

UNIVERSIDAD DE BARCELONA

FACULTAD DE ODONTOLOGÍA

DEPARTAMENTO “UNIDAD DEPARTEMENTAL DE
ODONTOESTOMATOLOGÍA”

Programa “Técnicas clínicas en Odontología”
Bienio 1995-1997

“EFECTO DE LAS VARIACIONES TÉRMICAS DURANTE LA FUSIÓN DE LOS
COLADOS EN PRÓTESIS FIJA”

Trabajo para optar al título de doctor en Odontología.

Presentado por Josep Bizar i Ramoneda.

Dirigida por los doctores Maria Peraire Ardèvol y Josep Maria Anglada Cantarell.

Tutor del programa de doctorado: Dr. Juan Ramón Boj Quesada.

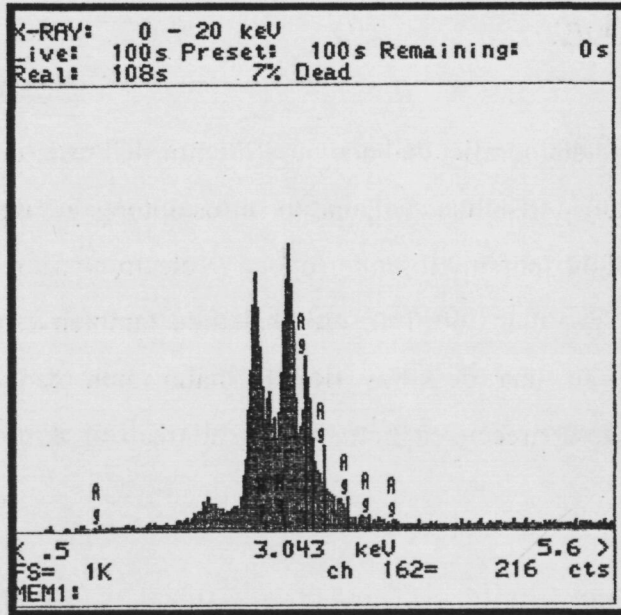


Figura 41: Presencia de Ag en un precipitado hallado en Cerapall 6.

El mayor tamaño de grano del Pontor 4CF puede ser observado en la figura 42, donde también se observa su estructura equiaxial.

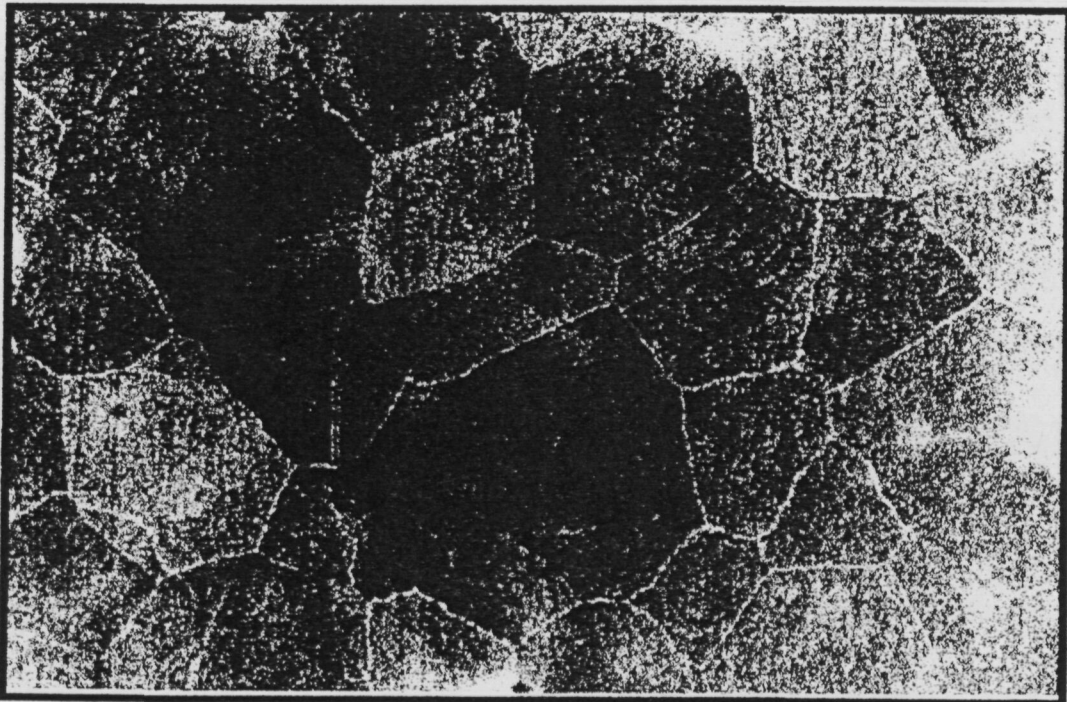


Figura 42: Microestructura del Pontor 4 CF (1060 °C) (MOx500)

