

Figura 6.28. Sección transversal a la fractura en una probeta C8

Figura 6.29. Sección transversal a la fractura en una probeta C8 (detalle de la anterior)

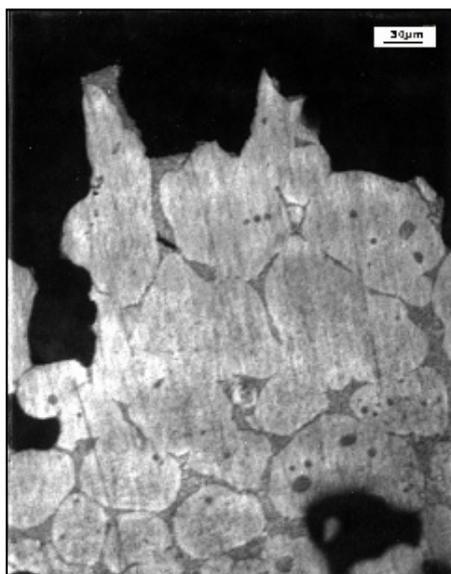
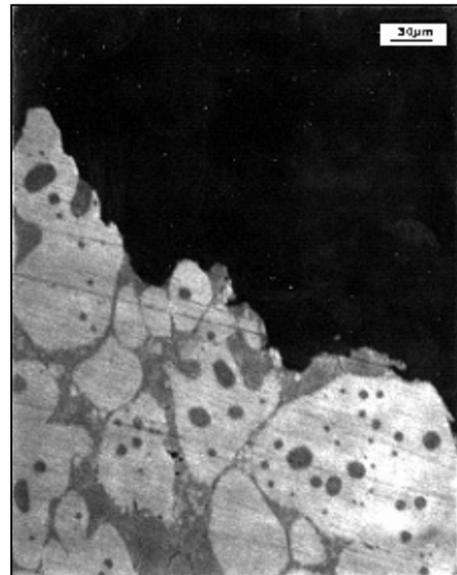


Figura 6.30. Sección transversal a la fractura en una probeta C1

6.8 OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN

6.8.1 Metodología empleada

La optimización de los parámetros de inyección a partir de los resultados descritos en el apartado anterior no puede abordarse fácilmente, por lo que se hace necesario utilizar una metodología específica que permita evaluar la influencia que tienen los distintos parámetros en el proceso de conformación. Por lo tanto, una vez diseñada la serie de experimentos de acuerdo con los parámetros más relevantes en la inyección, hay que identificar qué parámetros tienen más influencia en el resultado final del proceso de Thixocasting según los resultados de rayos X, tracción y análisis microestructural, y evaluar el mejor conjunto de parámetros que conduzcan a una inyección óptima.

Esta metodología comprende las siguientes etapas:

Etapa 1. Definición de un semicomponente con características de inyección de dificultad universal y diseño de experimentos (DOE) con la siguiente rutina de trabajo:

- a) Definir el número de muestras a inyectar para llegar a los parámetros más adecuados y su varianza.
- b) Identificación de los parámetros de proceso que más influyen.
- c) Evaluación del mejor conjunto de parámetros del proceso. Se han considerado los siguientes:
 - La temperatura de la muestra después de la inyección: es posible obtener diferentes temperaturas finales utilizando diferentes energías y diferentes tiempos de aplicación en el horno de inyección.
 - Las curvas de inyección: la velocidad de enfriamiento de la pieza es un parámetro crítico, muy variable durante la inyección, que produce la variación del flujo laminar.
 - Golpe final de presión: esta presión ayuda a eliminar los defectos debidos a la contracción del componente.
 - Temperatura del molde: es necesaria una mínima temperatura del molde para evitar que el material se enfríe demasiado; la temperatura depende de la energía térmica que proporciona la prensa

Después de la inyección del lote de semicomponentes, según el DOE (18 componentes), se realiza la identificación de la influencia de estos 4 parámetros en la calidad de los mismos, según los resultados obtenidos, con una metodología que consiste de los pasos siguientes:

- Análisis de defectos
- Caracterización mecánica
- Caracterización microestructural
- Análisis de varianza.

Todos estos pasos se describen en forma detallada en las páginas siguientes.

Etap 2. Fabricación de los semicomponentes según las tabla del DOE e identificación de los puntos más críticos.

Etap 3. Determinación de macrodefectos mediante la técnica de rayos X.

Etap 4. Caracterización de las propiedades mecánicas $R_{p\ 0.2}$, R_m y $A\ \%$

Etap 5. Caracterización microestructural.

Etap 6. Clasificación de los parámetros de control.

Etap 7. Evaluación de las medias del análisis de varianza (ANOVA) para poder clasificar los parámetros de proceso en función del porcentaje significativo: Porcentajes grandes \Leftrightarrow gran influencia del parámetro en el proceso.

- **Etap 1.** Definición del componente y diseño de experimentos.

El semicomponente diseñado se ha descrito ya en el Apartado 6.1, y los parámetros de inyección se han basado en los valores típicos de Thixocasting (Tabla 6.1).

- Temperatura del lingote: $575 \pm 5\ ^\circ\text{C}$
- El tipo de curva de inyección: D1-D2-D3 (dependiendo del tipo de semicomponente)
- Golpe final presión: 400-700-1000 bar
- Temperatura del molde: 150-180-210 $^\circ\text{C}$

Semicomponentes conformados en estado semisólido

- **Etapa 2.** Fabricación de los semicomponentes.

Se han conformado 18 semicomponentes en la empresa Stampal S.A., en Italia.

- **Etapa 3.** Determinación de defectos mediante la técnica de rayos X.

Se han analizados los 18 semicomponentes, mediante la técnica de los Rayos-X. Este análisis ha sido realizado en las cuatro caras de los semicomponentes.

Se han establecido dos tipos de defectos significativos (norma ASTM E52-49T), porosidad de contracción (micro-rechupes) y porosidad por gas atrapado, y se han clasificado según la norma ASTM E155-60T (Tabla 6.2). Cuanto mayor sea el defecto mayor será el grado de asignación.

El coeficiente de los defectos **D** se asigna a la media de los defectos (porosidad de contracción y porosidad por gas atrapado) en los semicomponentes, de acuerdo con la correspondiente fórmula:

$$D = \frac{(gas\ atrapado_{Media} + porosidad\ contracción_{Media})}{2} \cdot 10 \quad (6.1)$$

donde la media aritmética de cada defecto se toma según la ecuación:

$$Defecto_{Media} = \frac{\sum(Defectos)}{4} \quad (6.2)$$

A menor valor de D, mejor es la calidad del componente. Los resultados se detallan en la Tabla 6.9

En primer lugar se detecta que una menor presión final (400 bars) provoca mayores defectos. La presión final es importante para compactar el metal durante la solidificación.

Semicomponentes conformados en estado semisólido

Tabla 6.9. Análisis de defectos de los distintos semicomponentes.

