fundición a través de agujeros, contornos irregulares, superficies complicadas y un buen acabado superficial.

La microestructura e integridad factibles por medio de SQC conlleva a fomentar una variedad de operaciones secundarias de la misma clase que en los productos de forja. Estas operaciones incluyen: tratamiento térmico, soldaduras, acabado superficial, pintada, anodizado.

La ventaja en costos se deben al alto grado de utilización del metal fundido, ya que virtualmente todo el metal fundido va en el elemento. El proceso de automatización y el relativo tamaño pequeño de

los dados y la máquina, cuando se la compara con la fundición a troquel, son otros de los factores que contribuyen a un bajo costo.

CAPACIDADES DEL PROCESO.-

Tamaño de la Fundición y Rango de Peso. Un factor limitante para este proceso puede ser el tamaño de la prensa requerida. En U.K. se han utilizado prensas de hasta (1.476 ton.), para producciones comerciales de ruedas que pesan aproximadamente 19 kg.(42 lb.).

Volúmenes de Producción. Es necesario equipo muy costoso y de precisión, asociado con el tiempo de dilación en la manufactura. Grandes cantidades de producción se requieren para justificar los costos del utillaje, pero la razón de producción es relativamente lenta, está entre 15 y 60 fundiciones/hora/máquina.

Capacidad de espesor. A pesar de que se ha dicho que espesores tan delgados como 0,3 mm.(0,012 in.) pueden ser producidos con SQC, el proceso funciona mejor para fundiciones con secciones de espesores por sobre los 6 mm.(0,24 in.).

Es importante tener en cuenta que la presión mínima requerida depende de la geometría y espesor de la pieza a formarse en SQC. Cuando el elemento a moldearse no es uniforme en su sección transversal, existe frecuentemente una porción de la fundición que se solidifica primero y por lo tanto la presión remanente no es suficiente para el resto del volumen. En tales casos, la presión aplicada debe ser de tal magnitud que deforme plásticamente la costra solidificada y que quede suficiente presión de 70 a 105 MPa (10 a 15 ksi) en el resto del elemento que se está moldeando.

Agujeros en la Fundición. Agujeros pueden incorporarse en la fundición a través del uso apropiado de dados.

Réplica de Detalles. La aplicación de la presión durante la fundición asegura un alto grado de la réplica del detalle del dado utilizado en la fundición.

Acabado Superficial. El acabado superficial obtenido en el proceso SQC es equivalente a aquellos obtenidos en fundición a presión, 0,4 a 3,2 μm . (16 a 125 $\mu\text{in.}$).

Precisión Dimensional. Las aleaciones al aluminio para fundición, pueden ser producidas con una tolerancia de 0,2 mm/100 mm(0,002in/in).

TIPO DE ALEACIONES USADAS EN ESTE PROCESO.

El proceso SQC ha sido satisfactoriamente aplicado a una variedad de aleaciones ferrosas y no ferrosas. Los materiales estudiados incluyen aleaciones al aluminio forjadas y fundidas, aceros inoxidable, aceros de alta resistencia, hierro fundido, super-aleaciones a base de níquel, y aleaciones que aún se encuentran en estudio.

ALEACIONES AL ALUMINIO.-

Afortunadamente, más de una docena de aleaciones comerciales al aluminio han sido provadas de ser compatibles al proceso SQC, permitiendo la utilización de aleaciones normalmente asociadas con forja, extrusión, fundición en molde permanente, Fundición en arena y fundición a troquel.

- ALEACIONES AL-SI.

Aleaciones Binarias Al-Si.- La combinación de altas presiones y moldes metálicos nos conduce

a un alto coeficiente de transferencia de calor, el cual nos lleva a una alteración en la microestructura (el refinamiento intergranular es la más obvia manifestación de coeficiente de transferencia de calor elevado).

La razón de cambio esperada en la temperatura de enfriamiento de un material debido al incremento de presión se lo indica por medio de la ecuación de Clasius-Clapeyron:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T_f(V_l - V_s)}{L_f}$$

en donde T_f es la temperatura de equilibrio de enfriamiento, V_l es el volumen específico del sólido, y L_f es el calor latente de enfriamiento. Para aleaciones al aluminio con composiciones de un 7% y 14% de peso de silicio, y SQC a 150 MPa, Fig 1.2, indican un movimiento hacia arriba de las temperaturas del líquido y eutécticas de 9K y 2,25K respectivamente. Aunque ocurren incrementos similares en la temperatura de enfriamiento en todas las aleaciones comerciales Al-Si, éste efecto térmico tiene muy poca, o ninguna influencia en el refinamiento granular, lo cual contradeciría lo dicho anteriormente por la

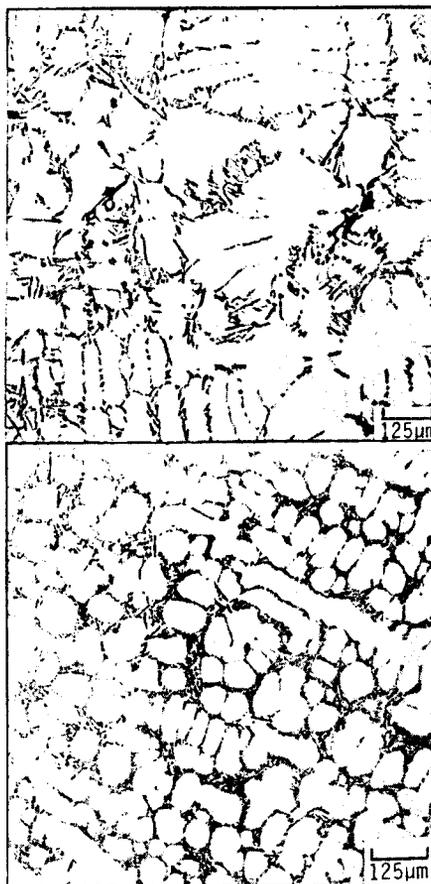


FIG 1.2 (Arriba) Al-7% peso Si fundida a presión atmosférica. (abajo) Al-7% peso Si fundida a 150 MPa.

ecuación de Clasius-Clapeyron. El único efecto de la presión sobre la microestructura no es causada por los cambios térmicos referidos en la ecuación, sino por el incremento en los coeficientes de transferencia de calor, los cuales aumentan hasta un valor máximo cuando la presión llega alrededor de 100 MPa.

Aleaciones Comerciales Al-Si.— Varias aleaciones comerciales de fundición Al-Si han sido SQC, y sus propiedades mecánicas han sido evaluadas y comparadas con aquellas hechas en procesos de fundición en arena y fundición por gravedad, de la misma composición; Tabla I.

Una formidable mejora en las propiedades puede ser logrado con SQC. En particular la aleación LM24, el cual es barata, puede proporcionar mejores propiedades mecánicas que las aleaciones más caras tales como las aleaciones LM25 y A357, cuando han sido fundidas en SQC y han recibido tratamiento térmico completo. La aleación LM24, la cual es considerada como no tratable térmicamente, muestra un límite elástico de 0,2% tres veces más alto; y un UTS el doble de los requerimientos estándares especificados. Utilizando la técnica SQC no hay un crecimiento masivo-daño en forma de placas de

Aleación		0,2% PS (MNm^{-2})	UTS (MNm^{-2})	Elongación %
LM24	Requerimiento Min.	100	180	1,5
	CC	110	200	2,0
	SQC(Cond. Bruta)	126	233	2,7
	SQC(F.H.T)	330	366	2,0
LM25	CC(Cond. Bruta)	90	180	5,0
	SQC(Cond. Bruta)	104	214	5,3
	CC(F.H.T)	240	310	3,0
	SQC(F.H.T)	274	331	7,0
Aleación		0,2% PS (MPa)	UTS (MPa)	Elongación %
A357	SC	200,6	226,6	1,6
	CC	248,6	313,6	6,9
	SQC	283	347	9,3

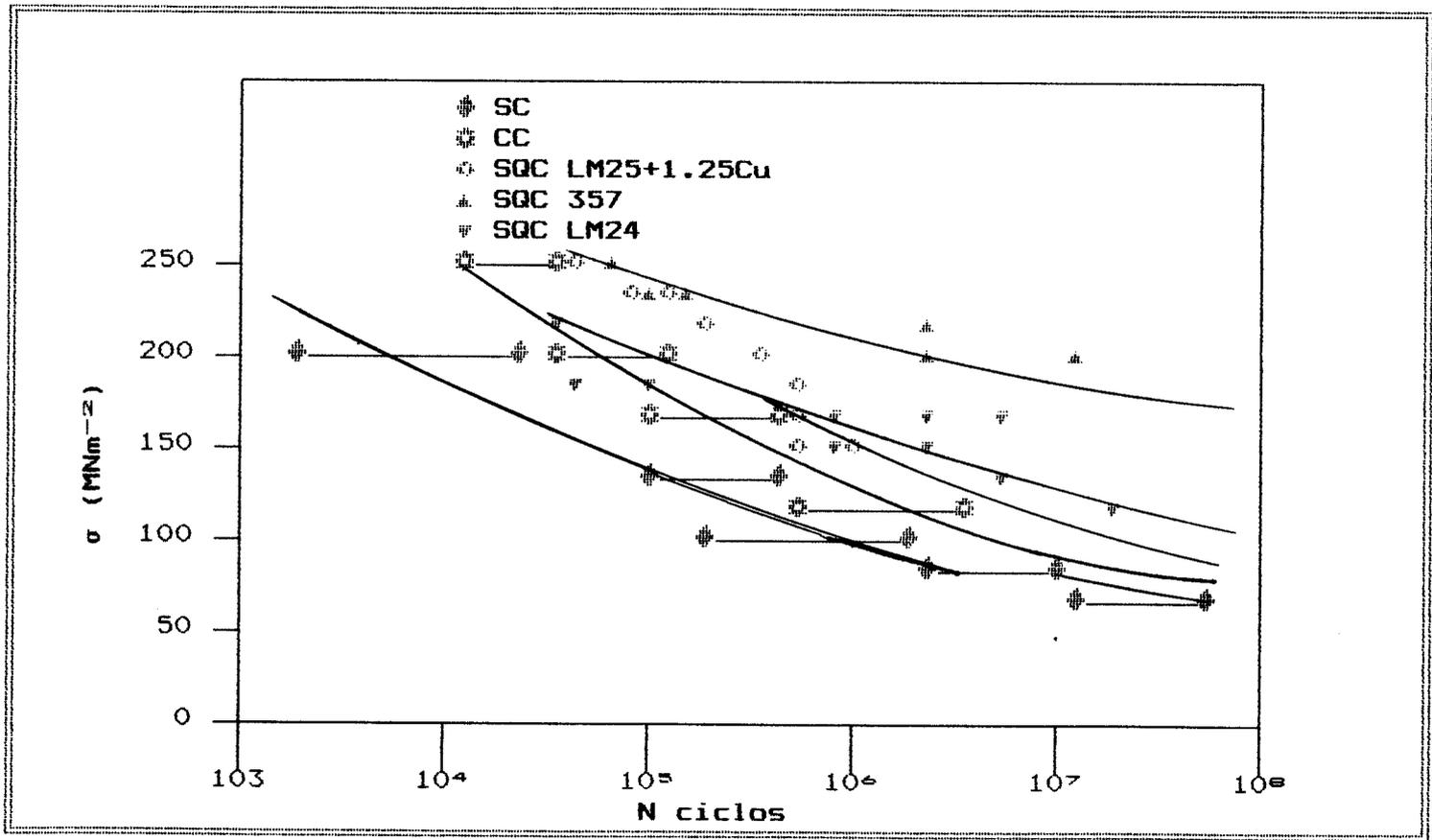
TABLA I *Propiedades mecánicas típicas de tres aleaciones comerciales fundidas Al-Si usando diferentes técnicas.*

los cristales de aluminio, ya que estos permanecen muy pequeños y uniformemente dispersos a través de toda la matriz de solución, y de ahí que no se muestran sus efectos usuales de fragilidad.

Las propiedades dinámicas de la aleación LM24 en SQC, también son superiores a aquellos materiales de fundición convencionales, Fig 1.3. Por ejemplo, está aleación en SQC y con tratamiento térmico completo muestra un mejor comportamiento en las propiedades de fatiga que aquellas aleaciones más costosas y con alta pureza. Esto se debe nuevamente a la ausencia de las placas grandes de fragilidad de los compuestos (Fe, Al, Si), al refinamiento de los constituyentes primarios y eutécticos, y a la ausencia de porosidades.

Examinando y comparando las propiedades de la aleación A357, los resultados claramente muestran ventajas en el uso de la técnica SQC, obteniendo las propiedades tensiles más altas; con lo cual se confirma un carácter superior del producto obtenido, en contraposición a otros métodos de fundición.





- SDC DE ALEACIONES AL ALUMINIO FORJADAS.

Como mencionamos anteriormente es factible utilizar el método SDC de aleaciones convencionales forjadas, debido a que la fluidez y moldeabilidad no son características importantes en este proceso de fundición de alta presión. Varias aleaciones de alta resistencia han sido satisfactoriamente fundidas bajo este proceso y las propiedades mecánicas de dichas aleaciones han sido evaluadas. Se ha observado generalmente que las aleaciones de fundición SDC y que han recibido tratamiento térmico completo muestran propiedades mecánicas que recaen en los valores de las propiedades mecánicas de los materiales forjados en la sección longitudinal (L) y transversal-corta (ST). Los materiales de fundición SDC pueden ser producidos teniendo una microestructura uniforme fina, y de allí su comportamiento dúctil-isotrópico. A diferencia de los materiales de fundiciones a troquel, en el cual la estructura del grano no es completamente controlable.

Aleación Al-4,5%Cu.— Se ha encontrado que las propiedades tensiles de la aleación Al-4,5%Cu, tratada térmicamente están marcadamente influenciadas por el tamaño de grano, éstas aumentan

significativamente con la disminución del tamaño de grano. Este perfeccionamiento ha sido atribuido principalmente a los cambios asociados en la forma de la porosidad de los materiales fundidos. Con el objeto de estudiar el verdadero efecto del tamaño de grano en las propiedades mecánicas de las fundiciones, la porosidad en éstas debe ser eliminada completamente. El proceso SDC, el cual es 100% compacto, permite por lo tanto que las propiedades de los materiales de fundición sean propiamente impuestas.

Una comparación de los efectos de tamaño de grano sobre las propiedades tensiles en SDC y fundición en arena para la aleación Al-4,5%Cu, se muestran en la Tabla II; estas demuestran una mejora en las propiedades debido al refinamiento de grano para ambos procesos. Aunque se puede decir que las propiedades son mejores en los materiales moldeados de SDC, en particular la elongación.

La influencia de la presión, temperatura de moldeo y la temperatura del dado sobre las propiedades tensiles de algunas aleaciones Al-4,5% Cu han sido estudiadas por Asaeda. Se observó que estas en los lingotes formados en el proceso SDC en condición bruta, fueron remarcadamente altos cuando se los comparó con materiales fundidos a presiones

Condición	Diámetro de Grano (mm)	0,2% PS (MNm ⁻²)	UTS (MNm ⁻²)	Elongación %
SQC (F.H.T)	1,8	163	270	14
	0,89	184	309	15
	0,67	186	341	19
	0,48	184	346	22
SC (F.H.T)	2,5	-	200	2
	1,2	-	231	3
	0,5	-	284	6
	0,2	-	340	13

TABLA II *Efecto del tamaño de grano sobre las propiedades tensiles de la aleación SQC Al-4,5%Cu, comparándola con la aleación convencional.*

atmosféricas. Esto se debe a una disminución de la cantidad del compuesto intermetálico Al_2Cu formado y a la presencia de una estructura sub-granular en el material de SAC.

Las propiedades tensiles más altas fueron obtenidas cuando se formó el material comprimiendolo en un punto intermedio entre el líquido y el sólido.

Una comparación de las propiedades tensiles de la microestructura granular fina entre la aleación SAC Al-4,5% Cu, con aleaciones forjadas de la misma composición, tales como la 2025, muestra un esfuerzo de tensión más alto, Tabla III. Esto puede ser debido a los altos niveles de impureza de magnesio y silicio los cuales causan que la aleación comercial 2000, sea más susceptible a un envejecimiento artificial, y de esta manera obtener un nivel deseado de esfuerzos más alto. Aunque, la ductilidad de los materiales en SAC es ligeramente superior que la de aquellos materiales forjados.

Aleaciones de la serie 2000 y 6000.— Un rango de aleaciones al aluminio forjadas, incluyendo la

Condición	0,2% PS (MNm^{-2})	UTS (MNm^{-2})	Elongación (%)
SQC(F.H.T)	184	346	22
2025 (FORJA)	225	400	19

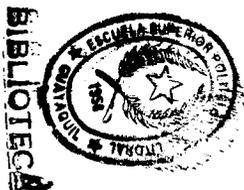
TABLA III Comparación de las propiedades tensiles entre la aleación SQC Al-4,5%Cu y la aleación forjada de la misma composición.

serie 2000 y 6000 de especificaciones estándar, han sido estudiadas por Williams y Barlow. Los resultados de las pruebas indican que las aleaciones al aluminio forjadas responden de una manera individual al proceso SOC, y no todas responden bien, Tabla IV. Por ejemplo, se encontró que las propiedades tensiles de las aleaciones 6066 y 2014 que contienen manganeso fueron mucho más bajas que aquellos valores típicos obtenidos en los materiales forjados en la sección longitudinal.

Una aleación que responde extraordinariamente bien a este proceso de fundición es la aleación 6061, la cual contiene solo una pequeña cantidad de cobre (~0,5% de peso), Tabla V. Estos resultados sugieren que las aleaciones de la serie Al-Mg-Si, podrían beneficiarse con el uso de esta técnica de moldeo. Las propiedades mecánicas que muestra esta aleación en la condición T6, se pueden comparar favorablemente con las propiedades que se obtienen en forja. Estos resultados y aquellos obtenidos para otras aleaciones al aluminio, indican que esta presente suficiente soluto en la solución al completarse la solidificación, para permitir una reacción significativa de endurecimiento por precipitación que tiene lugar sin separar la

Condición	0,2% PS (MNm ⁻²)	UTS (MNm ⁻²)	Elongación (%)
SQC (T6)	248	340	17
FORJAS A TROQUEL (Mínimo)	(L) 241 (ST)241	262 262	7 5
FORJAS TIPICAS	(L) 276	310	12

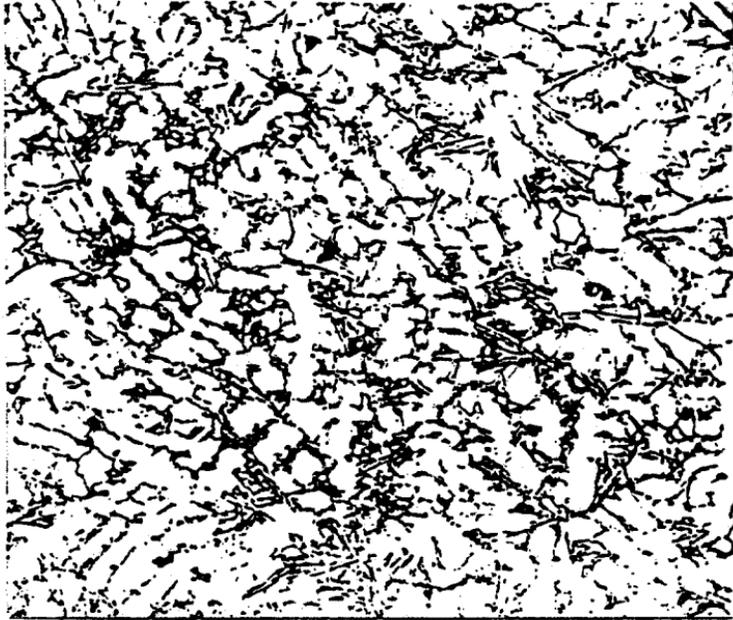
TABLA V *Comparación de las propiedades tensiles entre los materiales SQC 6061 y aquellos de forjas a troquel.*



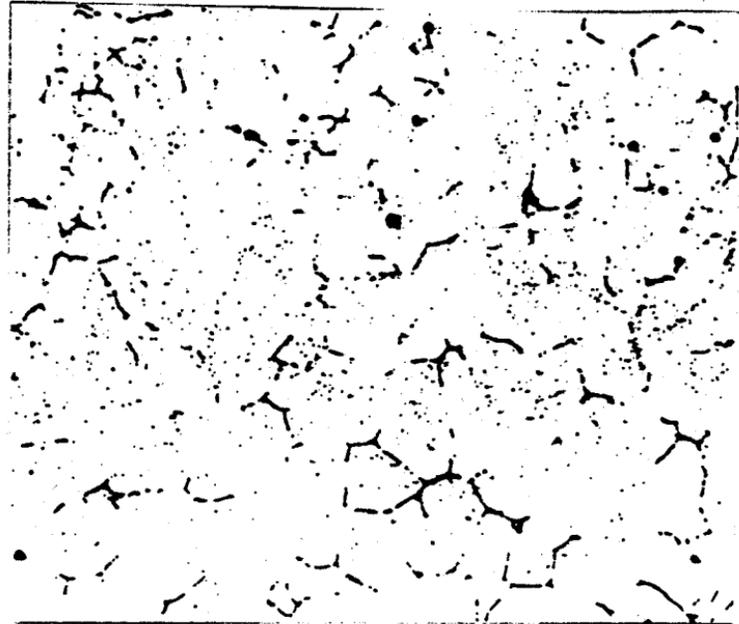
solución tratada térmicamente, Fig 1.4.