10.3 Discusión:

La estructura metalográfica hallada en el Pontor 4CF está en concordancia con las diferentes estructuras cristalinas hallada por otros autores en aleaciones de base de oro. Así Bessing estudió por microscopía óptica y electrónica las aleaciones de oro Midas (47% de oro) y Rajah (60% de oro) hallando también estructuras de granos equiaxiales, aunque en una de ellas (Rajah) halla gran cantidad de partículas intercristalinas que desaparecen en gran medida al realizar el tratamiento térmico. **(Bessing C. 1986)**

La estructura que describimos para el Cerapall 6 es la misma que Bessing halla al estudiar aleaciones de Paladio de composición similar a la nuestra (Alba V). Así mismo halla precipitados en la zona de los límites de grano, aunque en su caso son demasiado pequeñas para hacer un estudio de su composición mediante difracción de rayos-X, aunque detecta la presencia de iridio. **(Bessing C. 1986)** La estructura en granos equiaxiales también es observado por Brantley, así como la existencia de unos precipitados, los cuales también resultaron ser ricos en rutenio. **(Brantley W.A. 1995)**

Nosotros creemos que las partículas de rutenio que hemos detectado en los límites de grano podrían ser limitadores de crecimiento destinados a que el tamaño de grano final que se obtiene no sea demasiado grande.

Por lo referente a las aleaciones de cromo-níquel las estructuras dendríticas que hemos observado, también han sido halladas por otros autores en estas mismas aleaciones. **(Mülders C. 1996)**

**11. EXPERIMENTO 2:
TAMAÑO Y
CRECIMIENTO DE GRANO.**

11. EXPERIMENTO 2: TAMAÑO Y CRECIMIENTO DE GRANO.

11.1. Introducción:

El crecimiento de grano es un proceso encaminado a eliminar la energía superficial en los límites de grano. Este proceso implica una mayor estabilidad química ya que la energía total almacenada en el material se reduce. Si la estructura de los límites de grano es uniforme y la energía de los límites, γ_b , es isotrópica, entonces tiene que ver con la reducción del área de límite de grano.

El proceso se activa mediante la adición de calor al material.

Para un material monofásico el crecimiento de grano sigue la ecuación de tipo Arrhenius (Beck P.A. 1988) a temperatura constante.

$$D - D_0 = K \cdot t^n \quad (1)$$

donde D es el diámetro de grano en el tiempo t , D_0 es el diámetro de grano inicial, K es una constante y n es el exponente del crecimiento de grano, y indica la “velocidad” a la que crecen los granos.

Si la difusión atómica a través del límite de grano es un proceso de activación simple, es decir átomo a átomo, entonces se puede demostrar (Burke J.E. 1952), asumiendo que la migración es proporcional al inverso de la curvatura del grano, que la constante K en la ecuación (1) puede ser sustituido por;

$$K = K_0 \cdot e^{(-Q/R \cdot T)} \quad (2)$$

donde Q es la energía de activación para el proceso, T es la temperatura absoluta, R es la constante universal de los gases y K_0 , propia de cada material, es una constante que incluye la energía específica del límite de grano. Combinando las ecuaciones (1) y (2) entonces el tamaño granular puede ser escrito en términos de tiempo y temperatura a la vez;

$$D - D_0 = K_0 \cdot \exp(-Q/R \cdot T) \cdot t^n \quad (3)$$

El valor máximo de n es 0.5. Pero este valor sólo se encuentra en los metales de elevada pureza y a altas temperaturas. La mayoría de estudios encuentran valores inferiores a 0.5.

11.2. Material y método:

Los parámetros de tamaño de grano, diámetro y área, se obtuvieron usando un microscopio óptico (Leica Reichert MEF4M) conectado a un PC con un programa de análisis de imagen. (Buehler Omnimet 3).

Para determinar la influencia de la temperatura de colado en el tamaño del grano, una muestra de cada grupo fue pulida y atacada químicamente. (ver capítulo 10. Material y Método).