Nº Muestra	Defecto	Parte C	Parte B	Parte A	Parte D	media	Coef D
1	Microrechupes	3	3	3	2	2,75	22,5
	Gas atrapado	1	4	-	2	1,75	
2	Microrechupes	1	-	-	-	0,25	3,75
	Gas atrapado	-	-	-	2	0,5	
3	Microrechupes	2	-	-	1	0,75	6,25
	Gas atrapado	-	1	-	1	0,5	
4	Microrechupes	0	3	3	-	1,5	27,5
	Gas atrapado	6	2	-	8	4	
5	Microrechupes	1	2	1	-	1	18,75
	Gas atrapado	-	2	2	7	2,75	
6	Microrechupes	1	1	-	-	0,5	10
	Gas atrapado	-	-	-	6	1,5	
7	Microrechupes	2	1	1	0	1	17,5
	Gas atrapado	2	3	-	5	2,5	
8	Microrechupes	1	-	-	1	0,5	12,5
	Gas atrapado	1	-	-	7	2	
9	Microrechupes	2	2	-	-	1	8,75
	Gas atrapado		3	-	-	0,75	
10	Microrechupes	1	-	1	-	0,5	7,5
	Gas atrapado	-	-	-	4	1	
11	Microrechupes	0	6	3	0	2,25	23,75
	Gas atrapado	2	-	4	4	2,5	
12	Microrechupes	1	3	0	-	1	11,25
	Gas atrapado	-	-	-	5	1,25	
13	Microrechupes	3	-	-	-	0,75	6,25
	Gas atrapado	2	-	-	-	0,5	
14	Microrechupes	1	-	-	-	0,25	3,75
	Gas atrapado	-	-	-	2	0,5	
15	Microrechupes	2	1	-	2	1,25	17,5
	Gas atrapado	2	-	-	7	2,25	
16	Microrechupes	1	-	-	-	0,25	7,5
	Gas atrapado	1	-	-	4	1,25	
17	Microrechupes	2	3	2	-	1,75	18,75
	Gas atrapado	3	-	-	5	2	
18	Microrechupes	2	3	2	3	2,5	26
	Gas atrapado	9	-	-	2	2,75	

En el siguiente diagrama (Fig. 6.31) se observa cómo varía este coeficiente D en función de la presión final.

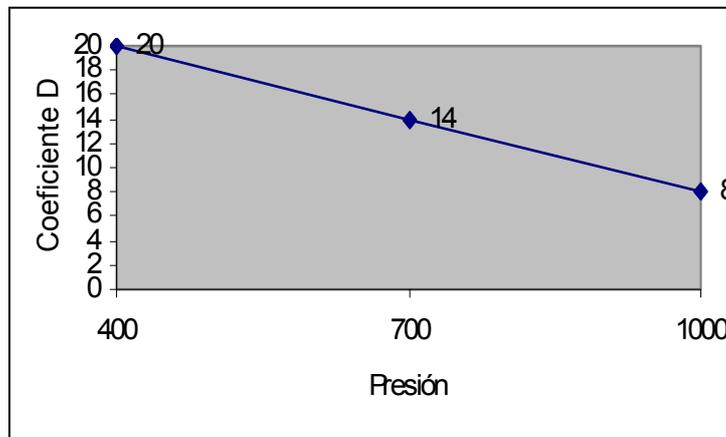


Figura 6.31. Variación del coeficiente de defectos D en función de la presión.

- **Etapa 4.** Caracterización de propiedades mecánicas.

Se han evaluado los siguientes parámetros obtenidos de los ensayos de tracción:

- $Rp_{0,2}$: Valor medio del límite elástico
- Rm : Valor medio de la carga de rotura
- A %: Valor medio de la elongación

con las siguientes condiciones:

1. Si la muestra presenta un alargamiento a fractura inferior al 4%, no se considera.
2. Si más de un ensayo de un semicomponente es correcto (presentan propiedades mecánicas adecuadas), se calcula primero la media de las propiedades mecánicas y después calculamos el coeficiente L_{mec} .

Este coeficiente se calcula con la siguiente fórmula:

$$L_{mec} = \frac{(Rp_{0,2} \cdot Rm \cdot A\%)}{1000} \quad (6.3)$$

La Tabla 6.10 muestra los resultados obtenidos con los 18 semicomponentes:

Tabla 6.10. Resultados de la caracterización mecánica de semicomponentes.

Semicomponente	Rp_{0,2} /MPa	Rm /Mpa	A /%	L_{mec}
1	128	227	7,1	207
2	129	235	8,1	246
3	124	238	8,2	242
4	121	212	8,6	118
5	125	236	9,6	282
6	123	240	11,6	341
7	119	218	6,4	166
8	126	235	10,1	301
9	116	220	5,9	152
10	127	236	7,2	215
11	122	213	4,6	119
12	0	0	0	0
13	118	218	7,6	195
14	133	243	9,1	296
15	121	230	8,9	249
16	118	231	10,2	278
17	116	222	8,2	210
18	117	232	11,2	304

El semicomponente N° 12 no se ha tenido en cuenta pues su alargamiento ha sido inferior al 4%.

En las gráficas de las Figs. 6.32 a 6.34 se muestra cómo varían estos parámetros, y puede observarse cómo la variación de los parámetros del proceso ha tenido mayor influencia en el alargamiento que en los valores de resistencia.

Semicomponentes conformados en estado semisólido

En la gráfica de la Fig. 6.35 se compara la variación de los dos coeficientes obtenidos, D y L_{mec} . Se puede observar que hay una buena correlación entre ambos.

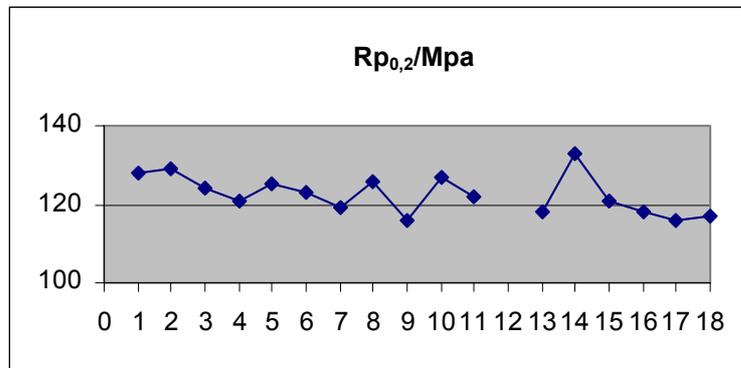


Figura 6.32. Variación del límite elástico de los 18 semicomponentes.