Aleaciones de alta resistencia 7000.—Investigaciones de la influencia del proceso SQC sobre las propiedades tensiles de la aleación aeroespacial 7000, han demostrado que el tamaño de grano en este proceso es un factor significativo en el control de las propiedades mecánicas, de la misma manera como el tamaño de grano es un factor determinante en las propiedades de otras aleaciones forjadas. El efecto de la presión sobre las propiedades tensiles en ésta aleación también han sido examinadas. Las propiedades mejoran significativamente cuando se aplica el primer incremento de presión de 50 MPa, pero más allá de éste valor, no existe mejoría en las propiedades obtenidas, Tabla VI, Fig 1.5.

Estos resultados ilustran el principio básico del proceso SQC: el proceso de fundición en molde permanente (0,1 MPa), contiene grandes cantidades de porosidad, las cuales afectan adversariamente a las propiedades mecánicas; incrementando la presión externa aplicada a 50 MPa, se elimina toda la porosidad y la aleación muestra mejoras significativas en sus propiedades. Más allá de este nivel de presión aplicada, no existe ningún mejoramiento en la calidad de la fundición



(A) SQC (Condición bruta) de *colada*
en



(B) SQC (Condición T6)

FIG 1.4 Microestructura de la aleación al aluminio SQC 6061 (250X)

<i>Presión de Moldeo (MPa)</i>	<i>0,2% PS (MNm⁻²)</i>	<i>UTS (MNm⁻²)</i>	<i>Elongación (%)</i>
0,1	474	524	5,5
50	480	551	11,1
100	485	551	12,2
300	475	548	11,9
<i>Lámina</i>	<i>(L) 495</i>	<i>(L) 565</i>	<i>(L) 15</i>
<i>Material</i>	<i>(ST) 519</i>	<i>(ST) 563</i>	<i>(ST) 7</i>

TABLA VI *Efecto de la presión de moldeo sobre las propiedades tensiles de la aleación 7010.*

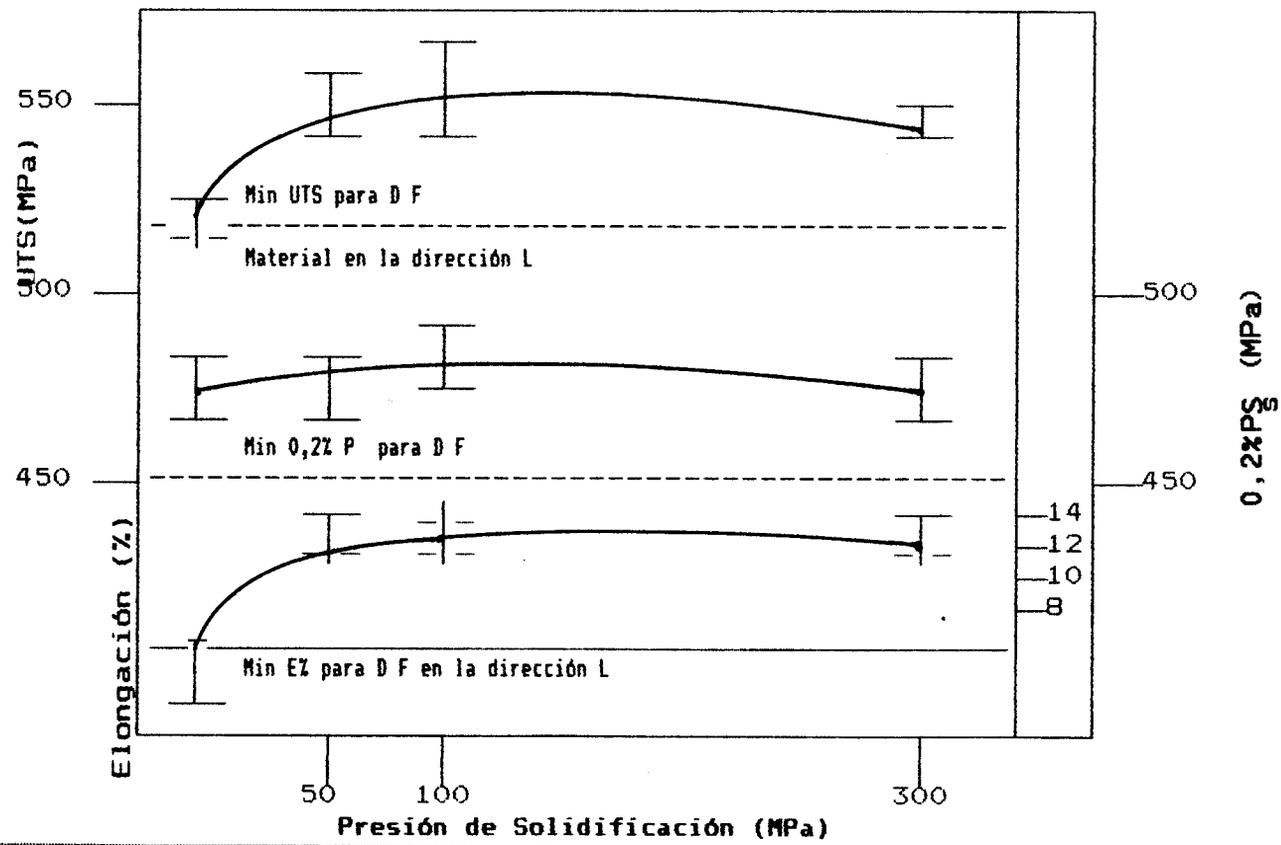


FIG 1.5 Propiedades tensiles de la aleación SAC 7010 como función de la presión de solidificación.

obtenida y por lo tanto, no se espera que tenga propiedades mecánicas mejores. Estos resultados han sido obtenidos en los lingotes de fundición simple. Para piezas de formas más complicadas se puede anticipar que se requieren presiones más altas para producir fundiciones libres de porosidad.

Para fundiciones con integridad total que son por definición fundiciones SQC, el efecto de la influencia de la porosidad sobre los parámetros metalúrgicos se pueden estudiar independientemente. Las Figuras 1.6 y 1.7 muestran la influencia del tamaño de grano en el comportamiento de la fatiga y en la resistencia a la fractura de la aleación de fundición SQC 7010 con tratamiento térmico completo. El límite a la fatiga aumenta con la disminución del tamaño de grano; mientras que la resistencia a la fractura aumenta con el aumento del tamaño de grano, dentro del rango de 70-800 μ m. Con el objeto de obtener las propiedades deseadas, la estructura granular puede ser manipulada con el control completo de las condiciones de moldeo, las cuales incluyen temperatura del metal líquido, temperatura del molde y presión aplicada. Normalmente no es necesario utilizar agentes refinadores de grano

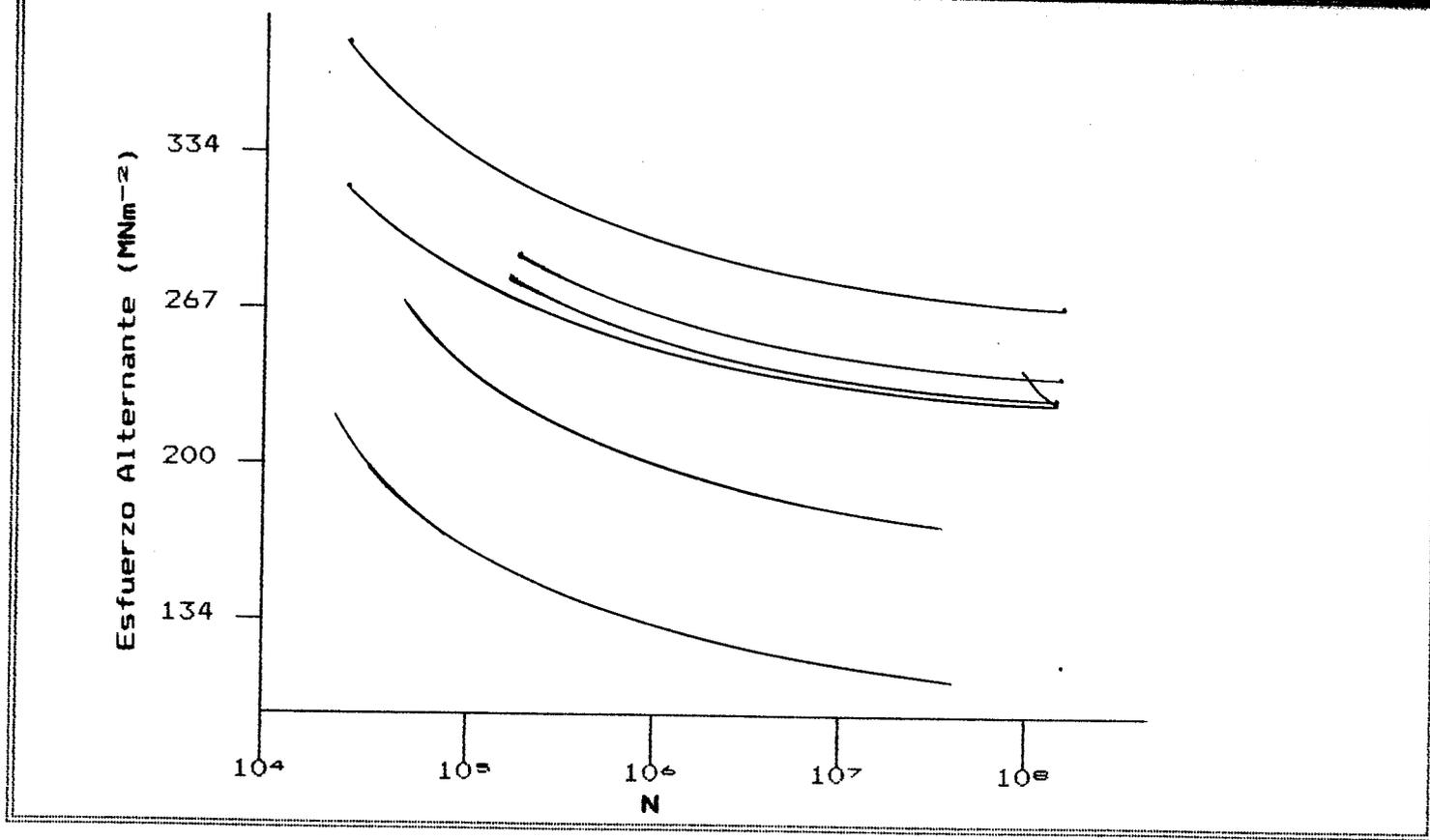


FIG 1.6 *Curvas de fatiga de la aleación 7010.*

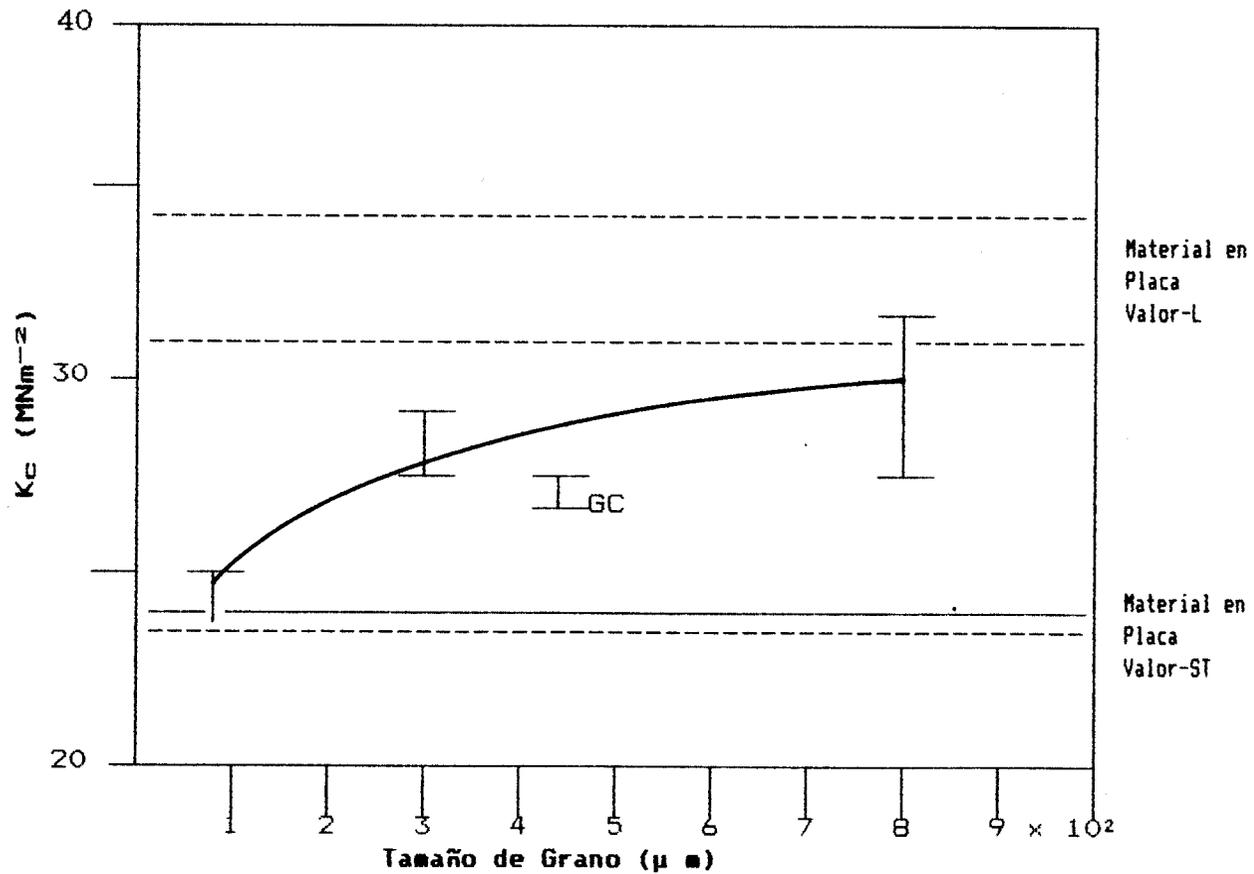


FIG 1.7 Efecto del tamaño de grano sobre los valores de tenacidad a la fractura, K_c , de la aleación SGC 7010.

para generar morfologías de grano fino, así como tampoco altas temperaturas de colado necesarias para asegurar el llenado completo del dado.

Es bien conocido que, aunque las aleaciones de la serie 7000 pueden soportar esfuerzos de tensión extremadamente altos, por medio del endurecimiento por precipitación, su resistencia a la corrosión bajo tensión es a menudo inaceptable, especialmente en la orientación de la sección transversal-corta (ST). La introducción del tratamiento de sobre-envejecimiento puede mejorar su resistencia a la corrosión bajo tensión, pero al mismo tiempo, puede sufrir una pérdida significativa de sus propiedades tensiles. Uno de los mayores beneficios obtenidos como resultado de la estructura de grano isotrópica de las aleaciones SQC de la serie 7000, es la excepcional alta resistencia a la corrosión bajo tensión, el cual es comparable con los materiales convencionales forjados.

- OTRAS ALEACIONES AL ALUMINIO UTILIZADAS.

Aleación A380. - Propiedades satisfactorias son a menudo obtenidas usando una aleación altamente fundible, la cual nos da un acercamiento óptimo de

costos cuando no se necesita tenerlos niveles de propiedades que se obtienen con tratamiento térmico. La aleación fundida a troquel A380 ampliamente utilizada, responde muy bien al proceso SQC. Propiedades en la condición de fundición bruta, Tabla VII; fueron obtenidas utilizando especímenes de pruebas cortadas en fundiciones actuales, en vez de usar barras fundidas en las pruebas, como comunmente se hace en la industria de fundición. La típica microestructura dendrítica del material SQC A 380, se muestra en la Fig 1.8.

Aleación al aluminio 356.— Propiedades de alto nivel pueden obtenerse en aleaciones que responden al proceso de dos-pasos de tratamiento térmico y endurecimiento por envejecimiento. Los investigadores observaron que es importante la eliminación del óxido del metal fundido para producir mejores propiedades mecánicas. Se registraron mejoras significativas en la elongación, resistencia al impacto y resistencia a la fatiga de los materiales en SQC, que en los materiales de fundición en arena y los materiales de forja, sometidas a tratamiento térmico completo. Tabla IX; además de una microestructura fina, como resultado del contacto íntimo entre la

Aleación	UTS (ksi)	Límite de Fluencia (ksi)	Elongación (% in. 1 in.)	Dureza (BHN-500kg)
A 380	34,8	27,3	2,1	69-71

TABLA VII *Propiedades tensiles de la aleación SGC A 380.*

Aleación	Proceso	Esfuerzo de Tensión		Esfuerzo de Fluencia		Elongación (%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
JIS-AC4D-T6 (355-T6)	SQC	330	47,9	-	-	9
	GC	290	42,1	-	-	3
JIS-AC4C-T6 (356-T6) 356-T6	SQC	295	42,8	-	-	13
	GC	280	40,6	-	-	3
	SQC	309	44,8	265	38,5	3
	PM	262	38,0	186	27,0	5
	SC	172	25,0	138	20,0	2

TABLA VIII *Propiedades comparativas de aleaciones comerciales a base de Aluminio.*





G 1.8 *Microestructura de la aleación al
aluminio SQC A380 (100 X)*

	<u>UTS</u> (ksi)	<u>Refuerzo de Fluencia</u> (ksi)	<u>Elongación</u> (% in 1 in)
<u>SQC</u>			
- T6	49,4	36,0	17,0
- T5	48,3	36,8	15,0
<u>FORJA</u>			
- T6	38,0	35,0	10,0

TABLA IX *Propiedades de la aleación al aluminio 356.*

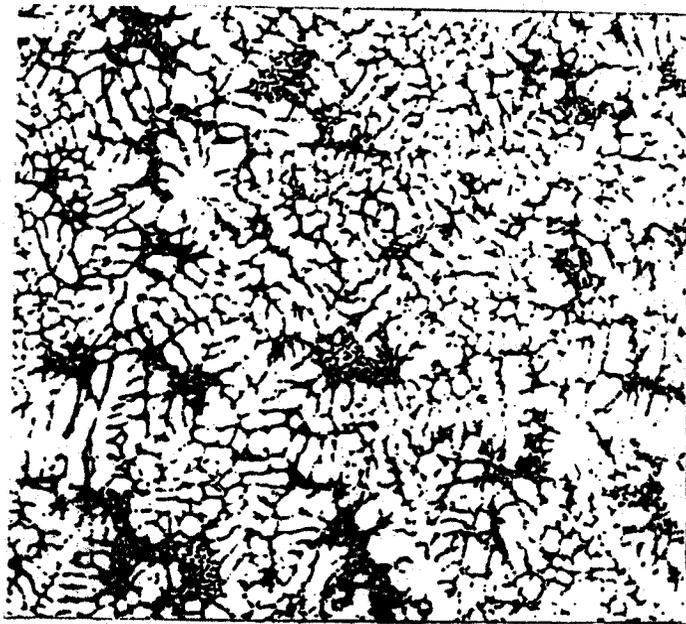
fundición y el utillaje, debido al aumento de la presión, con lo cual se evita el uso de refinadores de grano, Fig 1.9.

Aleación B850.- Algunas aplicaciones requieren otras propiedades que no sean resistencia o dureza. La aleación de aluminio B850, que contiene 6% Sn, es generalmente utilizada por sus características de resistencia al rozamiento. Propiedades de resistencia a la compresión y al desgaste se obtuvieron para la aleación SOC B850, y se los comparó con resultados obtenidos en fundición por centrifugación. Tabla X. Es evidente el efecto del aumento de la tasa de enfriamiento en el refinamiento de la estructura del material SOC, Fig 1.10, comparándola con un material de colado continuo.

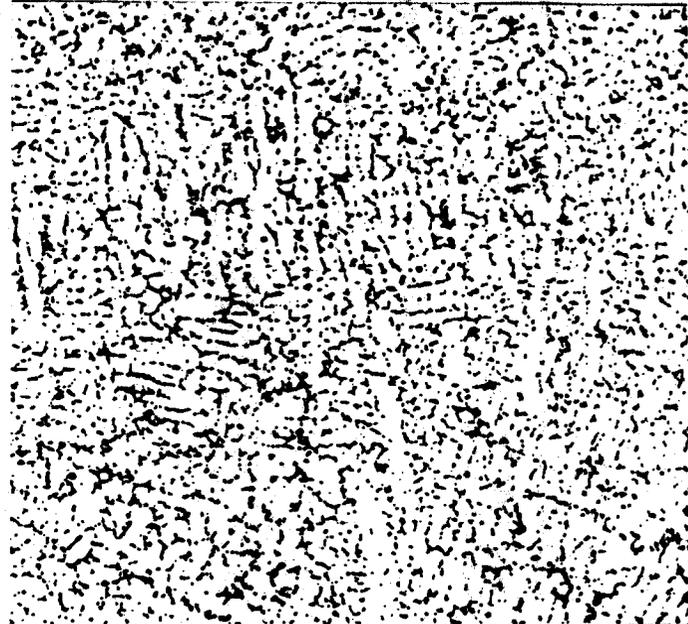
ALEACIONES AL MAGNESIO.-

- ALEACION FUNDIDA AZ91.