Para el estudio del crecimiento del tamaño de grano, 16 muestras de Pontor coladas a 1160 °C, 16 de Cerapall 6 coladas a 1260 °C y 16 de Nibon coladas a 1480 °C fueron sometidos a diferentes tratamientos térmicos de 700, 800 y 900 °C y 5, 10, 20, 30, 120 minutos para cada temperatura en un horno de resistencia Herón, y una vez sacadas del horno se enfriaron en agua a 20° C para frenar el crecimiento. Una de las muestras de cada aleación fue usada como referencia.

11.3. Resultados

11.3.1. Tamaño de grano y temperatura de colado:

La tabla 7 verifica el hecho que a mayor temperatura de colado, mayor será el tiempo de solidificación y por eso el grano tendrá más tiempo para crecer, resultando un tamaño de grano final mayor (figuras 25 a 35 y 42). Los cálculos numéricos en Nibon, al ser tan difícil de atacar, están sujetos a posibles errores.

Tabla 7: Tamaño de grano según temperatura de colado.

Aléacion	Temperatura de colado (°C)	Díametro de grano (µm)
Pontor 4CF	1000	36
	1060	44
	1160	48
Nibon	1300	52
	1420	68
	1480	102
	1580	126
Cerapall 6	1260	9
	1320	10
	1420	15

En los tres grupos aplicamos el test de Kolmogrov-Smirnov para variables cuantitativas resultando ser muestras de distribución normal. Aplicando la recta de regresión hallamos los siguientes resultados:

Para el Pontor 4CF la r^2 fue de 0.89 para una $p < 0.05$.

Para Cerapall 6 la R^2 fue de _____ para una $p < 0.05$.

Para Nibon la R^2 fue de _____ para una $p < 0.05$.

11.3.2. Crecimiento de grano y tratamiento térmico:

11.3.2.1. Area y diámetro:

Los parámetros medidos (área y diámetro) en relación al tratamiento térmico, respecto a la temperatura y al tiempo de exposición para cada temperatura se muestran en la figura 43 y 44 para el Cerapall 6 y en las figuras 45 y 46 para el Pontor 4CF. Este estudio no se pudo realizar con el Nibon ya que al ser tan difícil de atacar, el estudio de crecimiento de grano habría resultado erróneo. En las figuras 47 a 50 podemos ver imágenes de los materiales sometidos a este tratamiento.

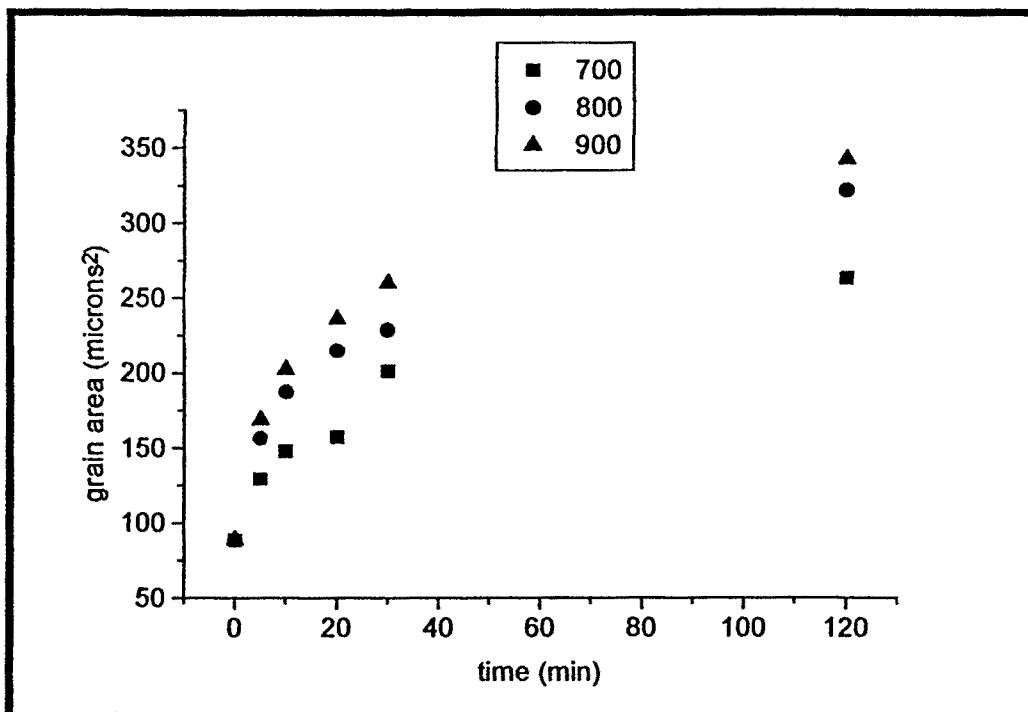


Figura 43: Crecimiento del área de grano en relación con en tratamiento térmico a cada temperatura testada para el Cerapall 6 colado a 1260 °C.