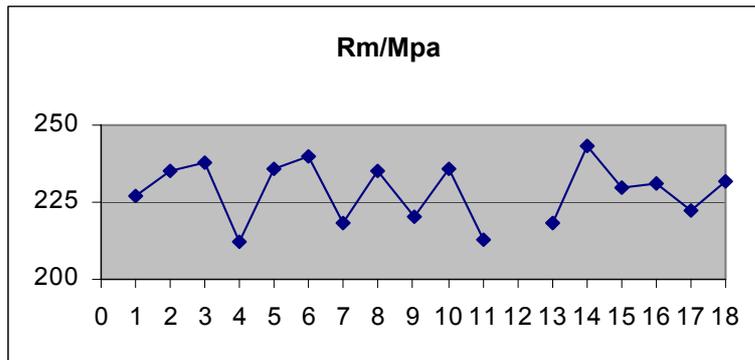


Figura 6.33. Variación de la resistencia tracción de los 18 semicomponentes.

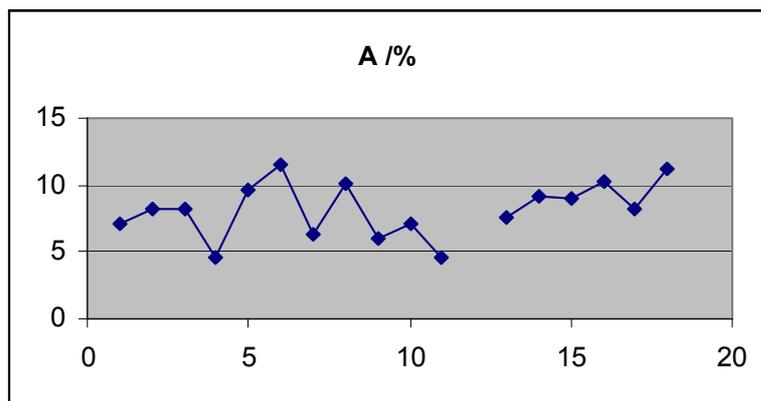


Figura 6.34. Variación del alargamiento de los 18 semicomponentes.

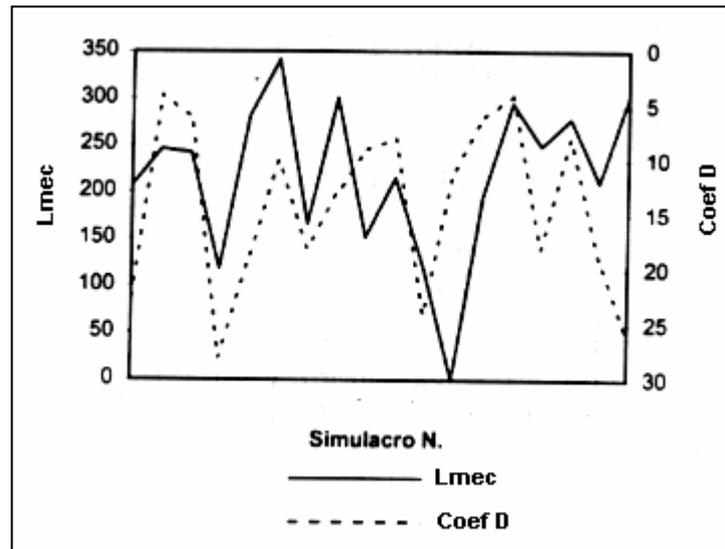


Figura 6.35. Variación de los coeficientes D y L_{mec} .

▪ **Etapa 5.** Caracterización microestructural.

Se considera que la calidad de la microestructura es proporcional a la homogeneidad de la distribución de la fase α dentro de la pieza.

Se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo para conocer la distribución de la fase α dentro de la estructura sólida (Tabla 6.3) y el tamaño de los constituyentes y los poros, que se supone que tienen más influencia en la homogeneidad (Tabla 6.4).

Los parámetros microestructurales más importantes o de mayor influencia en la calidad del semicomponente son los siguientes:

- Fase α .
 - Eutéctico.
 - Porosidad.
- La fase α :
Se ha considerado en primer lugar el porcentaje del área de fase α por unidad de superficie, y en segundo lugar el tamaño de los glóbulos α , que recordemos, fueron clasificados según el siguiente orden:

Semicomponentes conformados en estado semisólido

1 = grande. 2 = medio. 3 = pequeño.

En orden a obtener un único coeficiente representativo, el porcentaje de α ha sido convertido en un n° mediante la siguiente fórmula:

$$alfa = \frac{\% \alpha}{\frac{Max.(\% \alpha)}{3}} \quad (6.4)$$

Entonces, la media entre el nuevo valor de α y el tamaño de glóbulo α se calcula mediante la fórmula:

$$Tot \alpha = \frac{((Alfa) + (Tamaño \alpha))}{2} \quad (6.5)$$

Los resultados están en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Resultado de la caracterización microestructural de la fase α .

Semicomponente	% α	Tamaño α	Tota
1	65,05	2	2
2	57,65	3	3
3	61,95	1	2
4	57,35	2	2
5	56,96	2	2
6	56,20	2	2
7	59,92	2	2
8	51,35	2	2
9	64,67	1	2
10	58,10	2	2
11	65,43	2	2
12	70,35	1	2
13	71,82	2	2
14	57,35	3	2
15	68,84	2	3
16	55,61	3	3
17	61,67	2	2
18	61,07	2	2

- El eutéctico:

El microconstituyente eutéctico ha sido clasificado según su tamaño (Tabla 6.3) en:

1 = grande 2 = medio 3 = pequeño.

- La porosidad:

La porosidad ha sido clasificada en base a su cantidad (1= mucho, 3= poco) y su tamaño (1= grande, 2= medio y 3= pequeño). La suma de los dos valores (cantidad y tamaño) ha sido utilizada para obtener un número que permita tener en cuenta su influencia. Todos los valores se muestran en la Tabla 6.12 .

Con estos valores (α , eutéctico y porosidad) y la evaluación microestructural, se ha obtenido un coeficiente para cada semicomponente, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$COEF. = 2 \cdot Eutectico + Tot\alpha - 2 \cdot porosidad \quad (6.6)$$

En esta ecuación tienen más peso la fase eutéctica y el contenido de porosidad, que la fase α . La fase α apenas cambia en todo el proceso y por ello es menos importante para la obtención de una estructura homogénea.

Los resultados obtenidos están reflejados en la siguiente tabla (Tabla 6.12).

Tabla 6.12. Coeficiente relativo a la caracterización microestructural.

Semicomponente	Eutéctico	α	Porosidad	Coeficiente
1	3	2	1	6,36
2	2	3	0	6,70
3	1	1	0	3,79
4	2	2	4	-1,80
5	2,5	2	0	7,19
6	2	2	2	2,17
7	1	2	2	0,25
8	1,5	2	2	1,07
9	3	1	4	-0,15
10	2,5	2	3	-0,79
11	2,5	2	4	-0,63

Semicomponentes conformados en estado semisólido

Semicomponente	Eutéctico	α	Porosidad	Coefficiente
12	3	1	0	7,97
13	2,5	2	0	7,50
14	1	3	0	4,70
15	2,5	2	0	7,44
16	2	3	1	5,66
17	1	2	4	-3,71
18	2	2	4	-1,72

(continuación Tabla 6.12)

- **Etapas 6.** Clasificación de los parámetros de control.