La aleación fundida más común al magnesio es la aleación AZ91, la cual contiene ~9% Al y ~1% Zn. Esta aleación es utilizada de dos maneras. La primera, como una aleación fundida en molde permanente; y la segunda, como una aleación fundida a alta presión. En las cuales se obtiene tamaño de grano pequeño y grande, respectivamente



(A) SQC (Condición bruta)



(B) SQC (Condición T6)

FIG 19  Estructura de la aleación al aluminio SQC 356 (100X)

	<u>Moldeo por</u> <u>Centrifugación</u>	<u>SQC</u>
<u>Prueba de Compresión:</u>		
-0,2% Resistencia a la Fluencia (Ksi)	27,5	21,0
-Esfuerzo al 10% de la carga aplicada (Ksi)	40,7	44,6
-Esfuerzo al 20% de la carga aplicada (Ksi)	49,1	59,4
-Dureza, RE	71,5	71,0
<u>Prueba de Fatiga:</u>		
-Coeficiente de fricción estático inicial	0,223	0,175
-Coeficiente de fricción dinámico inicial	0,200	0,133
-Coeficiente de fricción dinámico final	0,113	0,066

ABLA X: *Propiedades comparativas de la aleación de fricción al Al B850.*

y éste no es fácilmente controlable. Además, ambos tipos de fundiciones contienen cantidades considerables (pero no uniformes) de porosidad, y por consiguiente las propiedades mecánicas están influenciadas por el tamaño de grano y la porosidad.

Utilizando el proceso SOC, el tamaño de grano puede ser controlado efectivamente y por lo tanto se pueden tener en función de éste propiedades mecánicas reales.

La variación en las propiedades de la aleación **AZ91** en condiciones de fundición bruta, y con tratamiento térmico completo, para materiales hechos en fundición en arena, fundición en molde permanente, fundición a troquel y SOC, se muestran en la Fig 1.11. Para ambas condiciones los materiales en SOC muestran valores más altos de UTS, y una disminución de 0,2% PS y de la elongación. El ciclo de tratamiento térmico completo aumenta el valor UTS del material en SOC desde 200 MNm^{-2} a 260 MNm^{-2} , con la consiguiente disminución en elongación de solamente 1%. Aunque, el proceso SOC da las mejores propiedades mecánicas para la aleación **AZ91**; ésta aleación tiene inherentemente baja resistencia a esfuerzos

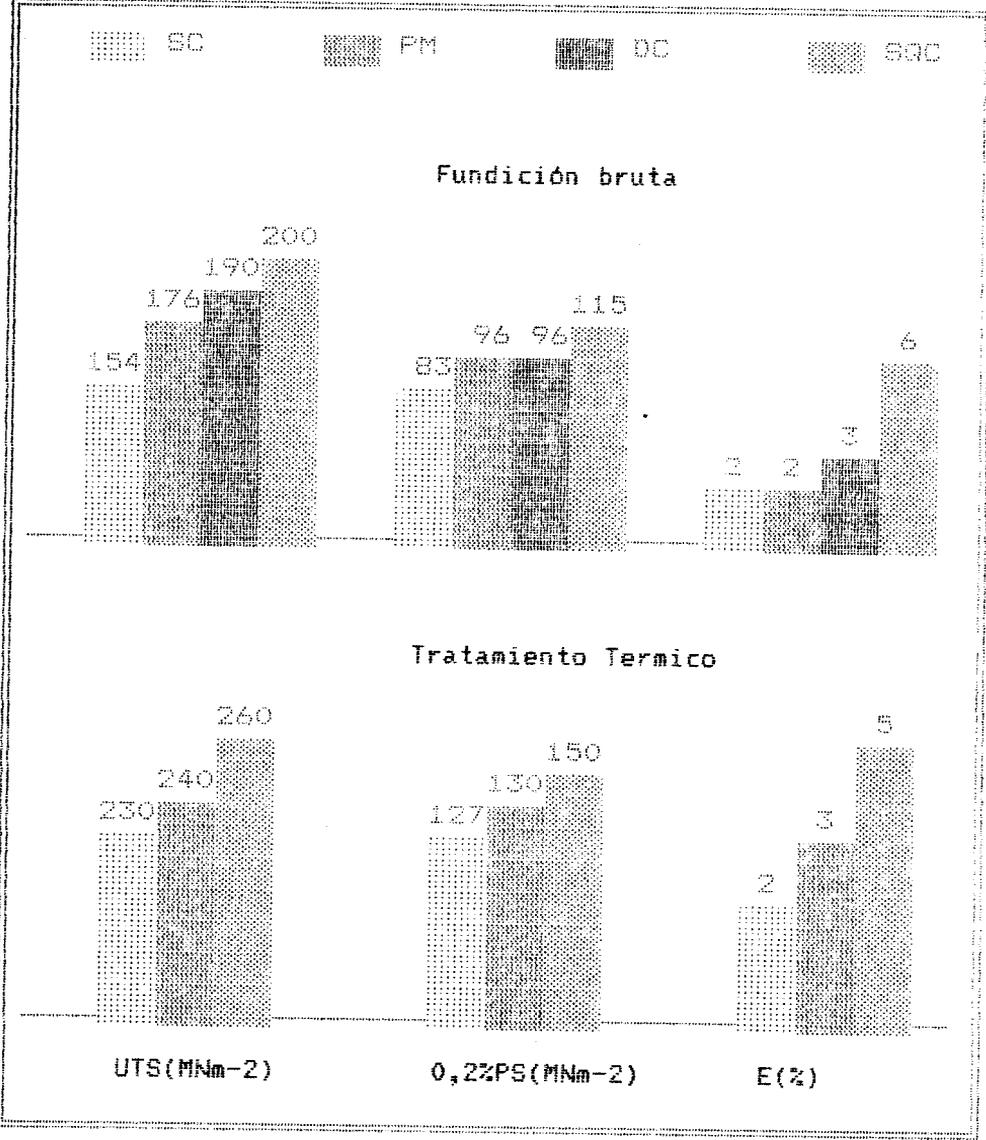


Fig 1.11 Propiedades mecánicas de la aleación AZ91, en la condición de fundición bruta y tratamiento térmico, para varios procesos de fundición.

y las mejoras obtenibles en SQC y con tratamiento térmico completo son solamente marginales cuando se comparan con la fundición en molde permanente. Mejoras adicionales pueden esperarse para composiciones que se encuentran fuera de las especificaciones de fundición, las cuales son difíciles de ser fundidas. SQC puede hacer uso del extra contenido de soluto para mejorar las propiedades por medio del aumento del endurecimiento por precipitación.

- ALEACIONES FORJADAS AZ31 Y ZCM711.

La aleación forjada AZ31 (que contiene 3% de aluminio y 1% zinc) es utilizada en la condición extruida de endurecimiento por acritud. La aleación posee un valor UTS de 255 MNm^{-2} en la dirección longitudinal. Esta aleación no es tratable térmicamente. La aleación SQC en la condición bruta posee un valor UTS de 195 MNm^{-2} en muestras que contienen un tamaño de grano de $\sim 0,2 \text{ mm}$. Este valor es mucho menor que el de barra formada por extrusión en la dirección de laminado, pero probablemente mejores que las propiedades por extrusión en la dirección transversal-corta.

Recientes descubrimientos han producido una nueva

aleación al magnesio forjada ZCM711, que contiene 7% zinc, 1% cobre y 1% manganeso; la cual es tratable térmicamente. Esta aleación en SQC tiene una estructura granular equiaxial fina, y el compuesto intermetálico Mg_2Cu se encuentra equilibradamente distribuido a lo largo de toda la microestructura. Aunque, una comparación de las propiedades mecánicas de la aleación forjada y fundida ZCM711, Fig. 1.12, muestran que ésta aleación de endurecimiento estructural, no parece reaccionar de la misma excelente forma como lo hacen las aleaciones de endurecimiento estructural a base de aluminio, tales como la 7010, en la cual con SQC se logra obtener las mismas propiedades mecánicas de los materiales forjados en la dirección longitudinal.

ALEACIONES AL COBRE.-

- LATON AMARILLO.

El latón es ampliamente fabricado en composiciones que contienen 60-65% Cu, con pequeñas cantidades de Si(1%) ó Pb(2%) para fundición a presión y para forja, respectivamente; con balance de Zn. Afortunadamente, las composiciones estándar de latones responden bien al proceso SQC y se han

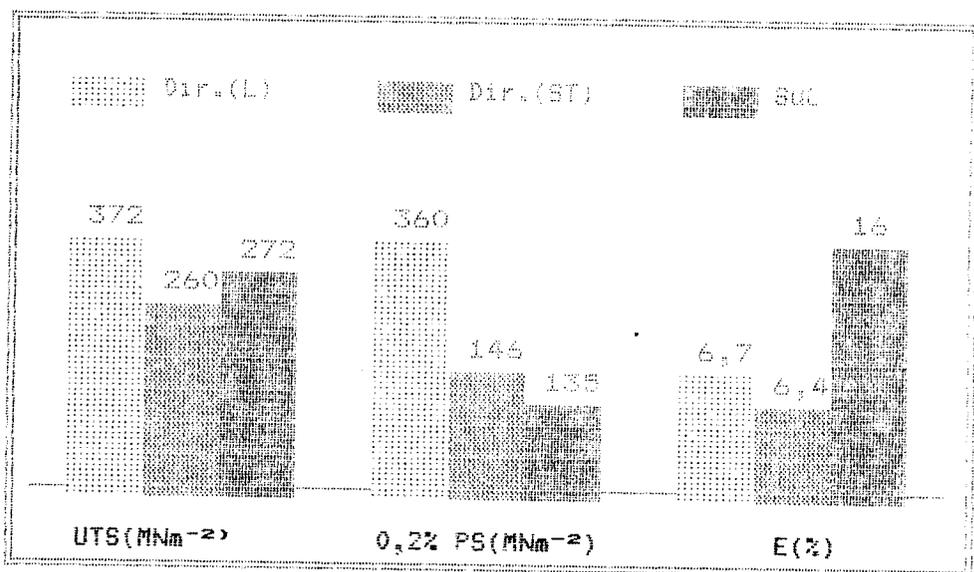


Fig 1.12 Comparación de las propiedades mecánicas en la condición forjada y SOC para la aleación ZCM711.

hecho algunos componentes prototipo en una variedad de configuraciones.

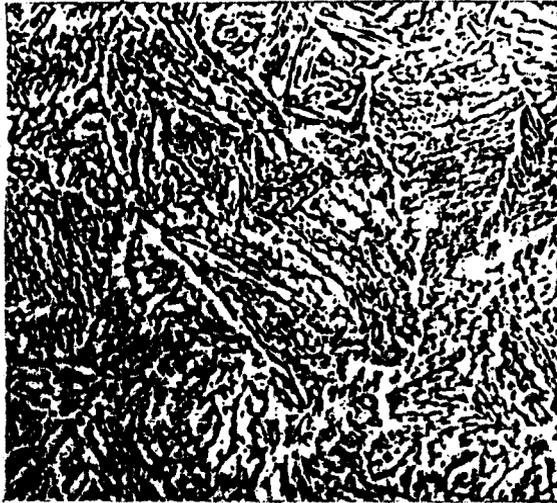
El latón forjado, CDA 377, ha sido SRC, con un alto grado de éxito. Las propiedades tensiles fueron determinadas y se las comparó con valores en la condición de forja (extrusión), Tabla XI.

También se observó que existe una clara similitud en la micrografía de los materiales en SRC y forja, Fig 1.13. Ambos muestran una estructura granular fina, homogénea, sin porosidades. De alguna manera en el material SRC existe una distribución más isotrópica y algunas veces una forma más fina de la fase alfa transformada rica en Cu.

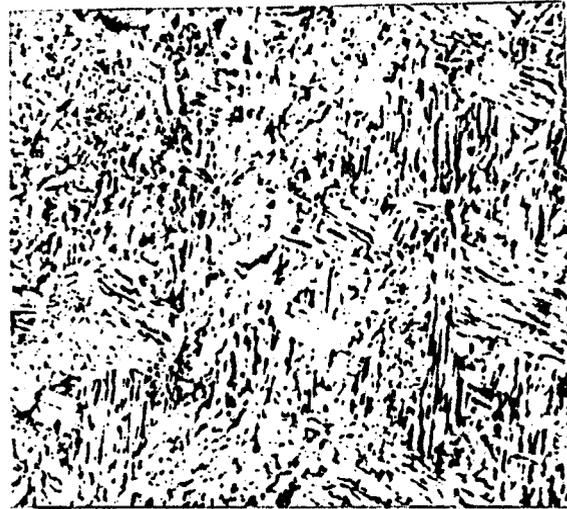
Aunque los latones Cu-Zn tienen rangos de fundición menores que otras aleaciones de Cu, aleaciones con rangos de fundición aún menores reducirían el costo del proceso y disminuirían el tiempo de ciclo e incrementarían la vida del dado. Las características del proceso SRC potencialmente permiten la utilización de nuevas aleaciones que tradicionalmente no se utilizan en otros métodos de fundición. Resultados iniciales prometedores se han obtenido en aleaciones de Cu que contienen

Aleación	Proceso	Esfuerzo de Tensión (ksi)	Esfuerzo de Fluencia (ksi)	Elongación (%)
CDA 377 Bronce Forjado	SQC	55,0	28,0	32,0
	EXTRUSION	55,0	21,0	48,0
CDA 624 Bronce al Aluminio	SQC	113,5	53,0	13,5
	FORJA	102,0	50,0	15,0
CDA 674 Bronce al Manganeso	SQC	75,0	47,0	7,0
CDA 865 Bronce al Manganeso	SQC	69,0	34,7	13,0

TABLA XI *Propiedades comparativas de aleaciones comerciales al cobre.*



(A) SQC



(B) Forja

FIG 1.13 *Comparación de las microestructuras del latón forjado CDA 377 (250X)*

concentraciones significativas de Mn y Si, con adiciones de Zn.

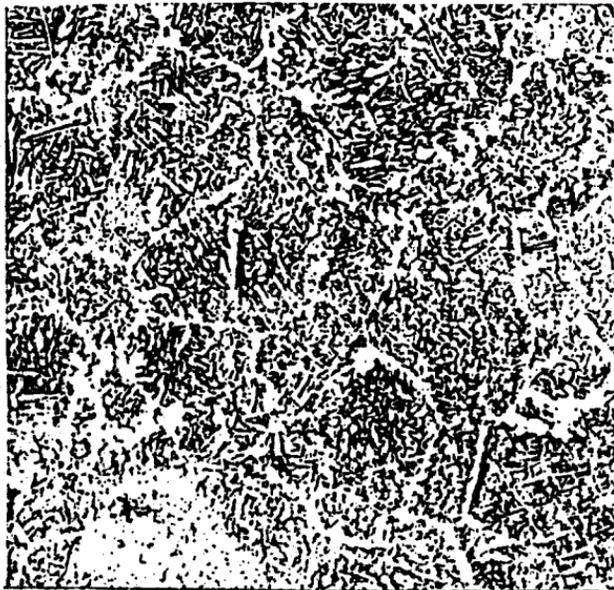
- BRONCES AL MANGANESO Y AL ALUMINIO DE ALTA-RESISTENCIA.

Los bronce al manganeso usados en forja y fundiciones, responden bien a SQC. Las propiedades mecánicas para la aleación fundida CDA 865 y la aleación forjada CDA 674, se muestran en la Tabla XI. Se pueden obtener secciones en buen estado y una estructura de grano uniforme, fina.

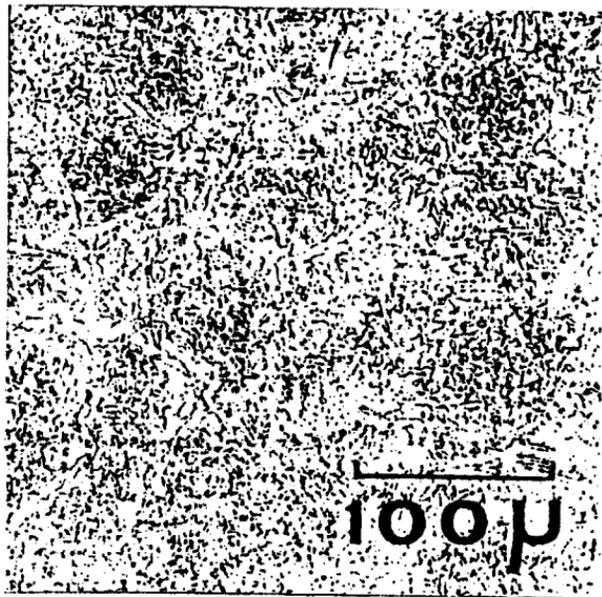
Los bronce al aluminio son notables por su alto nivel de resistencia obtenida por la transformación eutectoide lograda por el tratamiento térmico. La aleación CDA 624 resistente a la corrosión utilizada en forja, se la usa apropiadamente en SQC. Existe una uniformidad en la microestructura tanto en la condición SQC bruta, como en la condición de tratamiento térmico, Fig 1.14.

- BRONCE RESISTENTE AL ROZAMIENTO Y DESGASTE.

Las aleaciones al Cu que contienen cantidades variables de Sn y Pb, poseen propiedades



(A) Condición bruta



(B) Tratada térmicamente

FIG 1.14 *Microestructura del bronce de aluminio, CDA 624 (250X)*

Composición, Pct					Esfuerzo de Tensión		Esfuerzo de Fluencia		Elongación
Al	Fe	Ni	Co	Cu	MPa	ksi	MPa	ksi	Pct
8,91	--	--	--	Balance	546	79,2	255	37,0	15,0
9,36	3,05	--	--	Balance	570	82,7	243	35,2	20,3
10,35	3,01	--	--	Balance	714	103,6	297	43,1	20,0
10,40	2,02	--	2,11	Balance	824	119,5	606	87,9	2,7
10,03	5,39	5,04	--	Balance	564	81,8	533	77,3	1,0

TABLA XII *Composición y Propiedades Tensiles de Bronces al Aluminio en SQC.*

balanceadas de resistencia y rozamiento. Estas aleaciones se utilizan en fundición en arena y centrifugación.

Se han obtenido resultados prometedores con aleaciones que contienen mayor cantidad de Pb, las cuales presentan buenas propiedades de lubricidad, pero disminución de esfuerzos. El rápido grado de solidificación inherente al proceso SQC, lleva a una dispersión uniforme del Pb en una forma más deseada, el cual está sujeto a un asentamiento por gravedad cuando mayores tiempos de solidificación están involucrados. Tales resultados se han observado en el laboratorio en aleaciones que contienen 25% Pb y 5% Sn, **CDA 943**. Partículas grandes, globulares, ricas en plomo se presentan en una forma no uniforme en la fundición en molde permanente, el cual contrastan con una dispersión dendrítica más uniforme que se obtiene en SQC, Fig 1.15.

Las aplicaciones de aleaciones resistentes al desgaste se caracterizan por un incremento en la dureza así como también aumento en las propiedades de rozamiento. El bronce **CDA 925**, que contiene 11% Sn, es tradicionalmente usado en fundiciones en arena y se lo utiliza para hacer

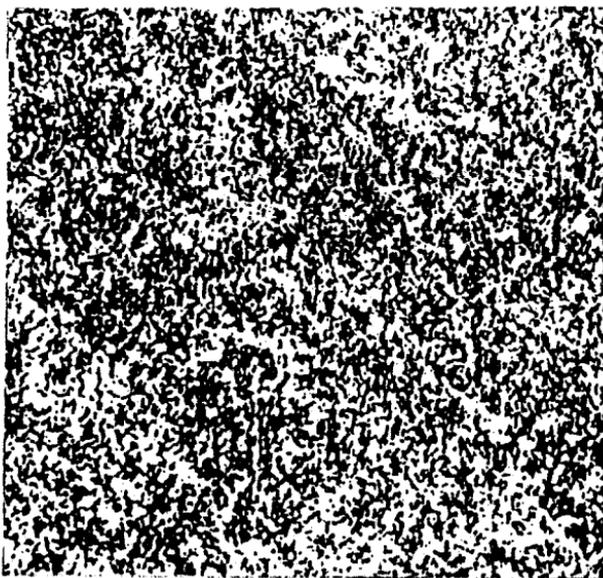


FIG 1.15 *Microestructura de la aleación SQC
CDA 943 (75 X)*

piezas de transmisiones y engranajes. Se hace énfasis en la versatilidad del proceso sobre las aleaciones de Cu debido a un amplio rango de enfriamiento adaptables al proceso, desde 11°C para latones amarillos y para bronces de alta resistencia, hasta 167°C para bronces al Sn.

Las propiedades tensiles de los bronces al Sn con plomo, CDA 925, en SQC, reflejan una buena microestructura, Tabla XIII, comparadas con materiales de fundición en arena.

La ilustración gráfica de la efectividad del proceso SQC del bronce al estaño CDA 925, se revela en un estudio metalográfico. Se comparan la microestructura de los materiales de fundición en arena, fundición en molde permanente, colado continuo y SQC, Fig 1.16. Es evidente el refinamiento estructural y la homogeneidad del material SQC, especialmente en la fase delta rica en estaño.