Experimento 2: Crecimiento de grano.

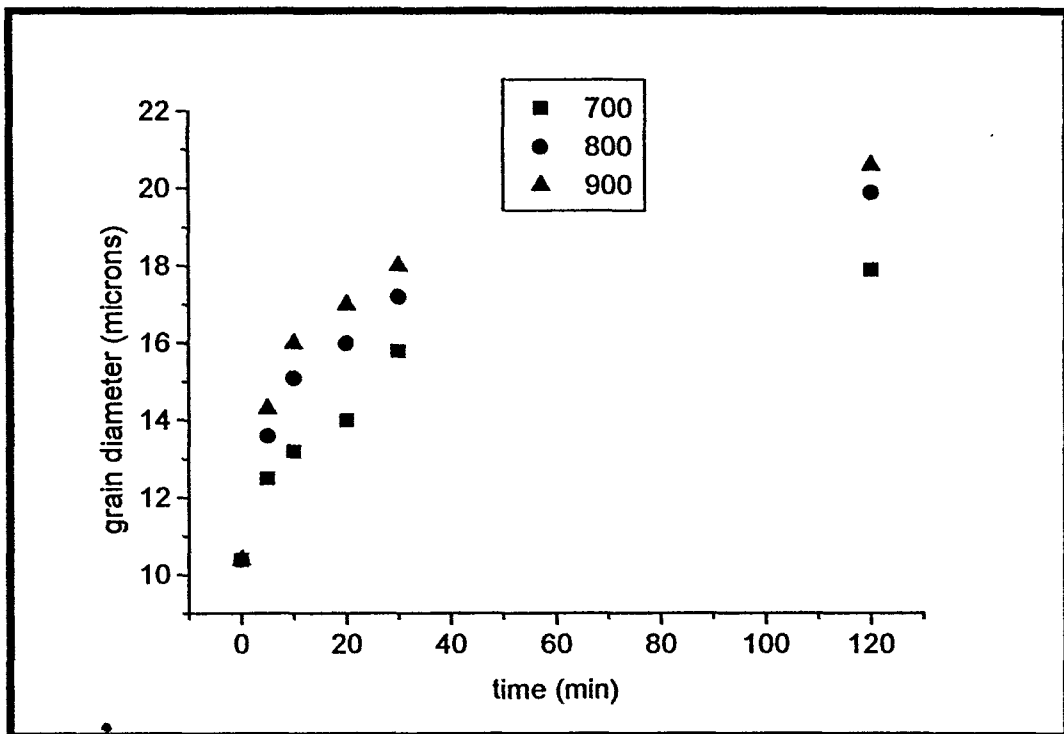


Figura 44: Crecimiento del diámetro de grano en relación con el tratamiento térmico y a cada temperatura testada para el Cerapall 6 colado a 1260 °C.