En la Tabla 6.13 se reflejan los valores obtenidos en la caracterización de las propiedades mecánicas junto con los coeficientes definidos hasta ahora.

Tabla 6.13. Parámetros de control del proceso junto a los coeficientes obtenidos en la caracterización de defectos, microestructural y mecánica.

Muestra	Parámetros del proceso				Resultados del ensayo					
	Temperatura	Energía	P.Final	Curva	Rp _{0,2}	Rm	A%	L _{mecc}	D	Coef
1	150	420	400	D1	128	227	7,1	207	23	6,36
2	150	420	700	D2	129	235	8,1	246	4	6,70
3	150	450	1000	D3	124	238	8,2	242	6	3,79
4	150	450	400	D1	121	212	4,6	218	28	-1,80
5	150	490	700	D2	125	236	9,6	282	19	7,19
6	150	490	1000	D3	123	240	11,6	341	10	2,17
7	180	420	400	D3	119	218	6,4	166	18	0,25
8	180	420	700	D3	126	235	10,1	301	13	1,07
9	180	450	1000	D2	116	220	5,9	152	9	-0,15
10	180	450	400	D2	127	236	7,2	215	8	-0,79
11	180	490	700	D1	122	213	4,6	119	24	-0,63
12	180	490	1000	D1	0	0	0	0	11	7,97
13	210	420	1000	D2	118	218	7,6	195	6	7,50
14	210	420	1000	D1	133	243	9,1	296	4	4,70
15	210	450	700	D3	121	230	8,9	249	18	7,44
16	210	450	700	D1	118	231	10,2	278	8	4,66
17	210	490	400	D2	116	222	8,2	210	19	-3,71
18	210	490	400	D3	117	232	11,2	304	26	-1,72

El objeto de este análisis es tener unos parámetros que permitan optimizar el proceso de Thixoforming, en base a la caracterización mecánica y el análisis de defectos (radiográfico y el análisis microestructural). Mediante el Análisis de la varianza (ANOVA) se obtendrán los parámetros que más afectan en el proceso de Thixoforming.

- **Eta**pa 7. Análisis de la varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) es un análisis estadístico de los resultados, que se realiza para obtener una evaluación porcentual que tenga en cuenta la interacción entre los resultados y el parámetro considerado, y permita determinar el grado de significancia de dicho parámetro.

En particular, el porcentaje obtenido llamado P (valor P obtenido de un algoritmo) se compara con un valor de referencia α y se tiene en cuenta la siguiente definición fundamental:

“Un factor se considera significativo en un porcentaje de significancia igual a $100(1 - \alpha)\%$ si P es menor que α ”.

Se han evaluado tres tipos de resultados (análisis de defectos, caracterización microestructural y caracterización mecánica) y se han considerado 4 parámetros (T_{Molde} , Energía, P_{Final} y curva de velocidad), que han sido modificados en los diferentes ensayos de inyección:

- A es la temperatura
- B es la energía
- C es la presión final
- D es la curva tipificada de velocidad

Estos valores variaron en tres niveles (Tabla 6.14):

Tabla 6.14. Variables relevantes en el proceso de inyección.

	Nivel1	Nivel 2	Nivel 3
Temperatura	150	180	210
Energía	420	450	490
Presión final	400	700	1000
Curva	D1	D2	D3

Finalmente, se asignan los valores de referencia de α que variaran entre 5 y 20%, por lo tanto uno de los 4 parámetros se declarará significativo si el valor de P asociado a él vale 0,2 o menos (Tabla 6.15):

Significantes = Validez

Tabla 6.15. Valores de referencia y significancia

	Valores	Significancia correspondiente
α	5%	95%
α	10%	90%
α	20%	80%

Puede suceder que cada uno de los 4 parámetros relevantes sea significativo para un aspecto específico de los resultados. Así, la T_{Molde} y el tipo de curva pueden ser significantes para la L_{mec} mientras que al mismo tiempo E y la P_{Final} pueden ser significantes para el análisis de defectos por rayos X. En nuestro caso, los 4 parámetros relevantes son significantes para el proceso de inyección.

6.8.2 Análisis de resultados

En las siguientes tablas (Tablas 6.16 a 6.19) se describen los resultados del análisis de varianza.

Tabla 6.16. Análisis de varianza en L_{mec} .

	P	Validez
Temperatura	0,209	80%
Energía	0,664	No
Presión final	0,507	No
Curva	0,205	80%

Sólo dos factores (temperatura y el tipo de curva) tienen validez en el comportamiento mecánico.

Para comprender mejor la influencia de las propiedades mecánicas se ha utilizado el propio análisis de varianza en estas características mecánicas (Tabla 6.17).

Tabla 6.17. Análisis de la varianza en las propiedades mecánicas.

Factores	$R_{p0,2}$		Rm		A%	
	P	Validez	P	Validez	P	Validez
Temperatura	0,309	No	0,430	No	0,107	90%
Energía	0,218	No	0,915	No	0,580	No
P. Final	0,756	No	0,649	No	0,538	No
Curva	0,746	No	0,449	No	0,106	90%

Se observa que la propiedad con mayor validez es el alargamiento a fractura. En particular el parámetro A (Temperatura) y el parámetro D (Curvas de velocidad) son los que afectan a esta propiedad mecánica.

Tabla 6.18. Análisis de Varianza en los rayos X.

	P	Validez
Temperatura	0,898	No
Energía	0,161	80%
P. Final	0,015	95%
Curva	0,281	No

Respecto al análisis de rayos X (Tabla 6.18), los factores más importante son la presión final y la energía, porque su valores son de 80% y 95%, respectivamente.

Tabla 6.19. Análisis de varianza en la microestructura.

	P	Validez
Temperatura	0,425	No
Energía	0,437	No
P. Final	0,083	90%
Curva	0,804	No

La homogeneidad microestructural (Tabla 6.19) dependerá de la presión final de inyección (90%).

6.8.3 Definición de los parámetros óptimos de trabajo

La temperatura y la curva de inyección son muy importantes para mejorar las características mecánicas, particularmente el alargamiento, mientras que no influyen en $R_{p0,2}$ ni en R_m . Teniendo esto en cuenta obtenemos la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Variables que afectan al alargamiento.

Factor	Mejores valores	A% (valor medio)
Temperatura	210°	9,20%
Curva	D3	9,40%

Respecto al análisis de rayos X, la presión final y la energía son muy importantes en el control de defectos. Una gran presión y una energía baja nos dan una mejor inyección. Con ello obtenemos los valores de la Tabla 6.21.

Tabla 6.21. Variables que afectan a los defectos.

Factor	Mejores valores	Coef. Defec.
P.Final	1000 bar	7,66%
Energía	420 Wh	11,33%

La homogeneidad microestructural está influida por la presión final. Los mejores valores para obtener una buena homogeneidad están entre 700 y 1000 bars. La mejor presión será, según el análisis de los rayos X (Tabla 6.9), la de 1000 bars.