ALEACIONES FERROSAS.-

Un estudio metalúrgico básico fué llevado a cabo en la Unión Soviética por *Epanchintsev*, cubriendo aleaciones Cu-Pb, Fe-C, Al-Si. El demostró que,

Moldeo en arenaSQCPrueba de Tensión:

- UTS (ksi)	44,4	55,4
- 0,2% Esfuerzo de Fluencia, ksi	26,4	35,6
- Elongación (% in 1 in.)	16,5	19,2
- Dureza, R _E	84	98

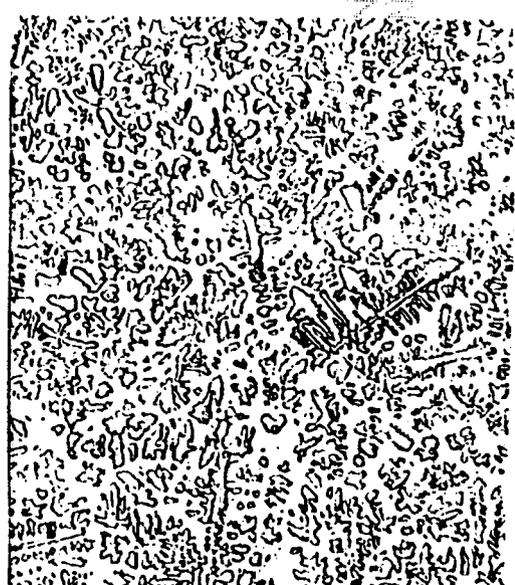
Prueba de Fricción:

- Coeficiente de Fricción estático inicial	0,158	0,192
- Coeficiente de Fricción estático final	0,124	0,149
- Coeficiente de Fricción cinético final	0,121	0,142

TABLA XIII *Propiedades comparativas de la aleación CDA 925.*



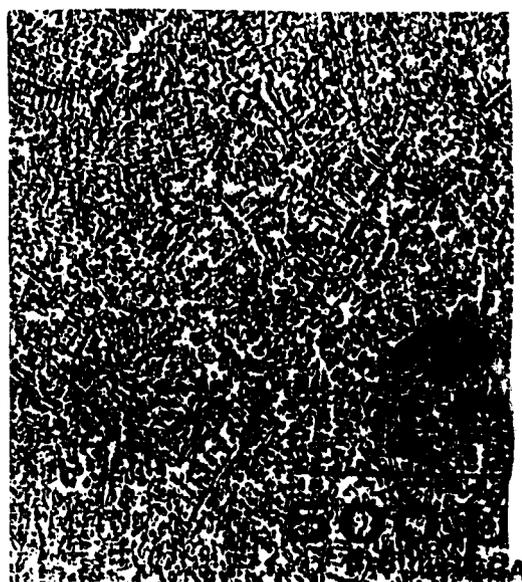
(A) Fundicion en Arena (SC)



(B) Fundicion en Molde Permanente (PM)



(C) Fundicion Continua



(D) Fundicion bajo Presion (SQC)

1.16 Comparación de la microestructura de la aleación CDA 943 (55X).

cuando el metal fundido se presuriza a la temperatura del elemento en estado líquido*, esto induce a un subenfriamiento de la fundición que se está solidificando y a un refinamiento de grano, estimada de acuerdo al nivel de presión aplicada. Epanchintsev reportó un incremento del doble en el esfuerzo de tensión, elongación, dureza y esfuerzo de impacto, sobre los valores obtenidos en fundiciones por gravedad, cuando se aplicaron presiones de 150 a 300 MPa (22 a 44 kpsi) a una aleación Cu-20%Pb durante la solidificación. En sus experimentos en hierro fundido gris (3,3%C; 2%Si; 0,3%Mn; 0,25%S; 0,15%P), *Epanchintsev* descubrió que SOC produce una estructura típica de hierro blanco. El refinamiento de grano y el enriquecimiento austenítico requiere presiones extremadamente altas de 3 GPa (440 kpsi). La resistencia al desgaste de los materiales de SOC, bajo condiciones de fricción seca, mostraron un incremento de valores diez veces mayor que el obtenido en fundición por gravedad del hierro gris.

Trabajos posteriores en la URSS, en fundiciones de

*Esto es cierto para la mayoría de aleaciones comerciales, aleaciones que se contraen durante el enfriamiento.

7-4

hierro(3,2%C; 2%Si; 0,5%Mn; 0,05%S; 0,15%P), mostraron un refinamiento de grano considerable de la fase de grafito cuando se aplicó presión durante la solidificación. Incrementando la presión aplicada de 0 a 3 GPa. El tamaño promedio de las partículas de grafito disminuyen en un 33%, mientras que el área ocupada por el grafito disminuyó del 10,7% al 0,4%.

En USA, se aplicó SDC a las aleaciones ferrosas por primera vez con éxito consistente en 1.976. Usando utillaje de dados de acero convencionales junto con incrustaciones refractarias en áreas críticas *Kulkarni et al.*, demostraron el uso de SDC para piezas de formas complicadas. Las propiedades de la aleación SDC, **AISI 8630**, se muestran en la Tabla XIV, junto con propiedades de los aceros inoxidables 321 y 347.

MATRICES METALICAS DE COMPOSICION MIXTA .-

El proceso SDC se ha caracterizado prominentemente por su capacidad de poder fabricar elementos libres de porosidades, los cuales son difíciles de obtener en otros métodos de fundición. La principal ventaja de esta aplicación radica en la posibilidad de obtener matrices metálicas de composición mixta, las

Aleación	Proceso	Esfuerzo de Tensión		Esfuerzo de Fluencia		Elongación Pct.
		MPa	ksi	MPa	ksi	
347 S.S (Recocido)	SQC	614	89,0	303	44,0	46
	SC	400	58,0	241	35,0	20
	EXTRUSION	621	90,0	241	35,0	50
321 S.S (H.T)	SQC	1063	154,2	889	129,0	15
	FORJA	1077	156,2	783	113,6	7
Fe-0.25%C,0.75% Mn,0.50%Si,0.50% Ni,0.55%Cr,0.55%Mo	SQC	952	138,0	903	131,0	14
	SC	1131	164,0	1038	150,5	10

TABLA XIV *Propiedades Comparativas de Aleaciones comerciales Ferrosas.*

cuales promueven una mejora en las propiedades mecánicas de los elementos.

En producciones de compuestos mixtos mediante SOC, se pueden utilizar dos métodos: En el primero, la aleación del compuesto es producido por la agitación del refuerzo en la aleación líquida. El material resultante puede entonces ser moldeado, con la aplicación de la presión utilizada en SOC. En éste método el refuerzo está distribuido a través de toda la fundición. Si se necesita la incorporación de cantidades preferenciales de refuerzo, por ejemplo, para producir las propiedades requeridas en un área específica de la fundición, entonces se aplica el segundo método, el cual consiste en introducir una preforma en el dado; con la aplicación de la presión durante el moldeo, se asegura la infiltración de la préforma en el metal.

Un amplio rango de compuestos de matrices metálicas mixtas, se pueden fabricar satisfactoriamente mediante SOC. Sus propiedades mecánicas, especialmente a elevadas temperaturas, son usualmente mejores que aquellas matrices de aleaciones monolíticas.

La habilidad de incorporar refuerzos de fibra, hace este proceso muy atractivo

Nombre Genérico

Composición, vol%

Safill	$95\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$
Kaowool 17C	$81\text{Al}_2\text{O}_3-19\text{SiO}_2$
Kaowool 3000	$65\text{Al}_2\text{O}_3-35\text{SiO}_2$
Kaowool 2600	$50\text{Al}_2\text{O}_3-50\text{SiO}_2$
Fibras de Kaowool	
Fibermax	$72\text{Al}_2\text{O}_3-27\text{SiO}_2$
Fiberfrax	$50\text{Al}_2\text{O}_3-50\text{SiO}_2$
FP/Fibras	99% Al_2O_3

TABLA XV *Fibras de cerámica disponibles para compuestos de Al MMC para SOC.*

Material	Tem. Amb.		Esfuerzo de		0,2 P S		E1 (%)
	Esfuerzo Intercortante		Fluencia		ksi (MPa)		
	ksi	(MPa)	ksi	(MPa)	ksi	(MPa)	
Sin refuerzo	10,9	(75)	15	(103)	9	(62)	8
Refuerzo con fibra de Cerámica	25,5	(176)	21	(145)	18	(124)	1

TABLA XVI *Esfuerzo de la matriz de la Aleación de Aluminio F-332 reforzada con fibra de cerámica.*

Vol. de Fibra	Esfuerzos, ksi (MPa)					
	662°F (350°C)		572°F (300°C)		482°F (250°C)	
	Y.S	UTS	Y.S	UTS	Y.S	UTS
0%	10 (70)	17(115)	-	10 (70)	5 (35)	8(55)
12% Fibra Cerámica	-	-	-	-	10 (68)	11(74)
12% Sic Whisker	29(197)	33(226)	22(153)	26(180)	14 (94)	18(124)
20% Fibra Cerámica	27(186)	29(198)	22(154)	22(155)	16(110)	16(112)
20% Sic Whisker	39(268)	41(284)	30(207)	34(235)	24(163)	26(181)

TABLA XVII *Esfuerzo de Fluencia y UTS para refuerzos de fibra de cerámica y Sic Whisker.*

elevada presión hidrostática durante la formación, la cual provee líquido al frente solidificado de la misma parte, compensado por la disminución de volumen debido al enfriamiento. Este cambio de volumen es acomodado por la ligera reducción controlada de la altura de la parte a medida que el material que se está transformando fluye debido a la influencia constante de la presión aplicada.

En la escala microscópica, SDC está caracterizado por una microestructura refinada, teniendo granos finos, espacios de brazo dendrítico cerrados y partículas constituyentes pequeñas. El tamaño de grano fino es el resultado de un alto nivel de nucleación y subsecuente razón de crecimiento. La nucleación ocurre inicialmente en la región subenfriada alrededor de las paredes del dado, y es realizada en la medida en el cual se mueve el metal. El choque hidráulico producido en el instante en el que el dado se cierra es un factor que contribuye a la nucleación.

La gran remoción de calor, favorece solamente a aquellos procesos de fundiciones a troquel en aleaciones comerciales, ésta ocurre debido a que el metal solidificado es forzado por la presión contra

el material que está más frío en las paredes del dado, minimizando la formación de agujeros de aire. Como resultado de esta gran extracción de calor se obtiene espacios cerrados de brazo dendrítico, tamaño pequeño de las partículas constituyentes, y tamaño pequeño de grano. Un estudio comparativo separado de los de los espacios de brazo dendrítico han mostrado que el coeficiente de transferencia de calor, h , durante la solidificación bajo presión en SQC puede ser tan alto como $0,2-0,3 \text{ cal/cm}^2 \text{ seg } ^\circ\text{C}$, en contraste con los valores de moldeo permanente que son de $0,02-0,06 \text{ cal/cm}^2 \text{ seg } ^\circ\text{C}$.

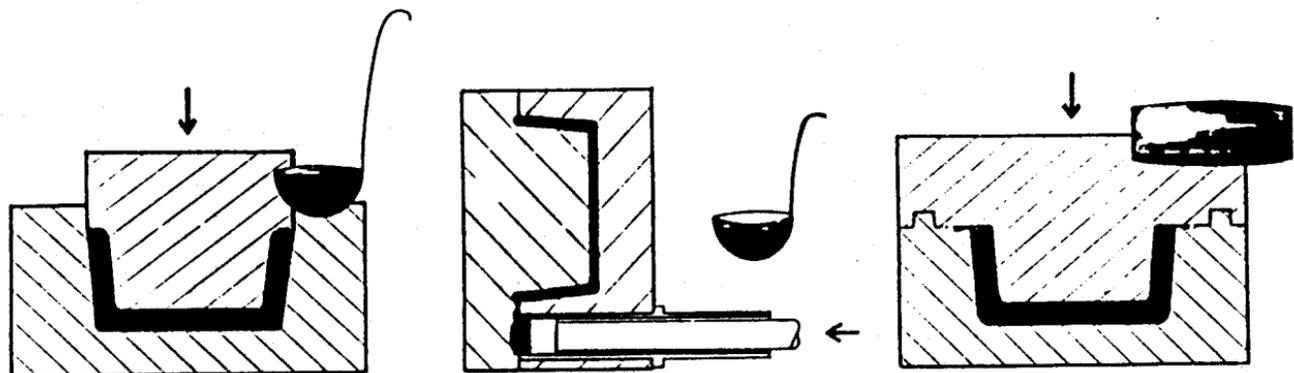
Los resultados netos del proceso de solidificación, el cual ocurre en SQC, es la formación de una microestructura refinada, libre de porosidades, homogénea. Las propiedades tensiles son maximizadas para las aleaciones fundidas en la condición de SQC, mientras que las propiedades comparables a aquellas en la condición forjada son obtenidas con las aleaciones forjadas. La liberación de las porosidades permite tratamiento térmico y promueve tenacidad y ductilidad.



MOLDEO DE METALES.-

Piezas de diferentes formas son producidas por diferentes técnicas de moldeo de metales; SC, DC, y forja. Cada método tiene diferentes capacidades y costos, los cuales determinan áreas específicas de aplicación. SQC provee también otro rango de posibilidades en la producción de piezas.

El proceso SQC es un complemento útil del proceso de fundición a troquel, capaz de producir partes en buen estado con grandes secciones de espesor, que son normalmente fundidas a troquel. Formas más complejas, partes con tolerancias más altas (arriba de 0,125" de espesor) seguirán favoreciendo el proceso de fundición a troquel. Aunque SQC, ofrece ventajas con componentes de alta integridad fundidos en dados de revenido directo, con tiempo de ciclo que se aproxima a la fundición a troquel. La naturaleza de la aplicación de la presión en forma directa por medio de la prensa al componente que se solidifica, **Fig 1.17 A**, permite el uso de un dado más pequeño que el que se usa en fundición a troquel. La vida del dado, se espera que sea similar al de fundición a troquel. La alta presión



a) SQC

b) D.C.

c) Forja

Fig 1.17 Esquema de fabricación de piezas mediante procesos alternativos.

específica aplicada en SQC reemplaza la alta velocidad de inyección del metal que se deposita en el dado a través de un agujero restringido característico de fundición a troquel, **Fig 1.17 B**.

El proceso de fundición en arena provee un costo de fabricación más bajo, también permitiendo socavados complejos y canales que se funden dentro de la misma parte, pero con un acabado superficial tosco. Muchas piezas de tamaño pequeño pueden ser fundidas simultáneamente en el mismo molde, incrementando el número de fabricación. En oposición, SQC provee componentes con densidad-total, sin rechupes ni microporosidades y teniendo un acabado superficial liso y con tolerancias más estrechas que las que se obtienen en fundición en arena. La presión aplicada durante y después de la solidificación fuerza el metal hacia las paredes del dado previniendo la formación de rechupes lejos de las paredes del mismo como lo que ocurre en métodos de fundición por gravedad. Aunque todas las ventajas que se obtienen en SQC no sean necesarias en una pieza, el proceso prueba ser uno de las técnicas de manufactura con costos efectivos, debido a su alta tasa de producción y al alto grado de utilización del metal. Los ahorros son como resultado de la reducción de

costos en la energía que se usa para el colado, de las pérdidas de metal colado, de la eliminación de pasos para la remoción de la fundición, y costos reducidos de maquinado.

Diversas comparaciones muy interesantes pueden hacerse entre SQC y forja. La presión necesaria para consolidar el material que se encuentra originalmente en el estado de colado, es significativamente menor comparado con aquel que debe aplicarse para obtener una configuración similar en el rango de temperatura normal de trabajado en caliente, **Fig 1.17 C**. Siendo así, se requieren prensas de menor capacidad, y los dados por lo tanto tienden a ser más pequeños. La influencia relativa de la temperatura del metal más alta comparada con aquella que se usa en forja, tienden a afectar la vida del dado en forma adversaria, pero está balanceado con la menor cantidad de presión requerida para el moldeo. La configuración de las piezas tiende a ser menos limitada en SQC que en forja tradicional. Configuraciones en forma de tazas, han sido exitosamente moldeadas, teniendo una altura doce veces mayor que la sección de espesor mínima. Los radios suelen ser considerablemente más pequeños que en forja y generalmente se obtiene un buen acabado

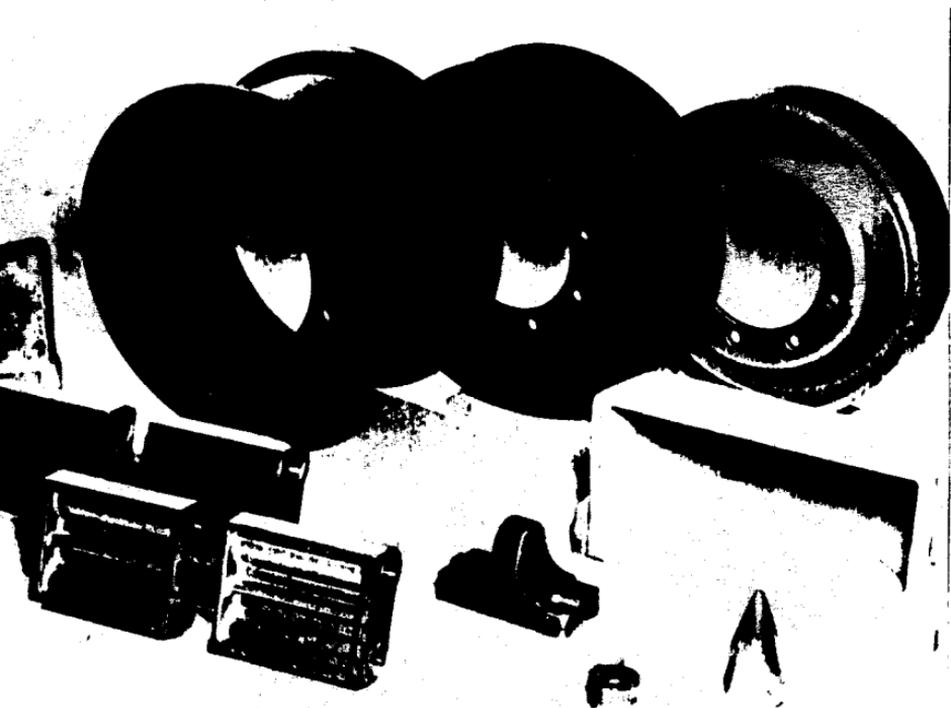
superficial. Componentes que usualmente son manufacturados en forja con agujeros, se pueden hacer perfectamente en SQC. Los agujeros a fabricarse son incorporados en el punzón, o en la cavidad del dado, para que el metal fluya alrededor, en vez de aplicar la fuerza considerable que se requiere en forja para perforar en caliente los agujeros requeridos. El uso del metal fundido y el alto grado de utilización del metal característicos en SQC, se combinan para dar ventajas económicas comparadas con forja, ya que en SQC se emplea todo el material y los fragmentos de rebaba pueden ser reprocesados.

En conclusión podemos decir que cuando se desea obtener detalles en la configuración de la pieza, tolerancias estrechas y un buen acabado superficial se puede utilizar el proceso SQC. La solidificación que ocurre a altas presiones contra el metal rígido fuerza al metal a acomodarse en forma ajustada en las paredes del dado. De esta forma los componentes exhiben mejores detalles en la superficie y un buen acabado superficial comparada con aquellos comúnmente obtenidos en forja o fundición, pero no con el grado de complejidad o precisión obtenida en fundición por inyección.

APLICACIONES.-

Las aplicaciones del proceso de SQC son seguidas por un proceso de selección natural, en comparación con otros métodos alternativos de fabricación. La utilización del proceso SQC ocurrirá donde el proceso pueda ser satisfactoriamente aplicado a componentes los cuales requieren integridad y propiedades normalmente asociadas con forja, combinadas con la flexibilidad del diseño y costos más bajos que normalmente se obtienen en procesos de fundición.

Existen un sin número de aplicaciones en latones y bronces del proceso SQC. Se han manufacturado válvulas, cuerpos reguladores, tapones, accesorios hidráulicos y pistones para bombas; todos elementos que exigen estar sometidos a presión, tener buenas propiedades mecánicas, buen acabado superficial y tolerancias dimensionales pequeñas. El cuerpo de una rueda dentada puede ser hecho en una variedad de materiales, incluyendo las aleaciones comunes de fundición y forja. La práctica de fundir engranajes grandes en forma compuesta, con un anillo de bronce sobre un cubo de hierro fundido, es también una aplicación práctica en SQC. Cojinetes y rodamientos,



1.18 Fotografía que muestra una selección de partes formadas mediante SQC.

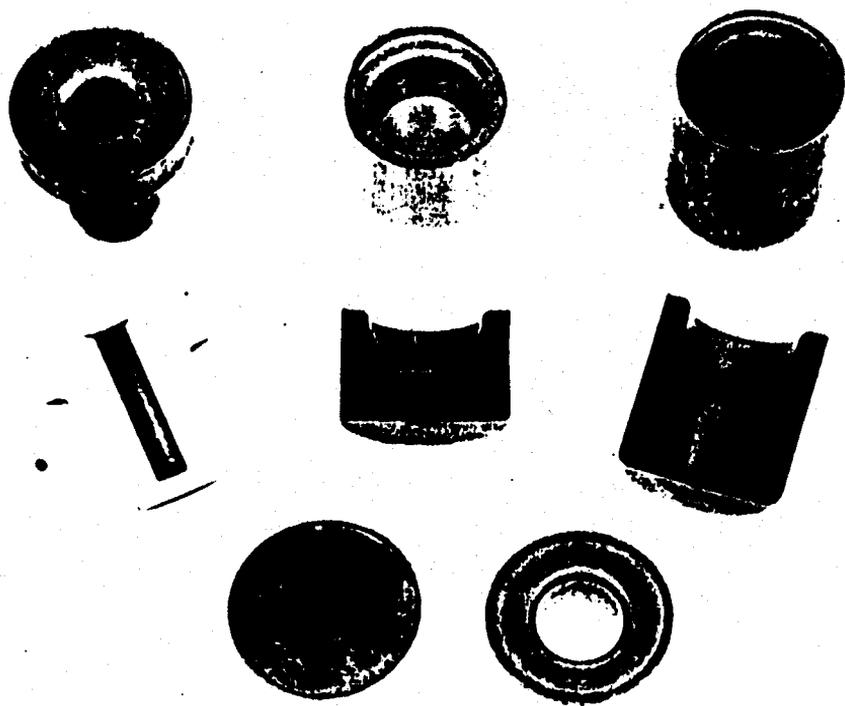


Fig 1.18 Piezas de bronce y laton hechas en SQC, enteras y seccionadas.

también son hechos bajo este proceso, particularmente aquellos tipos que actualmente se los hace bajo fundición por centrifugación. También se producen anillos de sincronización, ya que la variación de la sección transversal no es un problema en SQC. Las hojas de resortes, también se benefician por la refinada microestructura obtenidas con aleaciones resistentes al desgaste. Bridas o collarines, cubos, aparatos de medición, etc. En la actualidad el uso de SQC se va empleando de acuerdo a la capacidad del proceso que se ajuste con las necesidad de la pieza manufacturada.

En aluminio se pueden hacer muchas configuraciones. Se pueden producir piezas de diferente peso, entre 1 y 30 lbs. Por ejemplo en la Fig 1.20, se observa la manufactura de una pieza pequeña de 0,1 Lb. con un diámetro de 0,25 pulgadas y otra pieza de 96 Lbs., con un diámetro de 23 pulgadas con un agujero central de 6 pulgadas. Estas piezas muestran el rango del tamaño de las piezas que pueden fabricarse en este proceso.

En el año de 1979, IITRI completó un programa de SQC, para establecer los parámetros del proceso y el utillaje requerido para hacer en SQC un domo de

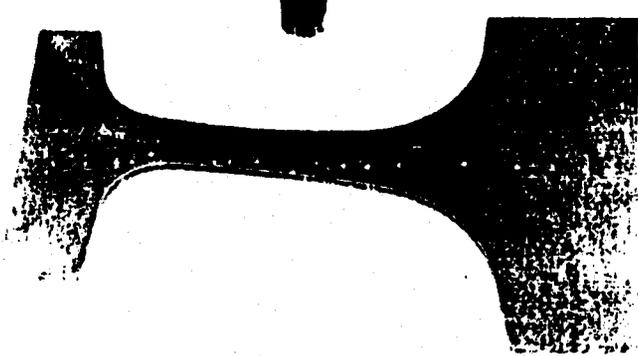
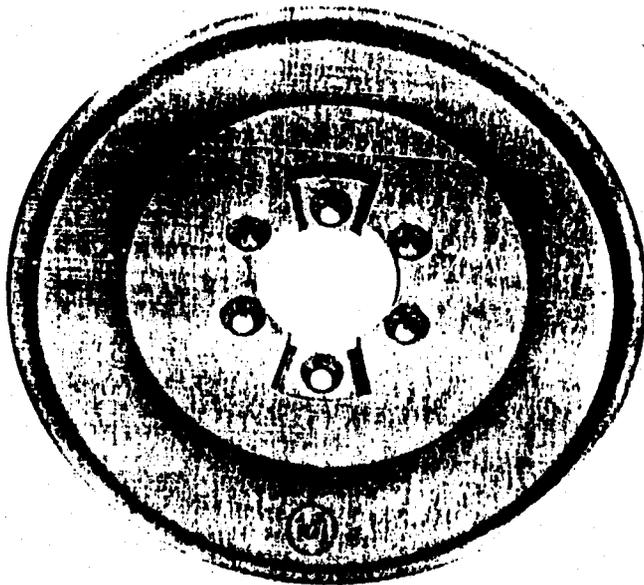


Fig 1.20 Piezas hechas en SQC: Una pequena de un-decimo de lb. con agujero (superior), y seccion transversal de una pieza de 96 lbs.



a) SQC bruta



b) Seccionada

Fig 1.21 Produccion de una bobina textil hecha en SQC.

27 kg. y una caja de 68 kg. para el misil PATRIOT usando acero de alta resistencia D6AC. Este trabajo, el cual fué reportado por Rajagopal, describió el procedimiento necesario para producir estas grandes fundiciones, así como la selección de la temperatura óptima de fundición, temperatura del utillaje, tiempo de dilación antes de la aplicación de la presión, la duración y cantidad necesaria de la misma para asegurar una microestructura libre de porosidades. Hasta la fecha, éste es el trabajo hecho en SQC más grande reportado en la literatura abierta.

El ejemplo más importante de SQC es el aro de aluminio recientemente comercializado por la Toyota Motor Company, el cual es indudablemente la parte más compleja hecha hasta ahora bajo este proceso, con diseño de herramientas. Este ejemplo realiza la única capacidad de la tecnología moderna de SQC, de producir piezas grandes y no uniformes, con detalles reentrantes, con un buen acabado superficial, con tolerancias dimensionales aceptables y propiedades mecánicas. Kaneko et al evaluaron el proceso SQC como el proceso de manufactura ideal para una variedad de aplicaciones automotrices basadas en la economía, confiabilidad, flexibilidad



BIBLIOTECA



Fig 1.22 Piezas hechas bajo SQC producidas por IITRI.

de diseño, y complejidad de las piezas. Fig 1.26

El aro de aleación de aluminio mostrado en la Fig 1.23, muestra la macrofotografía de la parte interior la cual se halla en buen estado. Los autores observaron que al realizar SQC, la eliminación del óxido del metal colado es importante para obtener las máximas propiedades mecánicas. Mejoras significativas se registraron en la elongación, esfuerzo de impacto, esfuerzo a la fatiga, sobre las piezas obtenidas en fundición por gravedad; además la fina microestructura resultado del contacto íntimo del metal y el dado debido a la presión, obvian el uso de refinadores de grano en el metal colado. Aunque se observó que los dados deben poseer una ventilación adecuada para lograr el llenado completo en el interior de las esquinas del aro. Para la fabricación de estas piezas se utilizó una prensa hidráulica de 1.500 toneladas, que generaba una presión 100 MPa en el aro que se solidificaba. El dado se mantuvo entre 200 y 250°C, la temperatura de colado a 750°C, y se obtuvo una tasa de producción de 25 partes/hr.

Esfuerzos similares hacia la producción comercial de piezas se ha llevado a cabo en los Estados Unidos.

El trabajo más notable es el realizado por *Gould, Inc.* en pistones de aleación de aluminio de alto rendimiento para motores a diesel. SQC, no sólo elimina la porosidad y refina la microestructura de los pistones, sino que también permite hacer uso de aleaciones que son difíciles de fundir las cuales ofrecen esfuerzos de fatiga más altos y resistencia al desgaste. Aún para una aleación convencional, la ganancia en el esfuerzo de fatiga puede ser significativo, tal como se observa en la gráfica de aluminio E332-T5 para las curvas de fatiga (Fig 1.27).

Como se puede ver por estos breves experimentos, SQC pronto dejará de tener una actividad de laboratorio, para incorporarse en la industria automotriz, con aplicaciones aeroespaciales y municiones en un futuro no muy lejano.



a) Pieza completa

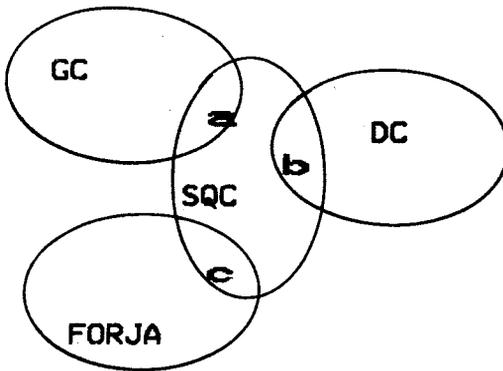


b) Macroestructura que ilustra la pieza en buen estado.

Fig 1.23 Aro automotriz hecho bajo SQC fabricado por la Toyota.

	GC	DC	Forja	SQC
Economía	C	A	D	B
Confiabilidad	C	D	A	B
Flexibilidad de Diseño	A	C	D	B
Complejidad	C	A	D	B

A ← superior inferior → D



Piezas factibles de manufacturar en SQC

a	pistón, cilindro, caja de cambio, aros.
b	tambor de freno, bloque de motor.
c	pasadores, brazo de suspensión, pistón.

Fig 1.26 Aplicaciones potenciales de SQC para la industria automotriz.

Matrix	Fibra	Aplicaciones Potenciales
Aluminio Magnesio Plomo Cobre	Grafito	Satélite, misiles, estructuras de Helicópteros Estructuras espaciales y satélite. Placas de almacenaje para baterías. Contactos eléctricos y rodamientos.
Aluminio Magnesio Titanio	Boro	Aspas de compresores y soportes estructurales. Estructura de antenas. Aspas de ventilador de motores jet.
Aluminio Titanio	Borsic	Aspas de ventilador de motores jet. Estructuras de alta-temp. y aspas de ventilador.
Aluminio Plomo Magnesio	Alumina (FP)	Superconductores en reactores de potencia. Placas de almacenaje para baterías. Estructuras de transmisión para helicópteros.
Aluminio Titanio Superal. (Base Co)	Carburo de Silicio	Estructuras de alta-temperatura. Estructuras de alta-temperatura. Componentes de motores de alta-temperatura.
Superalación	Molibdeno	Componentes de motores de alta-temperatura.
Superalación	Tungsteno	Componentes de motores de alta temperatura.

TABLA XVIII *Materiales compuestos de matrices metálicas.*

CAPITULO I I

TRABAJO EXPERIMENTAL

DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL UTILIZADO.-

Para la realización del trabajo experimental se hizo uso del siguiente equipo:

- Prensa Hidráulica. (Fig 2.1).

La prensa hidráulica utilizada es de acción simple. Posee un acumulador hidráulico y tiene una capacidad de 300 toneladas.

- Horno de Fundición. (Fig 2.2).

El horno utilizado es un horno de crisol. Este sirve para fundir la aleación de aluminio. En este tipo de horno las impurezas suben a la superficie.

- Pirómetro de Radiación. (Fig 2.3).

Este pirómetro sirve para controlar la temperatura de la fundición. Posee un rango de 400 a 1600°C.

- Termopar. (Fig 2.4).

El termopar utilizado es de tipo E, Constantan-

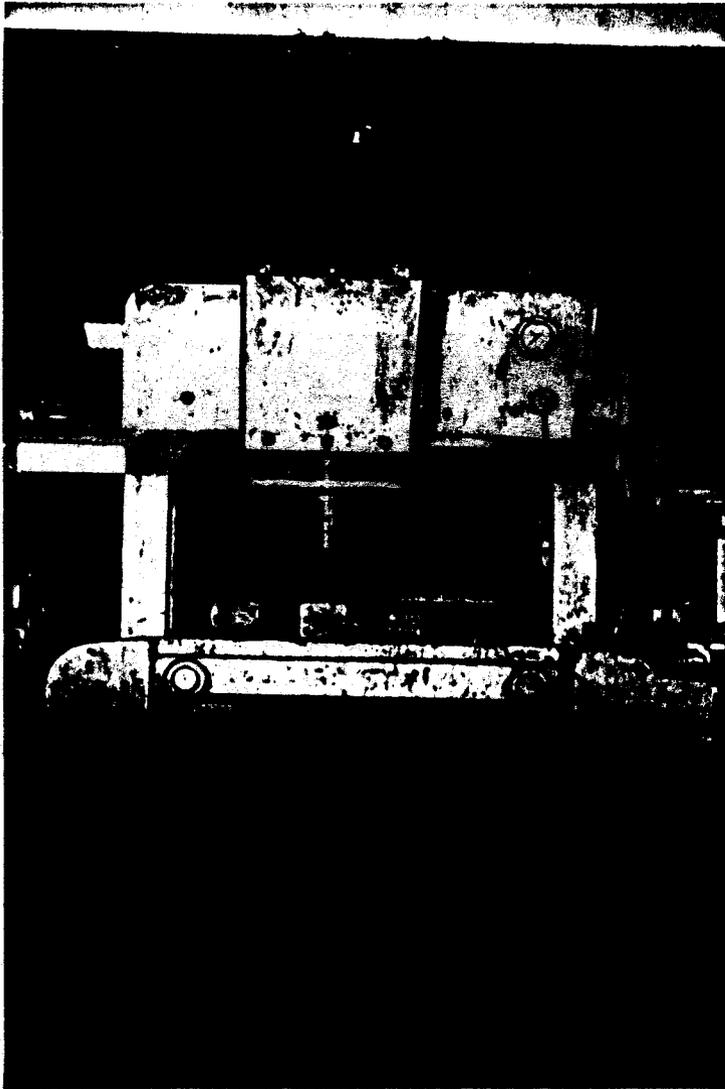


FIG 2.1 *Prensa Hidráulica.*

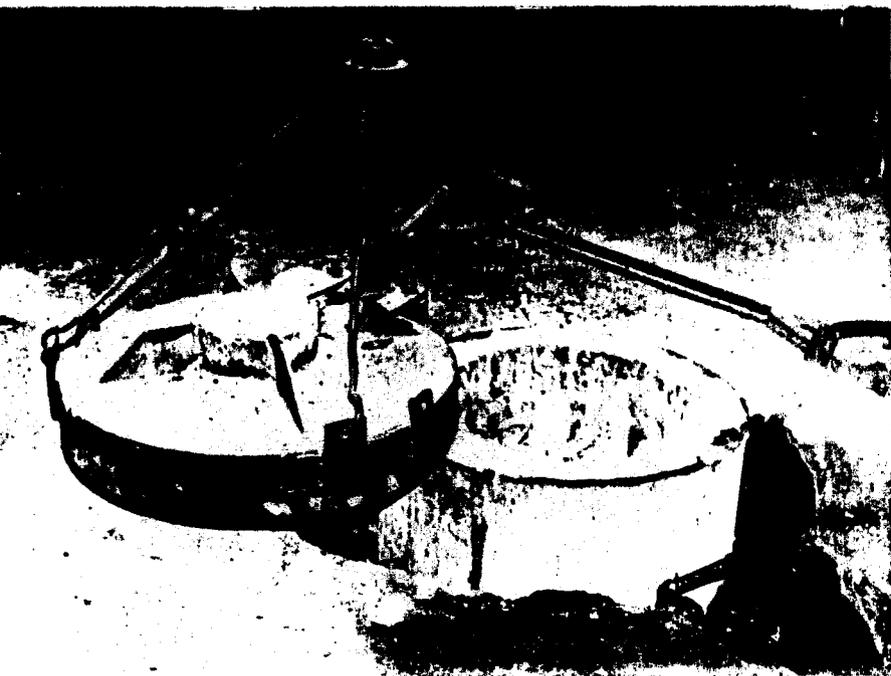


FIG 2.2 *Horno de Crisol.*

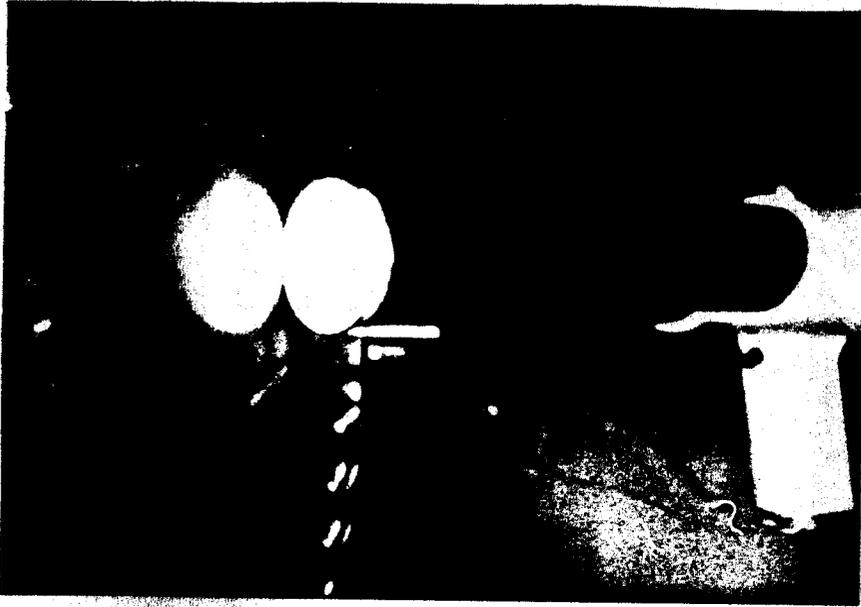


FIG 2.3 *Pirómetro de Radiación.*

Chromel. Este termopar fué utilizado para controlar la temperatura de calentamiento de la superficie del dado.

Soplete. (Fig 2.5).

El soplete fué utilizado para calentar el dado y mantenerlo en una temperatura de 200 a 300°C.

Diseño y construcción del Dado.

El diseño del dado debe tener las siguientes características. El dado debe ser de acero H13, poseer en las esquinas un radio de por lo menos 2 mm., para materiales no-ferrosos y de 3 mm., para materiales ferrosos.

Para facilitar la salida de la fundición, se escogen ángulos de 1/2 grados en las paredes exteriores del dado, y de 1 a 2 grados en la superficie del punzón. El escoger el ángulo adecuado para las paredes del dado y el punzón, puede en muchos casos, favorecer la solidificación y por lo tanto eliminar la porosidad con un mínimo de fuerza aplicada.

También, es necesario proveer una ventilación adecuada para los propósitos de llenado. Los

agujeros deben ser de ambas formas, una de forma natural y la otra de agujeros en las cavidades más inferiores del dado. Los agujeros de ventilación y la holgura natural deben ser menores a los 0,2 mm. para evitar la extrusión del colado y un excesivo empalme.

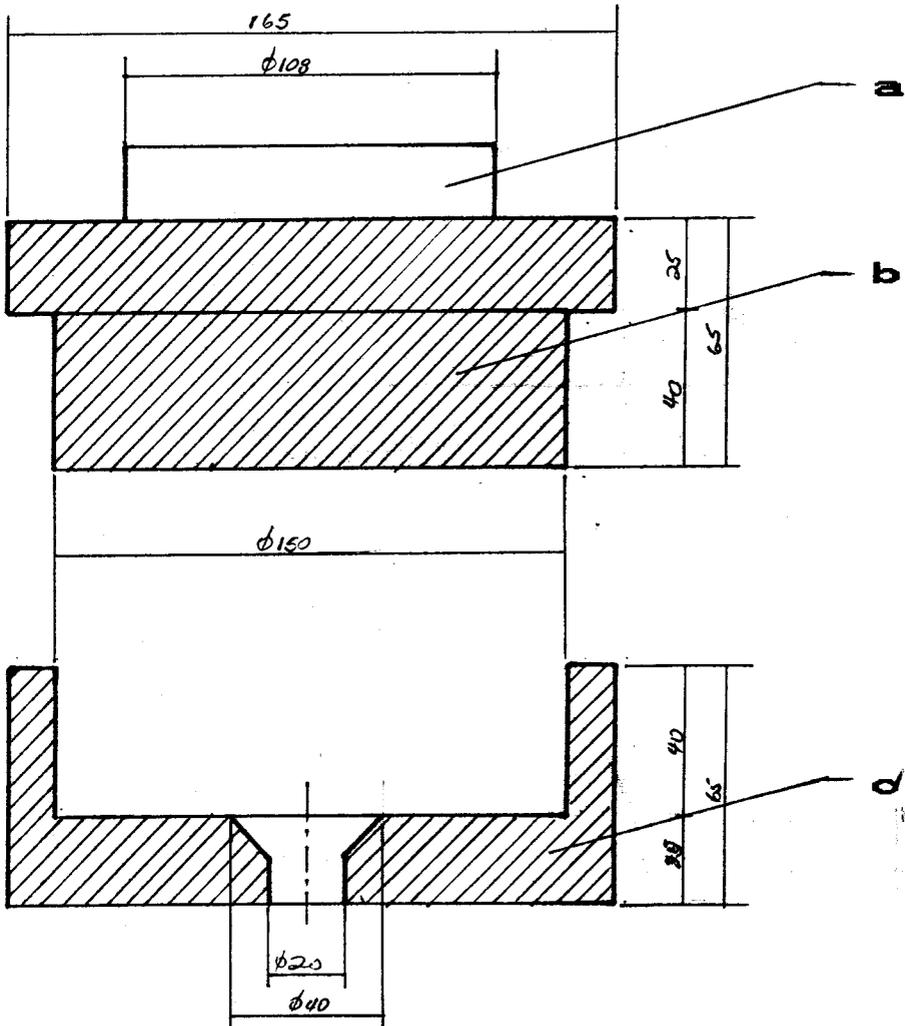
OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACION.-

El propósito de la siguiente experiencia es el de presentar un nuevo método de fundición. Además de cumplir con los siguientes objetivos:

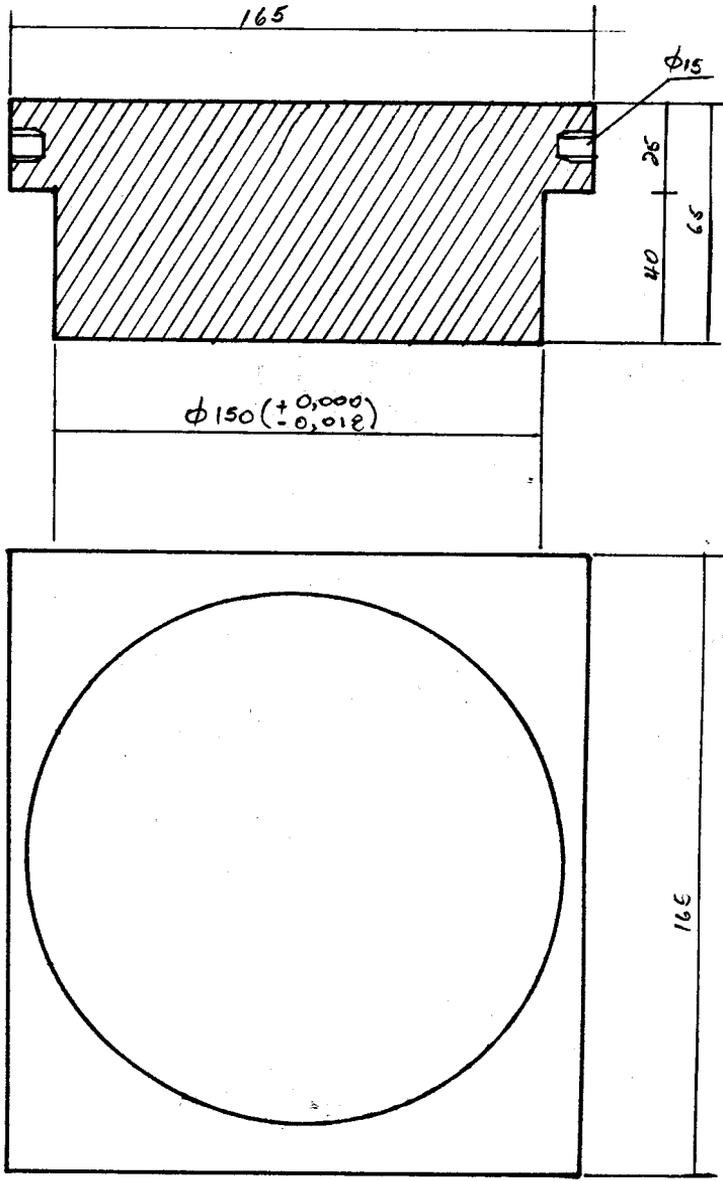
- Observar que la pieza obtenida no contenga porosidad debida a los gases, ni por contracción.
- Que la pieza obtenida tenga un buen acabado superficial.
- La microestructura de la pieza obtenida sea comparable al de un elemento obtenida en SDC.
- Las propiedades mecánicas obtenidas sean mejores que las obtenidas en otros procesos de fundición.
- Comprobar el ahorro del material utilizado en la fundición.