Tabla 6. 22 Variables que afectan a la homogeneidad.

Factor	Mejores valores	Homogeneidad
P. Final	700 bar	4,41
P. Final	1000 bar	4,33

Así pues los mejores parámetros obtenidos son los siguientes:

- **Temperatura : 210°C**
- **Energía: 420 Wh**
- **Presión final: 1000 bar**
- **Curva: D3**

6.9 EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ESFEROIDIZACIÓN EN LA MICROESTRUCTURA

Se han realizado una serie de tratamientos térmicos a muestras de semicomponentes de A357, al igual que se realizaron en el lingote de Rheocasting, con el objetivo de comparar la evolución del silicio eutéctico en ambos casos.

Para cada temperatura, las muestras se han introducido simultáneamente en el horno, y se han retirado a diferentes tiempos. Como las muestras son pequeñas, el enfriamiento al aire es muy rápido.

Las condiciones de ensayo han sido:

- Temperaturas: 450, 500 y 550 °C.
- Tiempos: 15 min, 30 min, 45 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h y 24 h.

6.9.1 Evolución del silicio eutéctico

El silicio eutéctico evoluciona con la temperatura y el tiempo, como puede observarse en las micrografías de las Figs. 6.36 a 6.40.

El tamaño del silicio (inicialmente 0,5 μm) aumenta a mayor velocidad a medida que aumenta la temperatura (Figs. 6.41a y 6.41c) y el tiempo de tratamiento. Los datos numéricos se encuentran en el Anexo, Tablas 2.1 a 2.3.

El factor de forma presenta alteraciones debido al crecimiento de los cristales de silicio.

A altas temperaturas, el proceso de esferoidización de las partículas es muy rápido y las variaciones detectadas en función del tiempo pueden deberse a procesos de redisolución y crecimiento.

A bajas temperaturas el incremento de la esferoidización es función del tiempo (Fig. 6.41b). El aumento es muy rápido en el tratamiento a 550 °C: después de 12 horas

llega a alcanzar un tamaño 10 veces mayor que el tamaño inicial. Esta velocidad de crecimiento en el lingote se alcanzaba a las 24 horas de tratamiento, ya que el tamaño del silicio de partida era menor. En general la velocidad de crecimiento en el material conformado es mayor.

A temperatura elevada y tiempo de tratamiento largo, se obtiene una matriz continua de fase α y cristales de silicio, de gran tamaño, dispuestos en los antiguos límites de los glóbulos de fase α (Fig. 6.40).

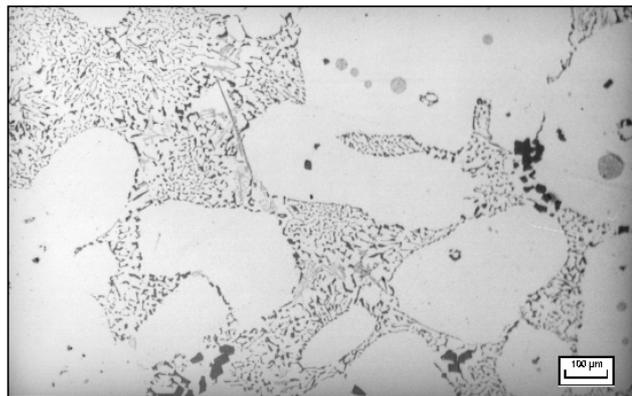


Figura 6.36. Microestructura inicial en un componente A357 conformado por Thixocasting.

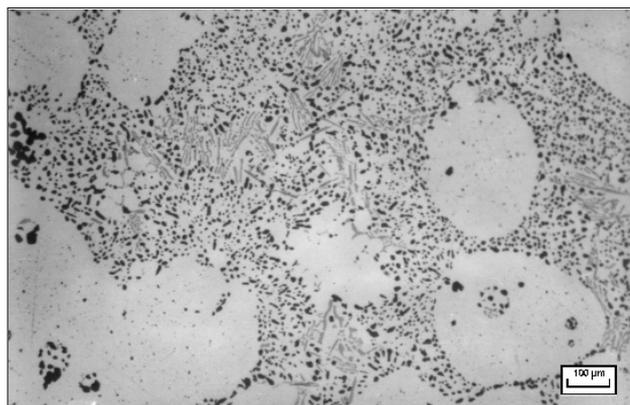


Figura 6.37. Tratamiento de 450° C durante 6 horas.

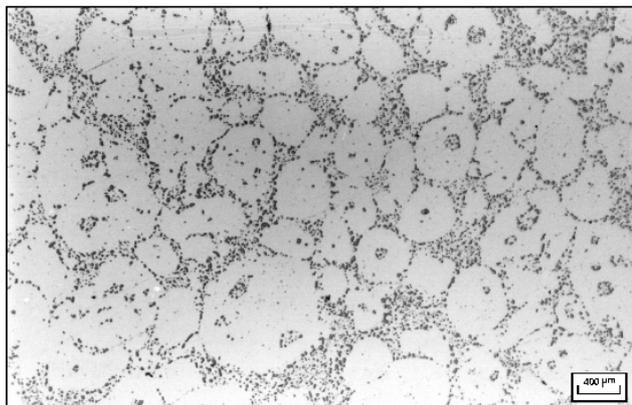


Figura 6.38 Tratamiento de 450 °C durante 24 h

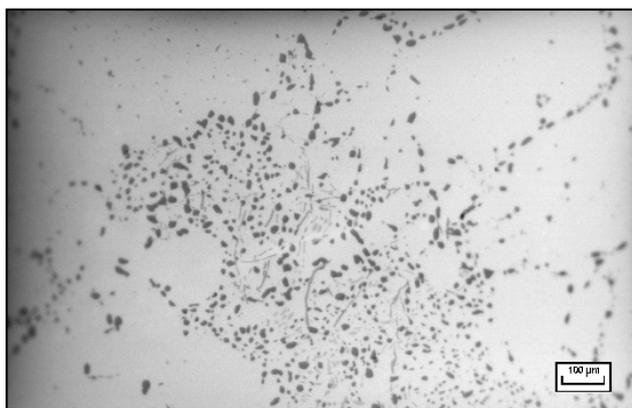


Figura 6.39. Tratamiento de 500° C durante 6 horas.

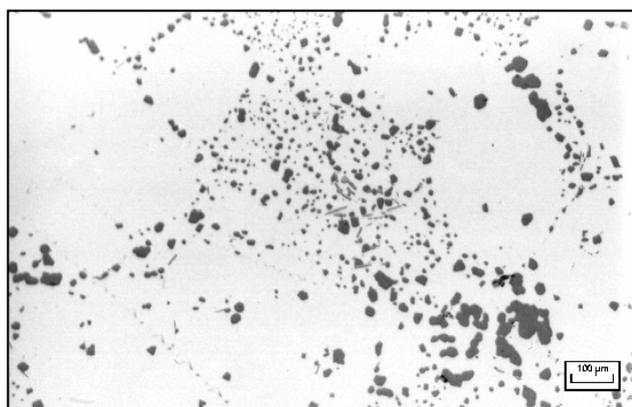


Figura 6.40. Tratamiento de 550° C durante 6 horas.