METODOLOGIA DE LA EXPERIMENTACION.-

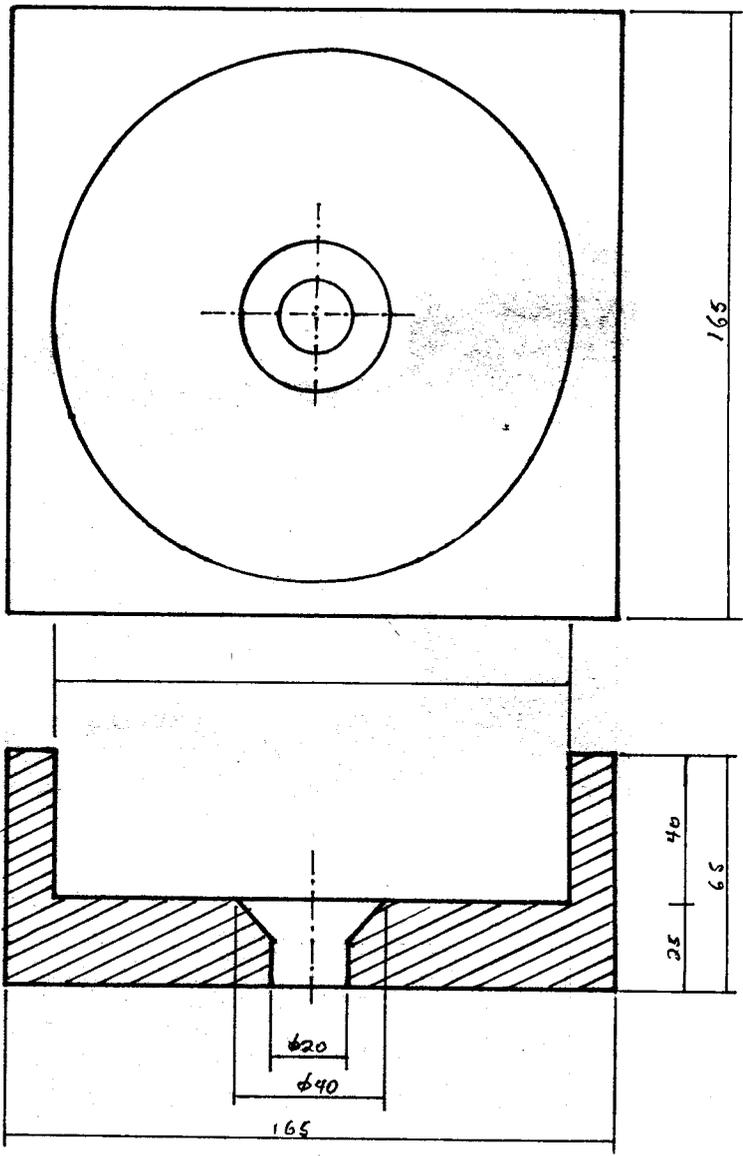
La secuencia del proceso SDC, consiste



No. de Dibujo	DENOMINACION
2-6a	PISTON DE LA PRENSA
2-6b	PUNZON
2-6c	DADO
Acero H13	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DADO Y PUNZON	Fig 2-6
TESIS: AURORA IDROVO SOTO	Escala 2:1



Acero H13	FACULTAD DE INGENIERIA MECANI
PUNZON	Fig. 2-7
	Escala 2:1
TESIS: AURORA IDROVO SOTO	



Acero H13	FACULTAD DE INGENIERIA MECAN
DADO	Fig. 2-7
TESIS: AURORA IDROVO SOTO	Escala 2:1

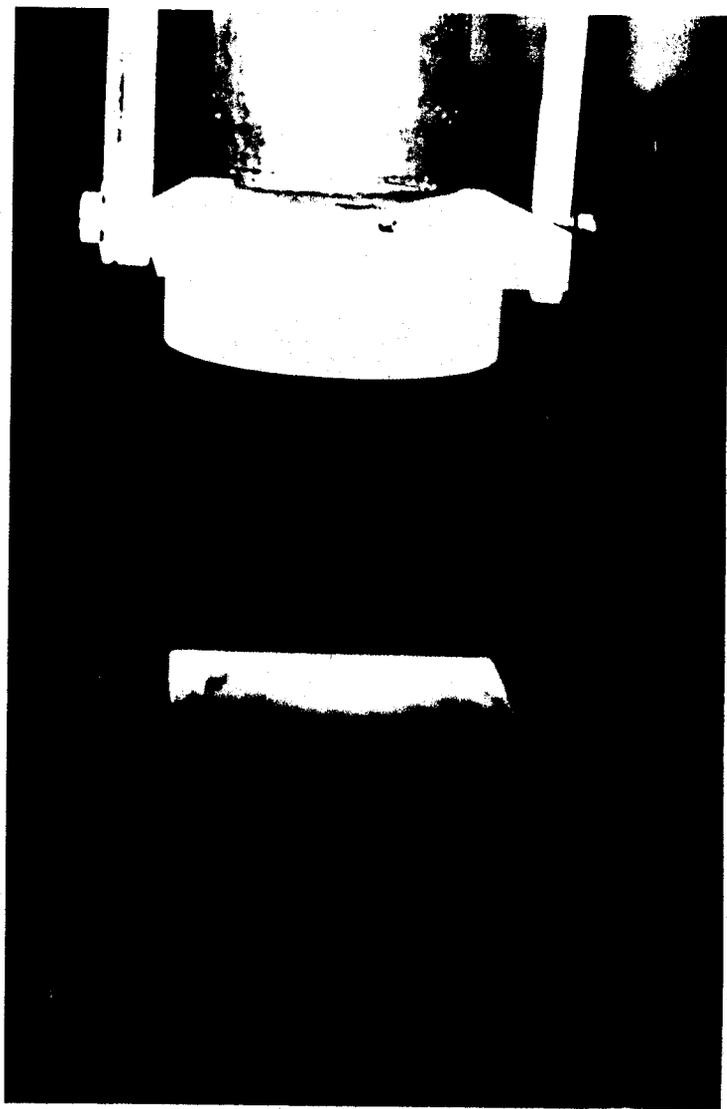


FIG 2.8 *Dado y punzón montados en la prensa.*

esencialmente en: a) Colar el material de trabajo, Fig 2.9, precalentar el utillaje, Fig 2.10; b) transferir el metal colado a la cavidad hueca del dado, en este caso directamente por medio de un cucharón, Fig 2.11; c) cerrar el dado y mantener la presión durante el moldeo hasta completar la solidificación, Fig 2.12; y d) sacar la fundición, limpiar el utillaje.

Los factores que influyen en la calidad de la fundición, listados en orden de importancia son: calidad y cantidad de colado, equipo y utillaje, temperatura de la fundición, temperatura del utillaje, tiempo de dilación antes de la presurización, espesor de la capa fílmica del lubricante, y finalmente, cantidad de presión aplicada y duración. Aunque la presión es el parámetro más importante, éste es listado al final, ya que en la práctica es usualmente eliminado como variable de control de calidad, cuando se aplica más carga de presión que la requerida.

CALIDAD Y CANTIDAD DE COLADO.-

La cantidad de colado en términos de contenido de óxido, es talvés mucho más crítico en SOC que en



FIG 2.9

Barras de la aleación Al-Si para colar.

BIBLIOTECA



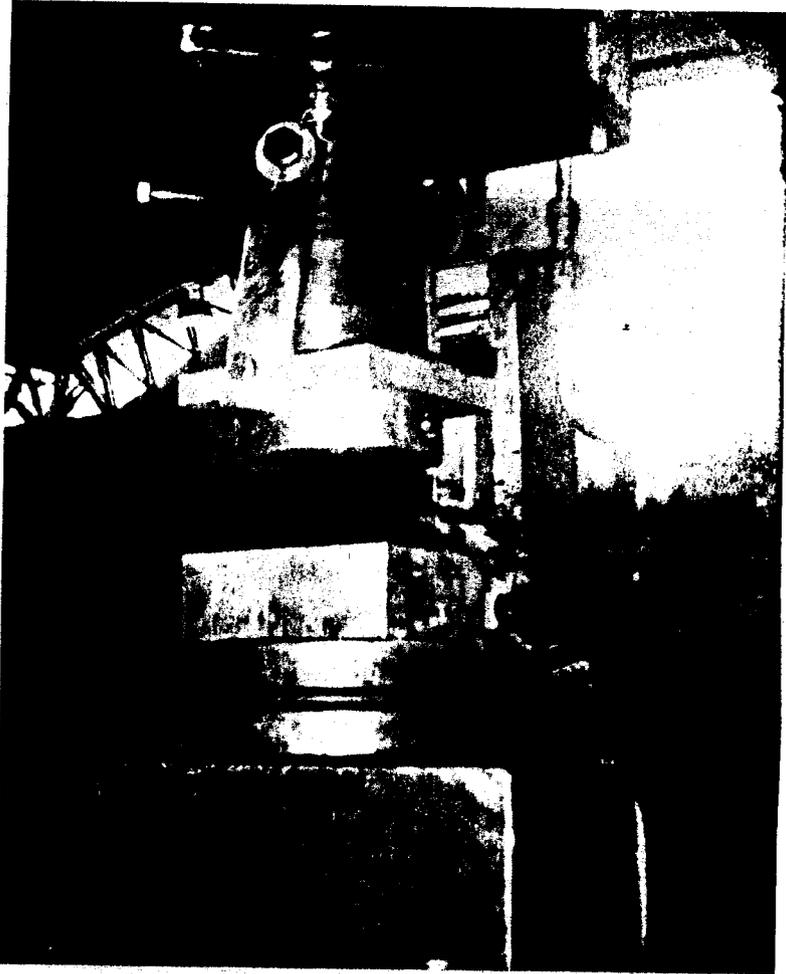


FIG 2.10 *Calentamiento del dado por medio de un solplete.*

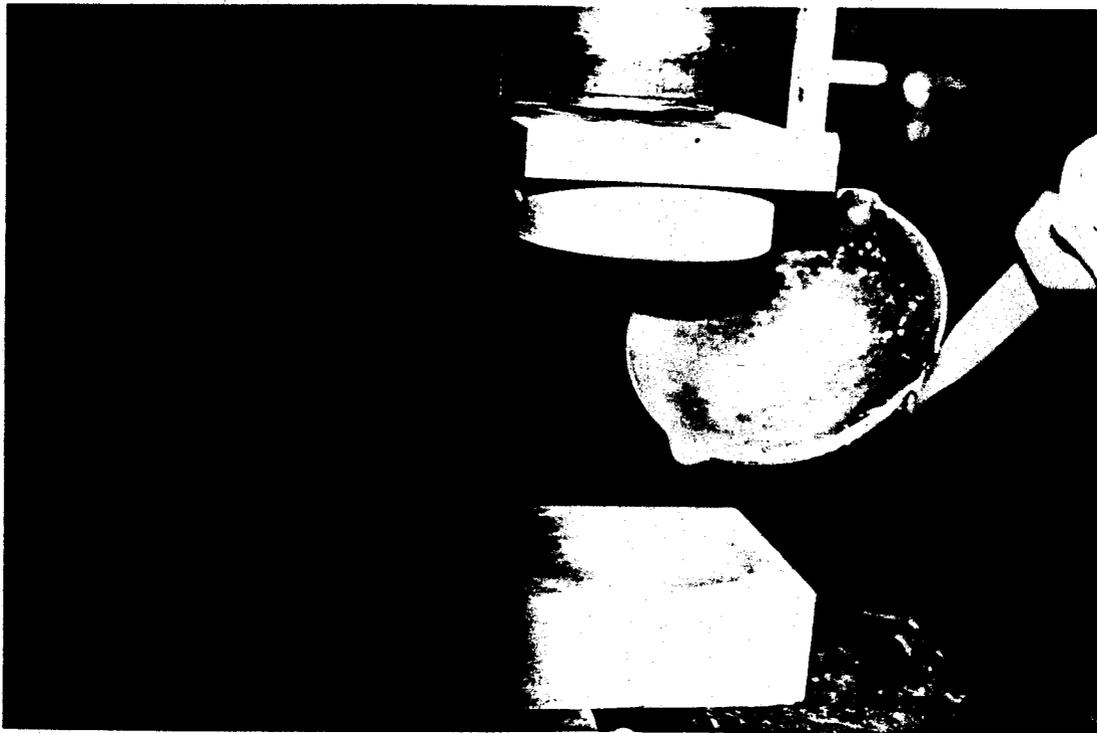


FIG 2.11 *Transferencia del metal colado dentro de la cavidad del dado.*

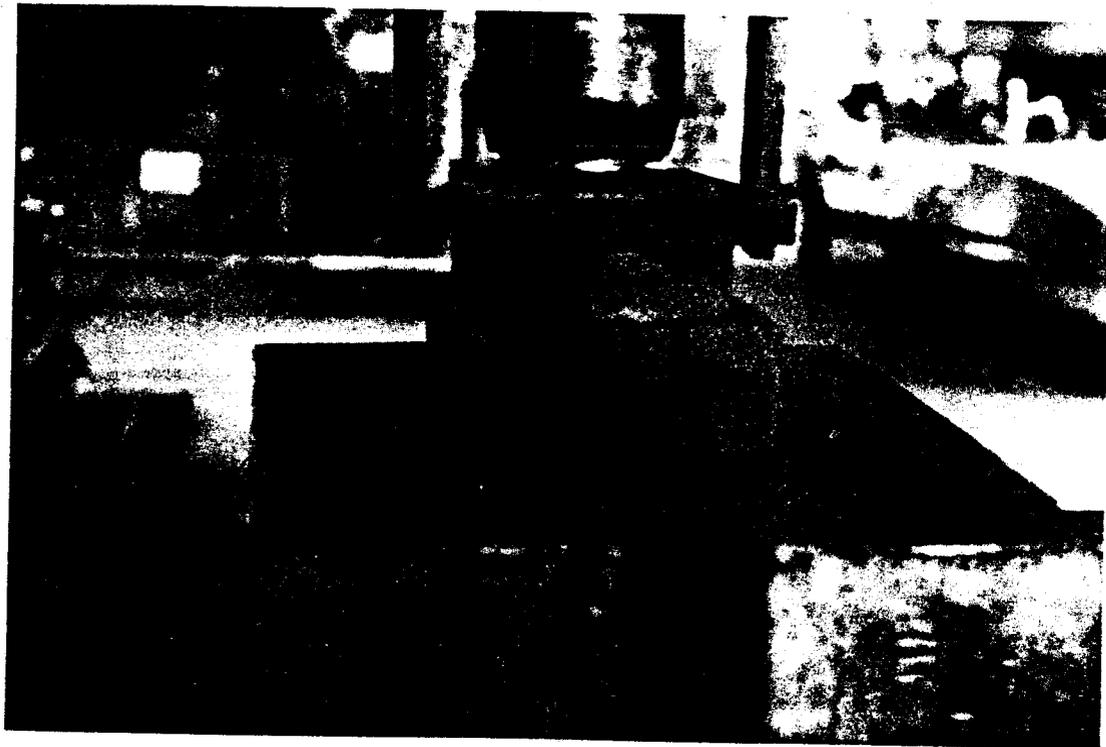


FIG 2.12 *Aplicación de la presión durante la solidificación.*

otros procesos de fundición. Esto se debe a que no existen canales, ni respiraderos para acomodar cualquier impureza que podría estar presente: TODO EL METAL COLADO DEPOSITADO EN EL MOLDE PERMANECE DURANTE EL PROCESO **SQC**. Por otra parte, la calidad del colado, en términos de la absorción de gases, es menos crítica en **SQC** porque la cantidad de presión aplicada se la selecciona de tal forma que sea lo suficientemente alta para suprimir el desprendimiento de los gases y retener los gases en solución.

Tanto para las aleaciones ferrosas como no ferrosas, la cantidad de óxido debe ser minimizada tanto como sea posible, debido a la combinación de circulación, nivelación y/o filtración. La absorción de los gases puede ser minimizado manteniendo en la práctica la temperatura del metal colado tan baja como sea posible, pero la prolongación de tratamientos desengasantes son innecesarios*, ya que la porosidad debido a los gases se la puede eliminar con una adecuada presurización.

La cantidad de colado es importante, siempre que se

*La liberación de gases se requiere usualmente solo cuando la presencia de secciones finas dictamina la presencia de temperaturas de colado más elevadas, acompañadas por una excesiva absorción de gases.

quiera tener formas exactas. No obstante el control de las dimensiones finales pueden ser obtenidas con dificultad, cuando se trata de piezas más complejas. En este caso se deposita la cantidad calculando la cantidad exacta de peso o volumen del metal.

TEMPERATURA DEL METAL FUNDIDO.-

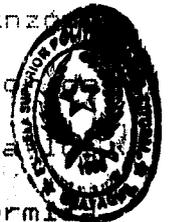
La temperatura a la cual el metal colado es depositado en la cavidad del dado, es extremadamente crítica, desde el punto de vista tanto de la calidad de la fundición como de la vida del dado. Si, la temperatura del metal colado es demasiado baja, se produce una inadecuada fluidez, y el resultado es un llenado incompleto del dado, así como también plieges fríos en la superficie de la pieza fundida. Por otra parte, cuando la temperatura del metal colado es demasiado alta, puede producirse la extrusión del metal líquido a través de las caras del utillaje, y puede también resultar en porosidades por contracción en las secciones más gruesas del SOC. La vida del dado también es adversariamente afectada con temperaturas de colado muy elevadas.

La temperatura ideal de colado depende tanto de la

temperatura de fusión de la aleación, como del rango de enfriamiento. En general se puede decir, que se requiere sobrecalentamiento por encima de la temperatura de fusión para aleaciones que muestran un estrecho rango de enfriamiento, ya que éstas aleaciones están más expuestas a la formación de costra en las superficies adyacentes al dado, acompañada de una calidad interna pobre y discontinuidades en la superficie. Para las **ALEACIONES DE ALUMINIO**, la temperatura de colado se la selecciona usualmente de 10 a 100°C, por encima de la temperatura de fusión de la aleación. Secciones más delgadas y perfiles no uniformes requieren temperaturas de colado más elevadas para permitir el llenado completo del dado.

TEMPERATURA DEL UTILLAJE.-

La temperatura de la cavidad del dado y del punzón deben mantenerse a una temperatura de alrededor de 200 a 300°C. Temperaturas más bajas (menores a 150°C), pueden ocasionar fallas por fatiga térmica en el dado y también pliegues fríos en la superficie de la fundición. Temperaturas del dado demasiado elevadas (sobre los 400°C), pueden ocasionar puntos calientes, y poros por contracción en la fundición.