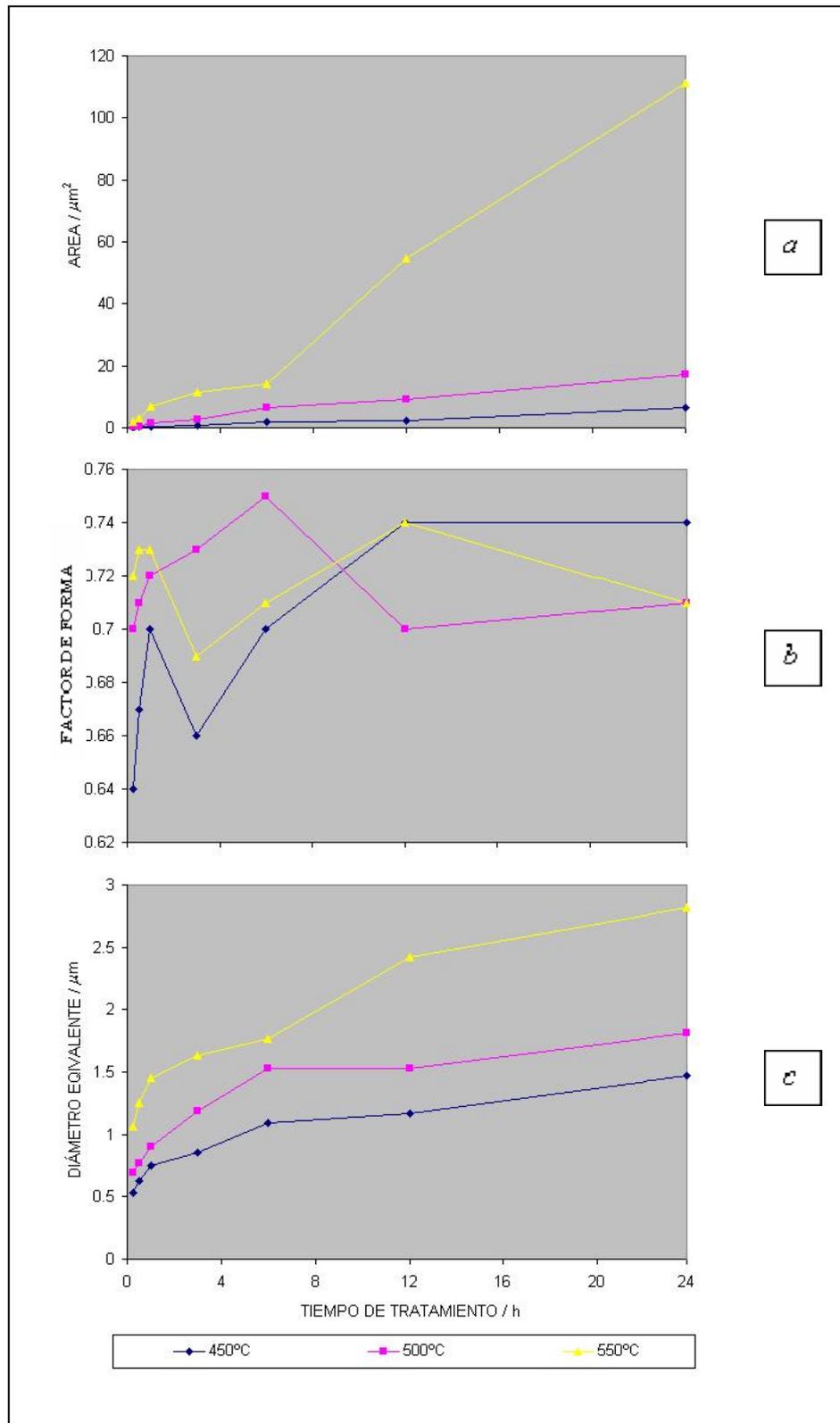


Figura 6.41. Análisis metalográfico cuantitativo del silicio eutéctico.

6.9.2 Cinética de crecimiento del silicio eutéctico

Como en el tratamiento térmico efectuado al lingote (Apartado 5.4), se estudia la cinética de crecimiento del silicio eutéctico.

En la Fig. 6.42 se ha representado la evolución del diámetro del silicio eutéctico en función del tiempo de tratamiento, a las tres temperaturas ensayadas (los datos numéricos se encuentran en el Anexo, Tabla 2.3). Estas gráficas se han ajustado a una función de potencia que se muestra en la Tabla 6.23, con objeto de determinar el valor del exponente n de la Ecuación 3.2, que ha resultado aproximadamente igual a 0,2.

Aplicando la Ecuación 2.4 se ha determinado el exponente m . Para un valor medio de $n = 0,20$ y aplicando logaritmos a la Ecuación 3.2 se determinan gráficamente los valores de k a cada temperatura, que denominaremos k_T , que son el antilogaritmo de la ordenada en el origen. Las gráficas se muestran en la Fig. 6.42, y los valores obtenidos de k_T se muestran en la Tabla 6.23.

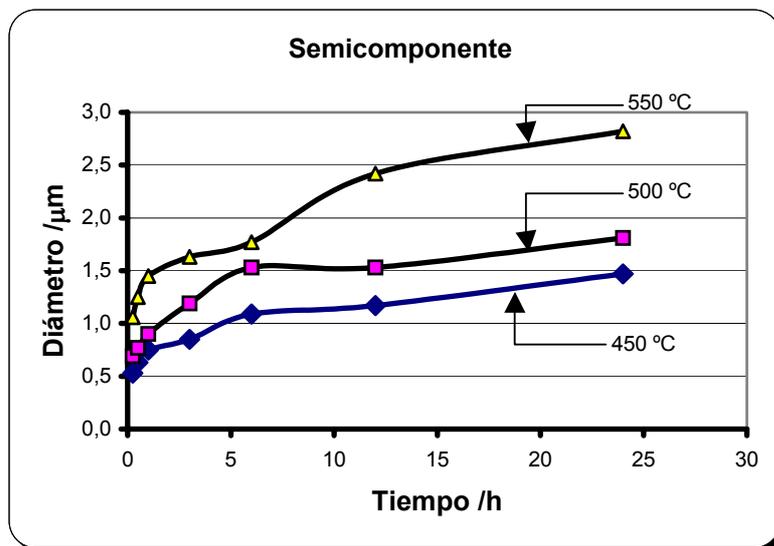


Figura 6.42. Evolución del diámetro equivalente con la temperatura en el componente.

Tabla 6.23. Función de potencia para cada temperatura.