BIBLIOTECA

Un problema adicional que ocurre cuando se tienen temperaturas más elevadas del dado, es que existe una gran tendencia a unirse como soldadura el dado y la fundición.

TIEMPO DE DILACION ANTES DE LA APLICACION DE LA PRESION.-

Se obtienen óptimos resultados cuando se aplica la presión cerca de la temperatura de fluidez cero* del metal colado. Aunque, no es recomendable depositar el metal colado en la cavidad del dado alrededor o a la temperatura de fusión de la aleación. Consecuentemente, el metal colado es depositado en la cavidad del dado en la condición de sobrecalentamiento, como se lo describe con anterioridad, y sólo se lo presuriza cuando el metal colado se encuentre por debajo de la temperatura de fusión. Por lo general se requiere un tiempo de dilación de 10 a 20 segundos antes de cerrar el dado y de aplicar la presión.



*La temperatura de fluidez cero es aquella temperatura bajo el cual el metal pierde sus propiedades de fluidez. Esta se encuentra usualmente en un punto intermedio entre el líquido y el sólido.

LUBRICACION. -

Una fina capa de grafito coloide, rociado en los dados calientes, en las partes donde va el metal funciona satisfactoriamente para la mayoría de aleaciones no ferrosas. Lubricantes comerciales de grafito para forja son también adecuados.

CANTIDAD DE PRESION APLICADA Y DURACION. -

Una presión mínima de 70 a 105 MPa (10 a 15 Ksi, 2 a 9 tonf/in²), se requieren para eliminar porosidades debidas a los gases y por contracción. Aunque la geometría de la pieza a moldearse dicta el uso de presiones más elevadas para el llenado completo de la cavidad y el control de las porosidades. Se debe mantener una cantidad de presión de 70 MPa(4,6 tonf/in²), en la última parte de la fundición que se solidifica, la cantidad nominal de presión requerida está determianda por la fuerza de la prensa dividida para el área plana de fundición, se puede tener el doble de ésta cantidad, dependiendo de la geometría del SQC.

Se ha encontrado que al elevar la presión a niveles más elevados del mínimo requerido, no produce ningún

beneficio adicional, aunque presiones extremadamente altas por encima del esfuerzo de fluencia, da como resultado un refinamiento de grano y propiedades mecánicas más altas.

La forma y el espesor de la sección del SQC, gobiernan la duración de la presión necesaria para asegurar la completa solidificación bajo presión. Más allá del mínimo necesario de duración, no produce ningún beneficio, y al contrario puede producirse la fractura de las paredes del dado y dificultad en la retracción del punzón, debido a la contracción térmica de la fundición en el punzón rígido. La máxima duración de la presión, como regla general, es de alrededor de 1 segundo por mm. de espesor de sección.

PRUEBAS Y RESULTADOS DE CONTROL DE PROPIEDADES.-

El procedimiento seguido para realizar las pruebas experimentales para la obtención de las tres piezas obtenidas fué el siguiente, Fig 2.14:

- Se seleccionó el tipo de aleación Al-Si y las cantidad de aluminio para ser fundido (3 lbs.).
- Se seleccionó la temperatura de fundición,

aproximadamente 650°C . El tiempo aproximado para lograr que el metal se funda, fué de aproximadamente 45 minutos.

- Se seleccionó la carga necesaria para eliminar la porosidad (20 toneladas), y una duración de aplicación de la presión de 30 segundos.
- Se seleccionó la temperatura a la cual se debía calentar el dado, basada en la calidad de la superficie de la fundición (230 a 300°C).

Debido a que se realizaron tres pruebas experimentales, a continuación se describirá en detalle cada uno de los pasos seguidos en el control de las propiedades de cada pieza obtenida. Fig 2.13, Fig 2.14.

Primera Pieza.— Al realizar el primer experimento se tomó en cuenta todos los parámetros descritos con anterioridad, pero el metal fundido tenía que ser depositado a una temperatura un poco mayor que los 650°C , para que al ser depositado, debido a que se pierde un poco de calor al vaciar el metal colado en el dado por medio del cucharón se tenga ésta temperatura en el momento de aplicarse la presión. Como se toma un tiempo hasta que el punzón entra en contacto con el metal colado, el material en la

superficie se enfrió demasiado, y se produjo pliegues en frío en la superficie que estuvo en contacto con el punzón.

Segunda Pieza. - En el segundo experimento se tomó en consideración la temperatura que debía tener el metal fundido en el momento de vaciarse, así que la temperatura del metal colado fué de 50°C por sobre la temperatura de fundición e inmediatamente se aplicó la presión. El tiempo de duración de aplicación de la presión fué de aproximadamente 35 segundos. Esto produjo que se pegue la pieza al punzón, ya que esto es lo que ocurre cuando se aplica la presión por un tiempo mayor al requerido. Pero no se produjo ningún tipo de defecto sobre la superficie, y por lo tanto la pieza tenía un buen acabado superficial.

Tercera Pieza. - Esta pieza se la produjo inmediatamente después del experimento anterior, y los parámetros seleccionados se cumplieron, por lo tanto en ésta pieza no se produjo ningún tipo de defecto.

Para realizar el control de las propiedades de las piezas obtenidas se realizó un estudio de las



FIG 2.13 *Pieza obtenida y dado.*

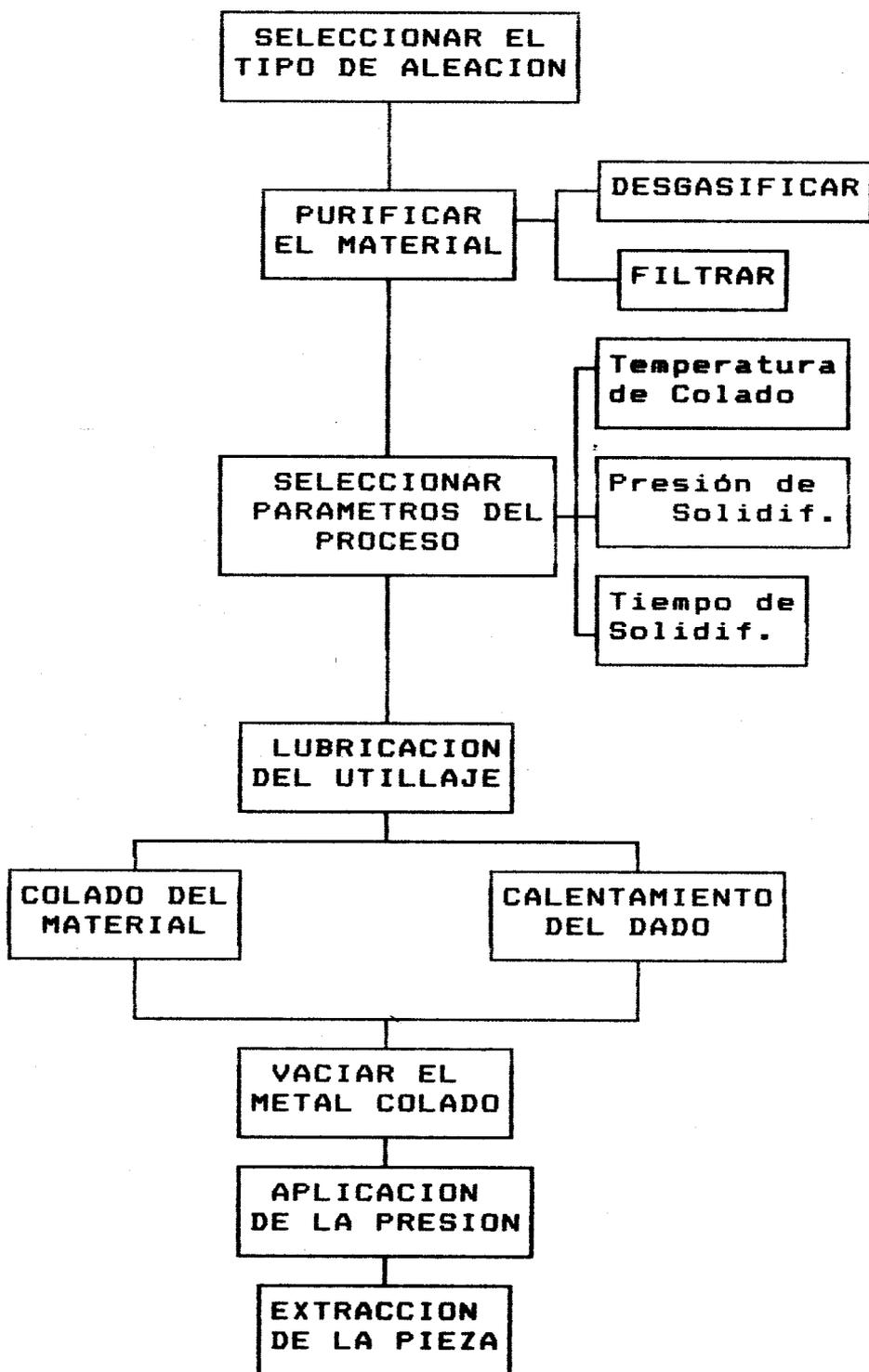


FIG 2.14 Diagrama de Flujo del Proceso SDC.

propiedades mecánicas, y a continuación se describe los ensayos correspondientes:

- PRUEBA DE TENSION.-

Se realizaron pruebas de tensión a las probetas cilíndricas obtenidas de cada pieza fabricada (3). Fig 2.15. Para este tipo de ensayo se utilizó la máquina universal de ensayos Versatester. La Tabla XIX, muestra los resultados obtenidos de las pruebas de tensión.

- PRUEBA DE DUREZA.-

Se realizó el ensayo de dureza de las piezas obtenidas. La dureza fué tomada en Rockwell H y los resultados se muestran en la Tabla XIX.

- ENSAYO METALOGRAFICO.-

Para este ensayo se utilizó el microscopio "Photoautomat wild", para determinar la forma de los granos obtenidos y el tipo de fractura correspondiente a cada pieza. Las macrofotografías de cada una de las piezas se muestran en las Figuras 2.16, 2.17 y 2.18.

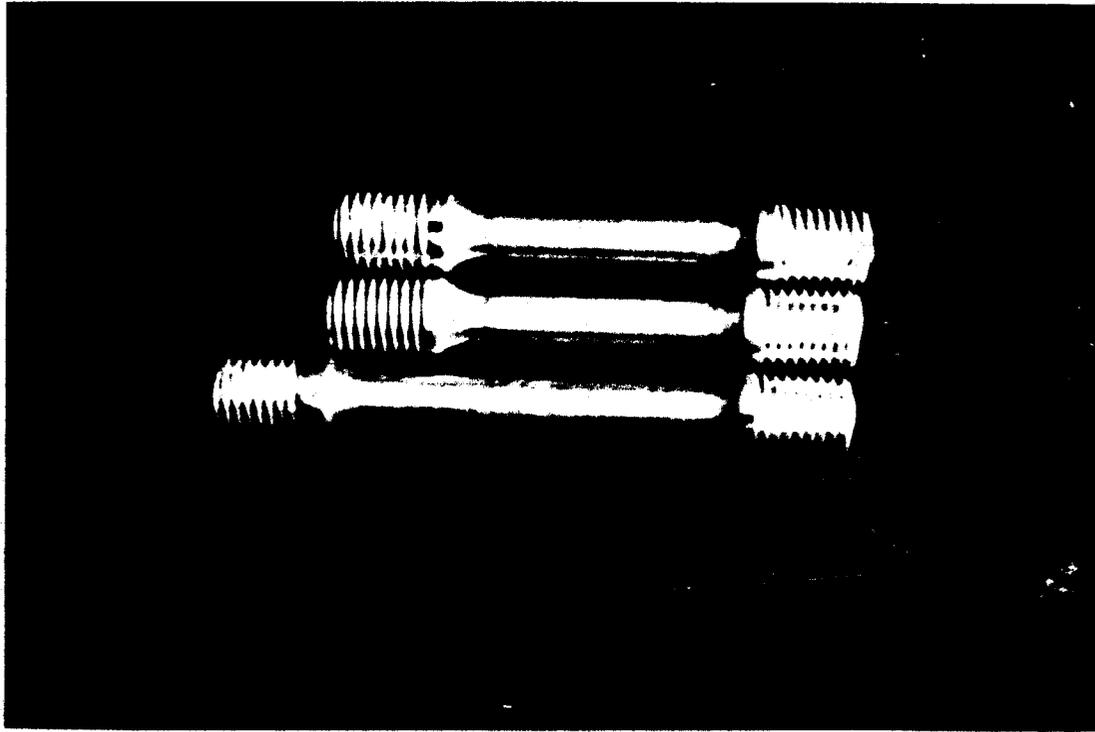
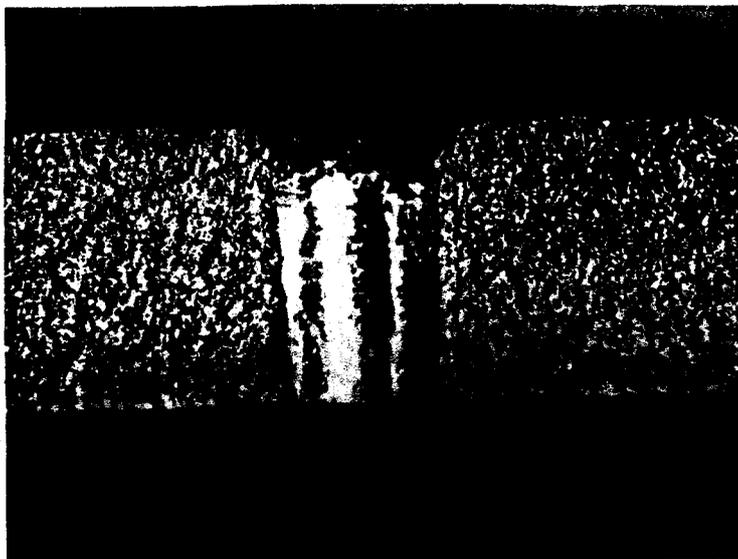


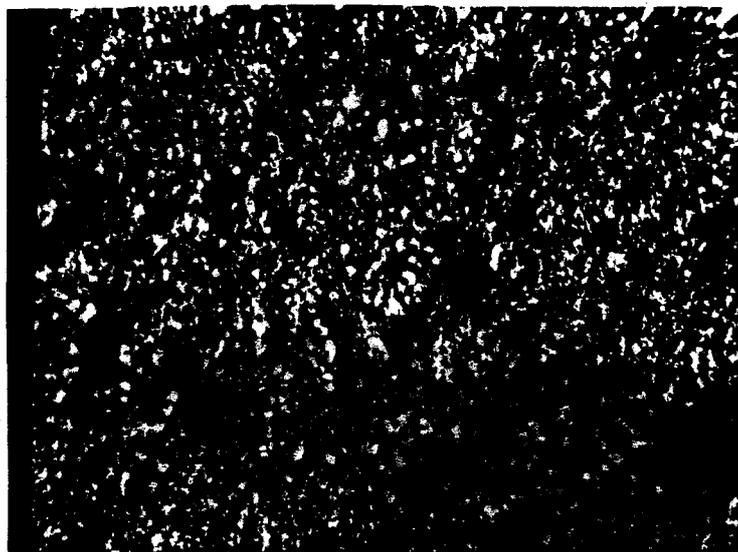
FIG 2.15 *Probetas obtenidas de la pieza para efectuar los ensayos.*

PRUEBA N°	PROBETA N°	UTS (Kg/mm ²) Ksi	Elongación (%)	Estricción (%)	DUREZA R _H
1	1	(17,78) 25,2	1,63	0,32	81
	2	NO SE REGISTRARON VALORES			
	3	(18,49) 26,2	1,52	1,36	
2	1	(13,00) 18,5	1,75	0,27	83
	2	(20,32) 28,8	2,09	1,46	
	3	(20,32) 28,8	2,01	1,42	
3	1	(18,65) 26,5	0,00	0,31	85
	2	(17,82) 25,3	1,95	1,34	
	3	(17,27) 24,5	1,85	0,92	

TABLA XIX *Tabla de Resultados.*



12X



32X

Fig 2.16 *Macrofotografía de la primera pieza obtenida.*

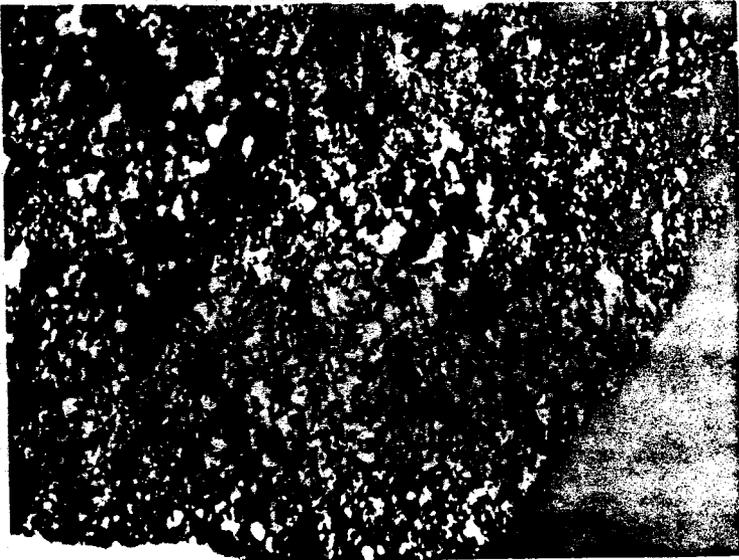
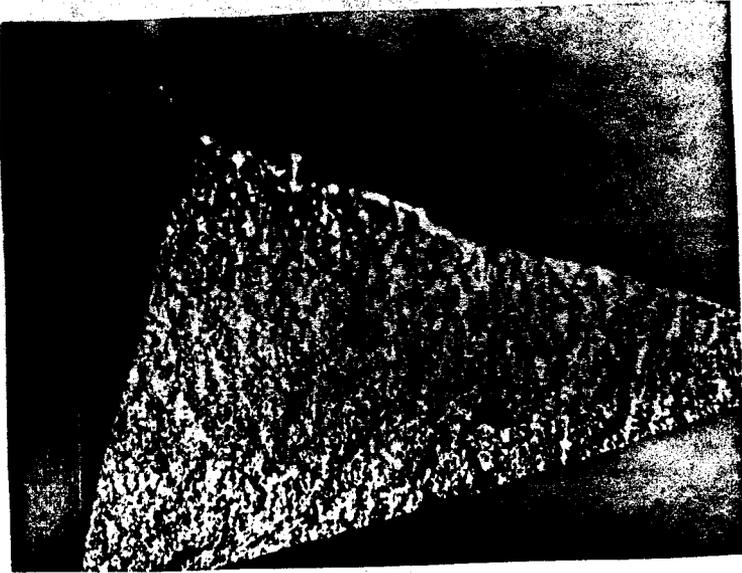


FIG 2.17 *Macrofotografía de la segunda pieza obtenida. Superior 12X, Inferior 32X.*



BIBLIOTECA

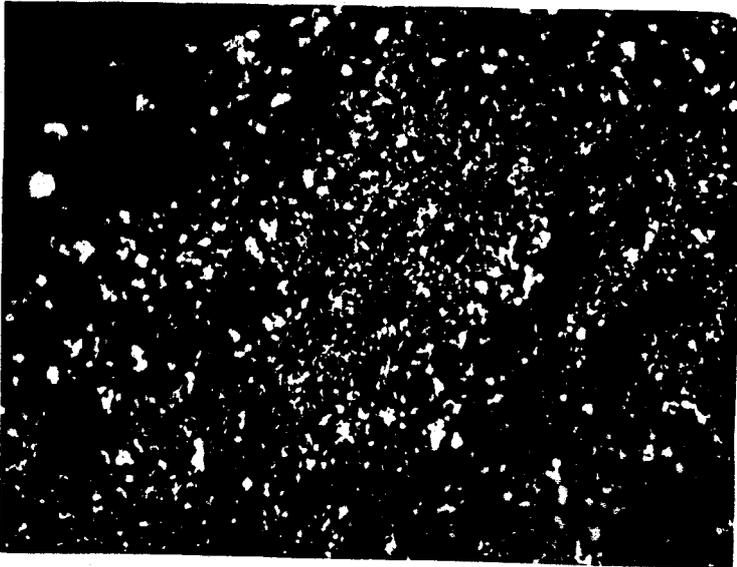
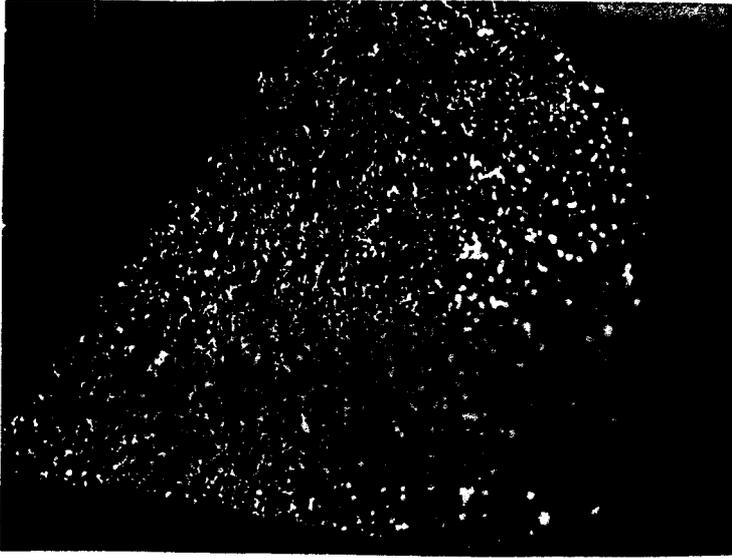


FIG 2.18 *Macrofotografía de la tercera pieza obtenida. Superior 12X, Inferior 32X.*

Para observar la microestructura de cada pieza obtenida se utilizó un microscopio especial. La microestructura obtenida se la muestra en dos direcciones. La primera, en la dirección en que aplica la fuerza de la prensa, y la segunda en la dirección transversal a la fuerza (ST).

Las muestras de cada pieza fueron sometidas al proceso de pulido, esto es hasta lija 600, y posteriormente con pasta de diamante sobre discos con paño. Así se obtuvieron las superficies completamente pulidas. Luego se las atacó a las muestras para que revelen la microestructura. Las Figuras 2.19, 2.20 y 2.21 muestran la microestructura de cada pieza obtenida. Es importante recalcar que en la Fig. 2.22, se muestra una microfotografía de una de las muestras sin ser atacadas para observar las porosidades y las impurezas.



FIG 2.19 *Microestructura de la primera pieza obtenida. Dirección (ST) 75X.*

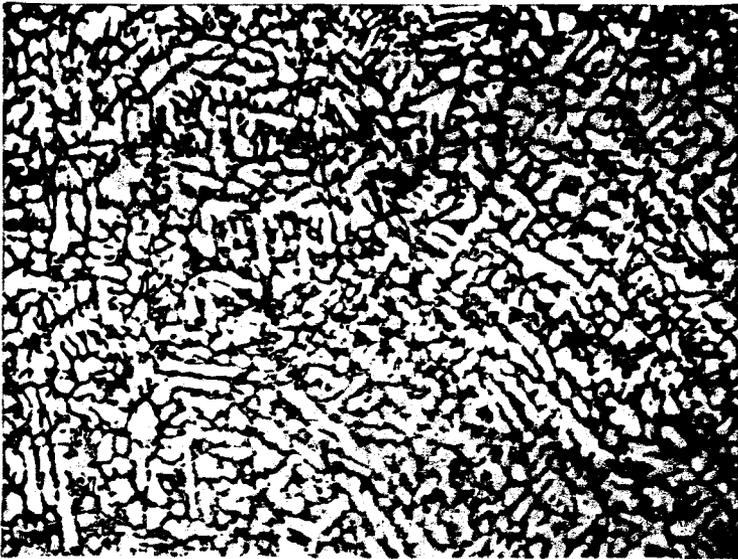
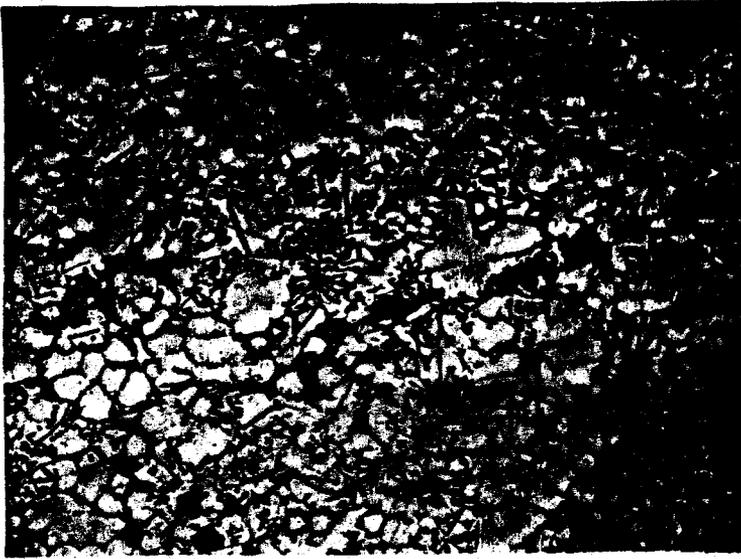


FIG 2.20 *Microestructura de la segunda pieza obtenida. Superior, Dirección (ST). Inferior, Dirección (L). 75X.*

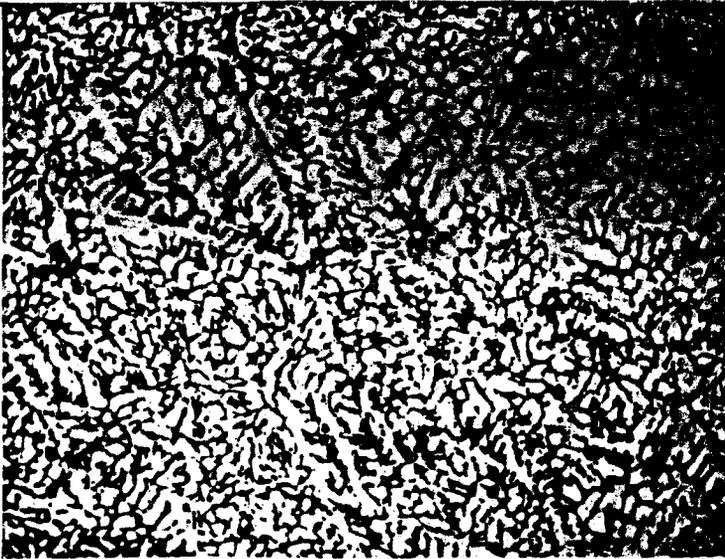
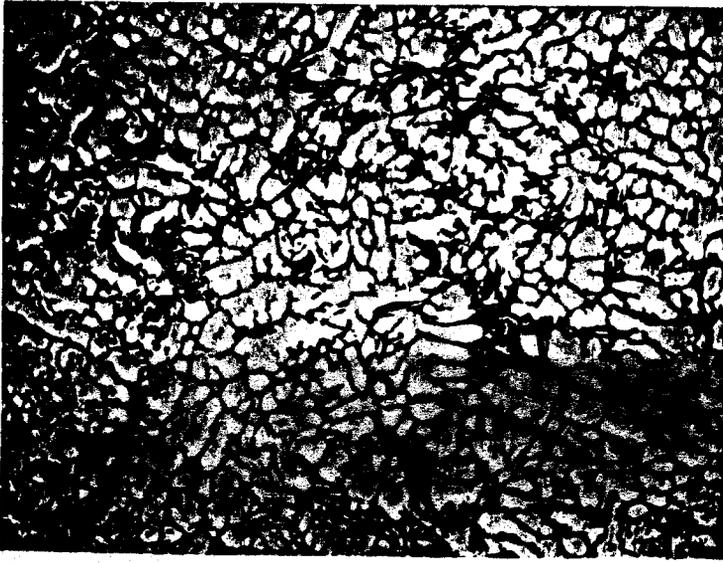


FIG 2.21 *Microestructura de la tercera pieza obtenida. Superior, Dirección (ST). Inferior, Dirección (L). 75X*

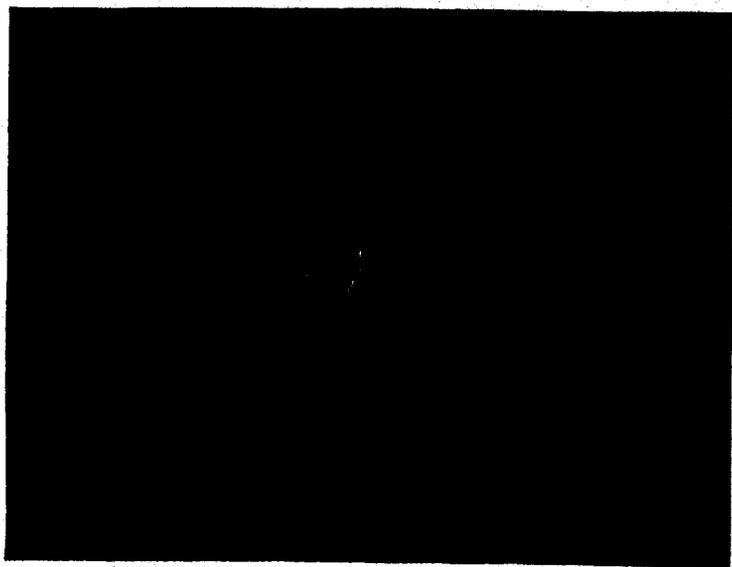


FIG 2.22 *Microestructura de la muestra sin ataque. 75X*

CAPITULO III

DISCUSION DE RESULTADOS

Durante la experimentación realizada para obtener la pieza mediante el proceso de solidificación bajo presión (SQC), podemos hacer a continuación un análisis de los resultados obtenidos.

Los valores obtenidos en las propiedades mecánicas que se muestran en la Tabla XIX, muestran claramente que los valores UTS y los valores de la ductilidad son mayores que el mínimo requerido (Tabla VII). Estos valores fueron obtenidos de fundición SQC en la condición de colado en bruto. Podemos observar claramente que los valores obtenidos correspondientes al UTS, la ductilidad (elongación y estricción) y la dureza de las probetas ensayadas de la segunda pieza son ligeramente superiores que los obtenidos para la tercera pieza, y finalmente tenemos los valores correspondientes a las probetas de la primera pieza. Esta diferencia de valores se debe a que SQC no posee sistemas de respiraderos, ni orificios de colada; por esta razón cualquier inclusión no-metálica introducida en el dado va a permanecer invariable en el

producto terminado, de ahí la pérdida de las propiedades tensiles de ductilidad. SQC siempre se utiliza desde el punto de vista de obtener las propiedades mecánicas más altas, y de allí que es importante empezar con un metal limpio libre de inclusiones de óxido. Podemos deducir entonces, que la diferencia obtenida en los valores de las propiedades tensiles es debido a que el método utilizado para la eliminación de impurezas del material no fué lo suficientemente efectivo, y que por lo tanto la primera pieza es la que posee la mayor cantidad de impurezas.

Con respecto al análisis del tipo de fractura de las muestras, Figuras 2.16-2.17-2.18, podemos decir que todas corresponden a un tipo de fractura frágil, ya que todas presentan una propagación de grietas, además muestran una apariencia granular, brillante y cristalina en la fractura. De las tres muestras ensayadas, se puede decir que la muestra de la tercera pieza presenta una fractura más ductil que el resto y que la muestra de la primera pieza es la que posee el tipo de fractura más frágil.

Se ha establecido una relación entre las condiciones del proceso y la macroestructura, mostrando una continua transición de un tamaño de grano grueso a uno fino con una optimización de los parámetros del proceso, tales como temperatura de colado y la presión específica aplicada

durante la solidificación. Debido a que la presión utilizada en la fabricación de las piezas es la misma, solo hubo variación en la temperatura de colado del material, y es así como se puede observar una estructura granular más fina en la tercera muestra obtenida, debido a que el metal colado estaba mucho más cerca de la temperatura de fluidez cero. La segunda pieza muestra una estructura granular ligeramente más grande, esto se debe a que el metal colado poseía una temperatura un poco más alta que la temperatura de fluidez cero, de ahí los granos más grandes. La primera pieza también tiene una estructura granular fina, debido a la temperatura que poseía el metal al momento de aplicarle la presión (cercano a la temperatura de fluidez cero). **Figuras 2.16-2.17-2.18.**

En lo que respecta a la microestructura, **Figuras 2.19-2.20-2.21**, obtenida de cada pieza, podemos decir que cada una de ellas posee una microestructura dendrítica típica de SDC. Cuando se las compara con la **Fig 1.8**. Las variaciones en el tamaño de las características estructurales (granos, espacio dendrítico, partículas constituyentes) ocurren desde el filo al centro de la fundición y de una sección a otra, esto se debe principalmente a la influencia de la razón de enfriamiento. Estas variaciones en la microestructura pueden ser minimizadas con un diseño apropiado del dado,

seleccionando el tipo de aleación, el tratamiento que se le da al metal y el control del proceso.

Dentro de la microestructura se pueden observar microporosidades. Estos afloran debido a la contracción del cambio de fase de líquido a sólido, o debido a la evolución de los gases disueltos mientras el metal colado se solidifica, o a una combinación de los dos. Debido a que todas las aleaciones comerciales se enfrían sobre un rango de temperatura, el sólido y líquido coexisten a través del proceso de solidificación, y por lo tanto pequeñas porciones de líquido pueden quedarse atrapadas entre los brazos dendríticos. Cuando este líquido atrapado se solidifica, la contracción acompañada a ésta produce microrechupes, a menos que más metal líquido pueda fluir en la región. Estos agujeros, los cuales tienden a residir en los sitios interdendríticos/intergranulares, son generalmente de formas irregulares. El rol desempeñado por la presión de solidificación es forzar una alimentación continua en estos pequeños agujeros, para obtener piezas en buen estado.

Los pequeños agujeros que se muestran en la **Fig 2.22**, constituyen los llamados micro-rechupes. Esta región de la fundición no pudo ser alimentada por más líquido porque la transmisión de la presión fue evitada debido a la

existencia de porciones sólidas de la fundición. En la práctica estos pequeños agujeros pueden ser eliminados con rediseño del dado y con el control del tiempo antes de cerrar el punzón. Otras de las razones por la cual aparecen estas microporosidades, puede ser debido a que no se utilizó ningún tratamiento para eliminar los gases. Otra forma para eliminar los pequeños poros es aplicando una presión aún mayor que la aplicada. Esto no fué posible debido a las limitaciones del equipo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.-

Al obtener las piezas mediante el proceso de fundición por solidificación bajo presión (SQC) y analizar los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El ensayo metalográfico poseen una pequeñísima cantidad de poros, microrechupes e inclusiones, esto se debió a que el método de purificación no fué lo suficientemente efectivo.
- Todas las piezas obtenidas presentan un buen acabado superficial, cuando se las compara con las que se obtienen en procesos de forja.
- Se puede observar claramente por las microestructuras obtenidas que éstas son típicas del proceso SQC. La microestructura se debe al molde metálico y a la aplicación de la presión.
- Las propiedades tensiles, son mayores que el mínimo requerido.



BIBLIOTECA

- Existe un gran ahorro de material utilizado, ya que todo el material colado depositado en el dado, queda en la pieza. Y la contracción del aluminio al solidificarse en este proceso es muy pequeño, por lo tanto si se desea maquirarla, la cantidad de maquinado necesario es mínimo.

RECOMENDACIONES.-

- Se puede usar este proceso cuando se necesitan piezas de mediano tamaño, con un buen acabado superficial, y de formas complejas.
- Para minimizar la variación del tamaño de las características estructurales (granos, espacios dendríticos, partículas constituyentes) a través de la pieza, se recomienda un diseño adecuado del dado, seleccionar el tipo de aleación más conveniente, y realizar el método de purificación del material más efectivo; además de controlar los parámetros del proceso.
- Para eliminar la cantidad de microrechupes, se recomienda re-diseñar el dado y controlar el tiempo antes de la aplicación de la presión y/o aplicar una mayor presión.

- Se pueden obtener niveles de propiedades más altos en aleaciones que responden al proceso de dos-pasos de tratamiento térmico y envejecimiento.

APENDICE A

Este apendice da a conocer el tipo de designación utilizado para cada tipo de aleación.

COMPOSICIONES TIPICAS Y PROPIEDADES
DE ALEACIONES AL ALUMINIO FUNDIBLES*
PREFIJO LM

TIPO	COMPOSICION	UTS (N/mm ²)	E (%)
NO-TRATABLES TERMICAMENTE:			
LM 6	Al-10.0/13.0 Si, OTROS: Cu, Mg, Fe, Ni, Zn, Pb, Sn, Ti	190 (CC)	5
LM 2	Al-9.0/11.5 Si, 0.7/2.5 Cu, OTROS: Mg, Fe, Ni, Zn, Pb, Sn, Ti	150 (CC)	—
LM 5	Al-3.0/6.0 Mg, 0.3/0.7 Mn, OTROS: Cu, Si, Fe, Ni, Zn, Pb, Sn, Ti	140 (SC) 170 (CC)	3 5
TRATABLES TERMICAMENTE:			
LM 10	Al-9.5/11.0 Mg, OTROS: Cu, Si, Fe, Mn, Ni, Zn, Pb, Sn, Ti	280 (SC) 310 (CC)	8 12
LM 13	Al-1.5 Cu, 0.8/1.5 Mg, 0.0 Si, OTROS: Fe, Mn, Pb, Sn, Ti	210 (CC) 170 (SC) 280 (CC)	— — —

BIBLIOTECA



* Tomada del libro *Properties of Materials*, CHONG, C., M&E Handbooks, Great Britain, 1.977

APENDICE A.2

DESIGNACION DE ALEACIONES AL ALUMINIO UNS*

SERIE 100: Todas contienen más del 99% Al, y no son aleaciones fundibles buenas, comparándolas con otros grupos. Su uso está limitado a aplicaciones de alta conductividad.

SERIE 200: Composición Al/Cu, posee poca capacidad de fundición y baja resistencia a la corrosión.

SERIE 300: Composición Al/Si/Cu. Poseen una gran capacidad de fundición y son muy resistentes.

SERIE 400: Si, su elemento aleante principal. Este grupo posee excelentes características de fundición y buenas propiedades mecánicas.

SERIE 500: Aleaciones cuyo elemento aleante principal es el Magnesio.

SERIE 600: Aleaciones del tipo Si, resistentes al desgaste.

SERIE 700: Aleaciones cuyo principal elemento aleante es el Zinc, con cantidades pequeñas de magnesio.

SERIE 800: Aleaciones a base de Plomo. Utilizadas como anti-fricción.

* Tomada del libro *The Forming of Aluminium Alloys Part 1*, SMITH. A., Alcan, Australia, 1.960

DESIGNACION PARA LOS GRUPOS DE ALEACION*

	NUMERO DE ASOCIACION DE ALUMINIO
Aluminio, 99% y mayor, principal elemento de aleación	1xxx
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y Silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otro elemento	8xxx
Serías no utilizadas	9xxx

* Tomada del libro *Introducción a la Metalurgia Física*, AVNER S., 2a. ed.,
Mc Graw-Hill, México, 1.981

A P E N D I C E A.4

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE
 SIMBOLO H
 H1-H19, INCLUSO TIPOS BASE CROMO*

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co
H10	0,40	..	..	3,25	..	0,40	.....	2,50	
H11	0,35	..	..	5,00	..	0,40	.....	1,50	
H12	0,35	..	..	5,00	..	0,40	1,50	1,50	
H13	0,35	..	..	5,00	..	1,00	.....	1,50	
H14	0,40	..	..	5,00	..	.....	5,00	.....
H19	0,40	..	..	4,25	..	2,00	4,25	.....	4,25

* Tomada del libro *Introducción a la Metalurgia Física*, AVNER, 2a. ed., McGraw-Hill, México, 1.981

TABLA DE DESIGNACION DE LETRAS DE
METALES NO ALEADOS*

A	Aluminio	G	Magnesio	P	Plomo
B	Bismuto	H	Torio	Q	Plata
C	Cobre	K	Zirconio	R	Cromo
D	Cadmio	L	Berilio	S	Silicio
E	Tierras Raras	M	Manganeso	T	Estaño
F	Hierro	N	Niquel	Z	Zinc

Las designaciones para metales no aleados consisten en la pureza mínima especificada, conservando todos los dígitos pero eliminando el punto decimal, seguidas por un número de una serie. El nombre completo del metal base precede la designación, pero se omite por brevedad cuando es obvio el metal base a que se refiere.

* Tomada del libro *Introducción a la Metalurgia Física*, AVNER S., 2a. ed., Mc Graw-Hill, México, 1.986

BIBLIOGRAFIA

1. CAMPBELL, J., *Casting Developments*, Casting Technology, Oxford, 1.991, P. 211-114
2. CHADWICK, G. Y YUE, T., *Principals and applications of squeeze casting*, Metals and Materials, Vol. 5, N°1, Strasbourg, 1.989, P. 6-11
3. CLEG, A., *Precision Casting Processes*, Pergamon Press, Oxford, 1.991, P. 176/188-207
4. DORCIC, J. Y VERMA, S., *Squeeze Casting*, The Journal of the Institute of Metals, Vol. 3, New York, 1.988, P. 323-326
5. DORCIC, J. Y VERMA, S., *Squeeze Casting Process for Metal-Ceramic Composites*, Society of Automotive Engineers, Vol. 2, Chicago, 1.988, P. 143-154
6. JACKSON, P., *Advanced Casting Technology*, The Journal of The Institute of Metals, Vol.2, New York, 1.986, P. 696-698
7. LYNCH, R., OLLEY, R. Y GALLAGHER, P., *Squeeze Casting of Aluminum*, 79th. AFS Transactions, Vol. 83, 1.975, P. 569-576
8. LYNCH, R., OLLEY, R. Y GALLAGHER, P., *Squeeze Casting of Brass and Bronze*, AFS Transactions, Vol. 83, 1.975, P. 561-568

9. RAJAGOPAL, S., *Squeeze Casting: A Review and Update*, Journal of Applied Metalworking, Vol. 1, NO 4, 1.981, P. 3-14
10. RAJAGOPAL, S. Y ALTERGOTT W., *Quality Control in Squeeze Casting of Aluminum*, AFS Transactions, Vol. 85, 1.983, P. 145-154