Temperatura	Función	m	k_T
450	$D = 0,720t^{0,21}$	4.7	0.721
500	$D = 0,924t^{0,22}$	4.5	0.935
550	$D = 1.394t^{0,20}$	5.0	1.347

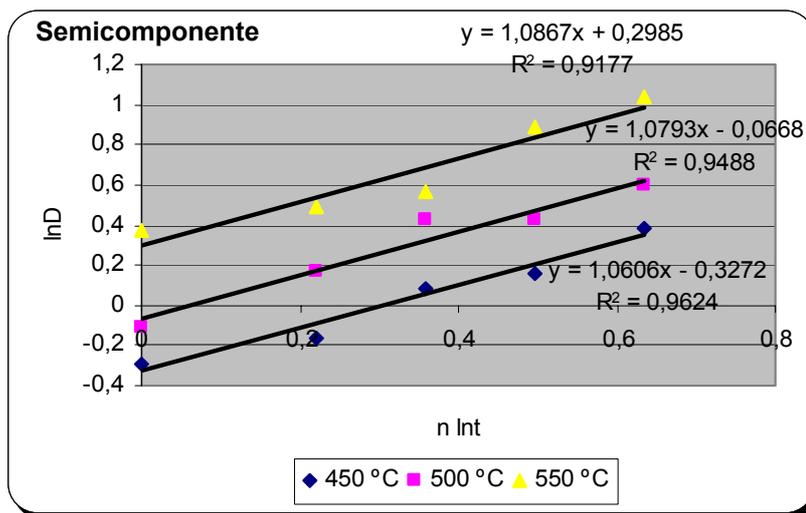


Figura 6.43. Gráfica que representa el diámetro en función de la temperatura, con las rectas de regresión.

Representando los valores de k_T en función de $1/T$ se obtienen las gráficas de la Fig. 6.44, y aplicando la Ecuación. 3.3 obtenemos los valores de k y de Q/R . Estos valores se muestran en la Tabla 6.24 y son coincidentes con los obtenidos en el lingote (Tabla. 5.4).

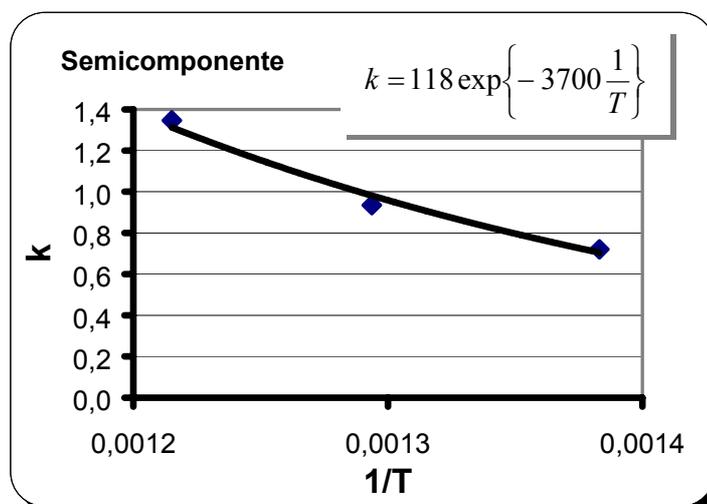


Figura 6.44. Gráfica que representa k en función de la temperatura, con las rectas de regresión.

Tabla 6.24. Energía de activación.

	K_0	Q/R	Q/ kJ/mol
semicomponente	118	3700	31

6.9.3 Efecto del tratamiento térmico en la dureza

Se ha ensayado la dureza Brinell de las distintas muestras tratadas, según la norma UNE 7-257-72, y siguiendo la metodología indicada en el Apartado 4.2.4, obteniéndose los resultados que aparecen en la Fig. 6.45. Los datos numéricos se encuentran en el Anexo, Tabla 2.4.

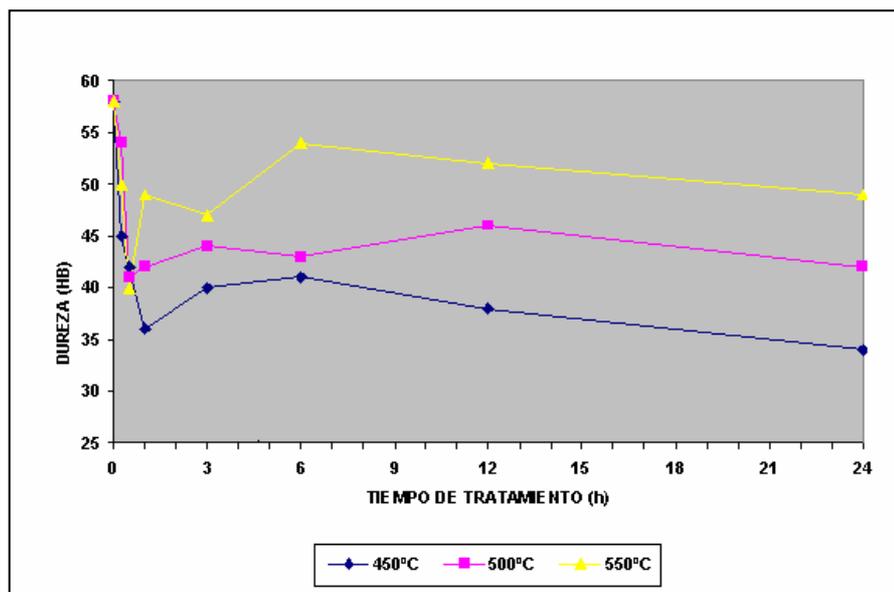


Figura 6.45. Dureza Brinell del semicomponente tratado a diferentes temperaturas

La dureza del semicomponente sin tratar es de 58 HB. Se puede observar que la dureza disminuye con todos los tratamientos, pero lo hace más rápidamente con el tratamiento a menor temperatura (450 °C), seguramente porque a esta temperatura apenas hay redisolución de los intermetálicos de magnesio que contribuyen a aumentar la dureza en solución sólida. De todas formas, el crecimiento del silicio

eutéctico tiene un mayor efecto negativo sobre la dureza tal y como se aprecia en las gráficas. Este efecto es mayor a tiempos pequeños o sea que puede suponerse que el silicio crece más rápido que lo que tarda en redisolverse el magnesio.

6.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS T5 Y T6

6.10.1 Caracterización de los semicomponentes

Se han caracterizado semicomponentes de aleación A357 y A356, obtenidos en las condiciones óptimas que se dedujeron al aplicar el análisis de varianza (Apartado 6.8.3) y que se muestran en la Tabla 6.25. A continuación fueron sometidos a los tratamientos térmicos T5 y T6 descritos en la Tabla 6.26.

El análisis visual puso de manifiesto que las muestras con T6 habían quedado peor conformadas que las T5.

Tabla 6.25. Condiciones de conformación.

Prensa	Buhler SC 630 Tm
Horno de calentamiento	Inducción 1000 Hz
Lingote	Ø=76 mm y L=165 mm
Peso bruto inyectado	1550 g
Peso neto	960 g
Temperatura molde	210 °C
Temperatura lingote	575°C
Presión final	1000 bar
Curva de inyección	D3
Energía	420 Wh
Lubricante molde	ISOLAT 2,5% en agua

Tabla 6.26. Tratamientos térmicos industriales.

Aleación	Tiempo y temperatura del tratamiento		Nº de muestras estudiadas
A356	T6	5 h a 540 °C 6 h a 160 °C	2
A357	T5	6 h a 170 °C	2
A357	T6	5 h a 540 °C 6 h a 170 °C	2

A continuación se pueden observar un conjunto de fotografías (Fig. 6.46 a 6.49) de las muestras con tratamiento T6; estas muestras fueron sometidas a ensayo de líquidos penetrantes que permitieron observar una serie de defectos, tales como burbujas y fisuras, marcados en color verde en las fotos. También fueron sometidas a rayos X y los defectos detectados se encuentran marcados en color rojo.



Figura 6.46. Semicomponente A357 T6.



Figura 6.47. Semicomponente A357 T6.



Figura 6.48. Ampollas en un semicomponente A356 T6.

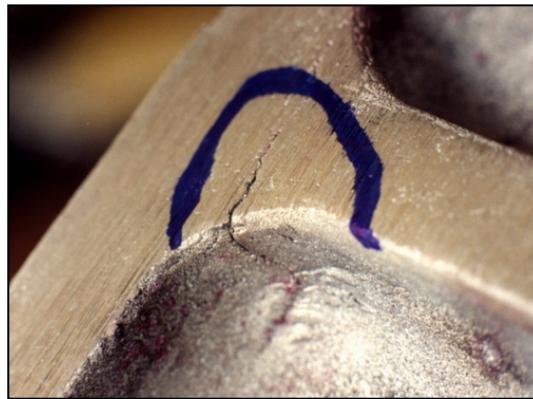


Figura 6.49. Fisura en un semicomponente A357 T6.

El análisis metalográfico de la cara C (ver Figs. 6.5 a 6.60) mediante microscopía óptica y electrónica puso de manifiesto que había presencia de defectos internos tanto en las piezas con T5 como con T6.

A357 T6: Una parte del microconstituyente eutéctico, permanece en forma de esferas dentro de la fase primaria α . El resultado del análisis indica que ya no hay esferas ocluidas como en las piezas sin tratar o en el lingote recalentado. Aquí todo el microconstituyente eutéctico tiene un tamaño similar, tanto el ocluido como el que rodea los granos de α , (Figs. 6.50 y 6.51) y se ha redondeado. El largo tratamiento de puesta en solución ha esferoidizado el silicio. Hay fisuras y sopladuras alrededor de las dendritas (Figs. 6.52 a 6.54). En la Fig. 6.52, la fisura parece haberse originado en un poro. Se puede observar algún intermetálico (Figs. 6.53 y 6.55). Se han redissuelto los compuestos de magnesio y han disminuido de tamaño los de hierro.

Semicomponentes conformados en estado semisólido

A356 T6: El eutéctico ha evolucionado, apareciendo en los límites de grano cristales de silicio redondeados y de mayor tamaño que en los semicomponentes sin tratar, (Fig. 6.56). Se han redissuelto los compuestos de magnesio, y han disminuido de tamaño los de hierro.

Aparecen grietas alrededor de la fase α como si se tratara de una “tela de araña” (Fig. 6.57); también hay poros (Fig.6.58).

A357 T5: Su aspecto exterior es mejor que en los que se realizó el T6: no se detectan burbujas ni fisuras. El silicio eutéctico que rodea la fase α es un poco más grande que en los componentes sin tratar, pero menor que en las muestras con T6. También hay eutéctico fino dentro de la fase primaria α . Se distinguen los glóbulos de fase α , lo cual no ocurre en las muestras con T6 (Fig. 6.59). Existen intermetálicos de AlFeSi de menor tamaño que en las muestras sin tratar y silicio primario (Fig.6.60).

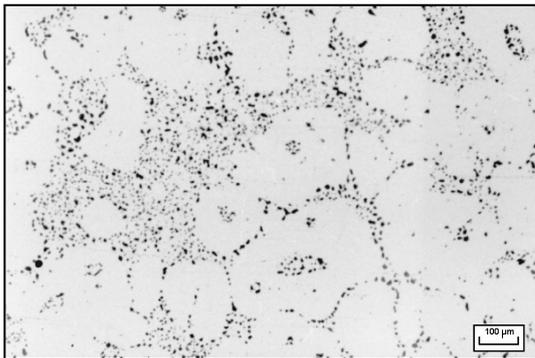


Figura 6.50. Microestructura A357 T6 con el silicio globulizado.

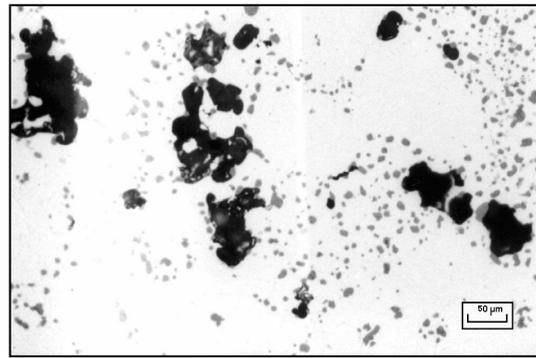


Figura 6.51. Microestructura A357 T6 donde se detecta porosidad.

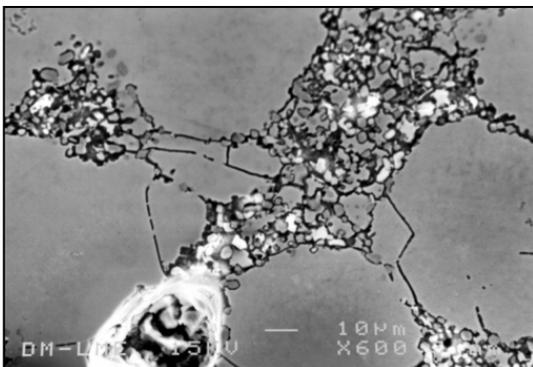


Figura 6.52. Microestructura A357 T6 donde se aprecia una grieta iniciada en un poro.

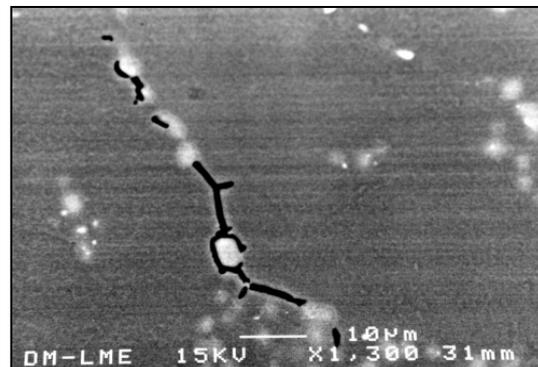


Figura 6.53. Microestructura A357 T6 donde se aprecia una grieta.