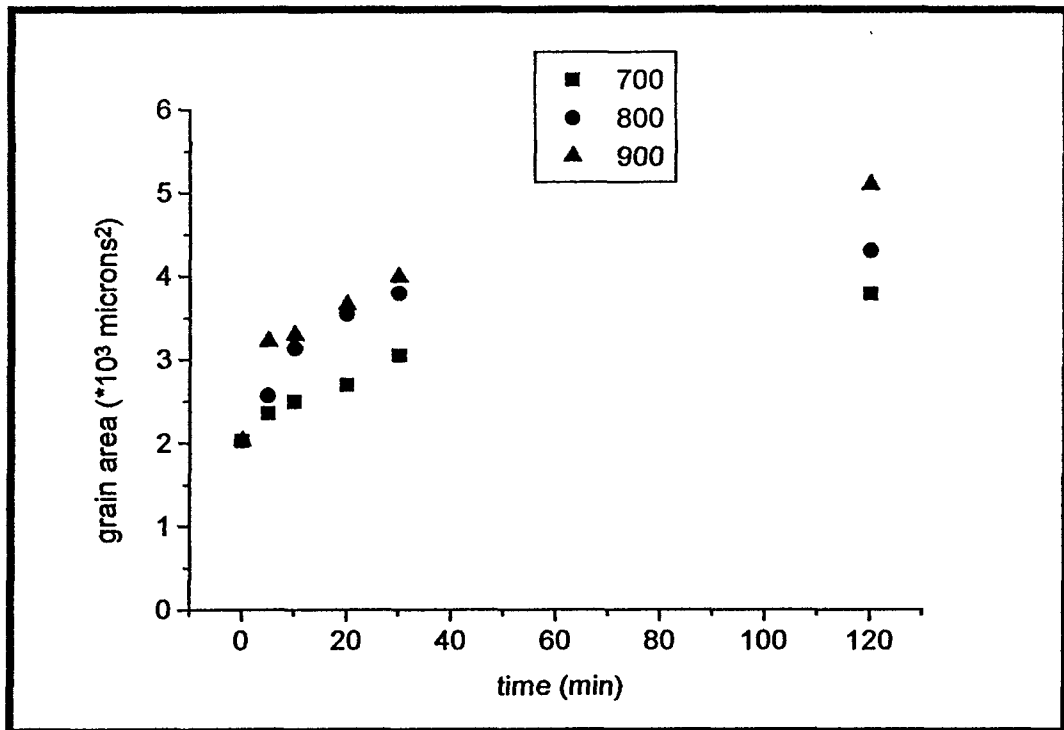


Figura 45: Crecimiento del área de grano en relación con en tratamiento térmico a cada temperatura testada para el Pontor 4CF colado a 1160 °C

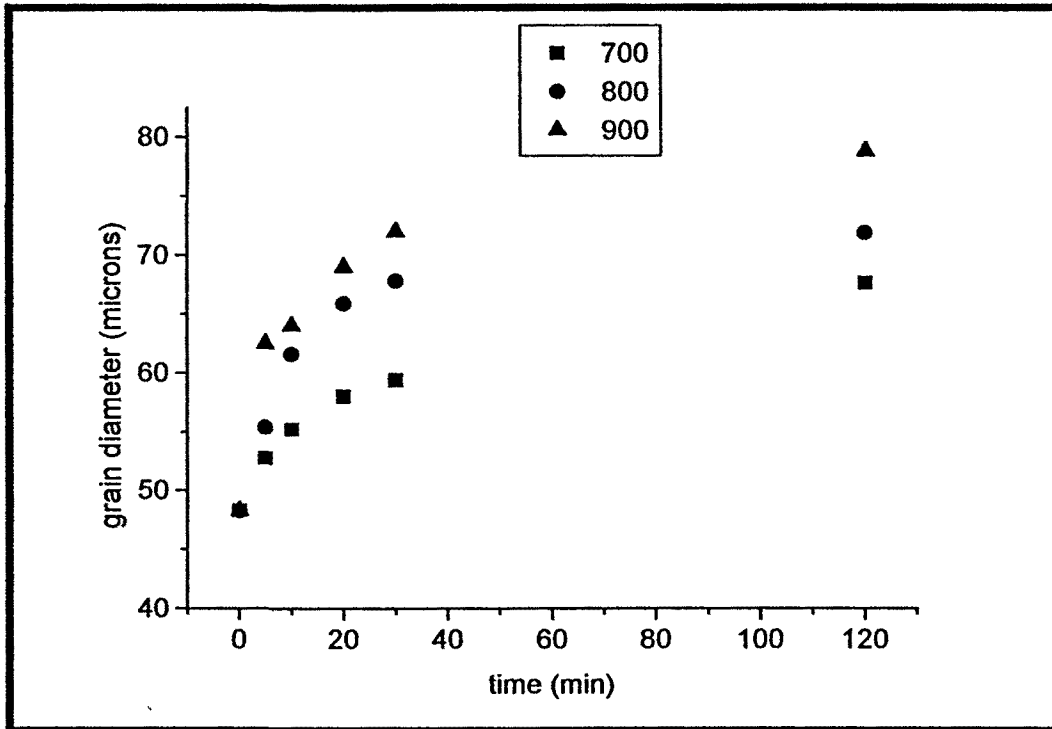


Figura 46: Crecimiento del diámetro de grano en relación con el tratamiento térmico y a cada temperatura testada para el Pontor 4CF colado a 1160 °C

Como predecía la ecuación (3), el crecimiento de grano aumenta con la temperatura y para una temperatura dada el tamaño de grano aumenta con el tiempo. Desde la figura 43 a la 46 se puede concluir que la cinética de crecimiento de grano es muy rápida al principio hasta los 20 minutos. Después de este tiempo hay un considerable enlentecimiento en la velocidad de crecimiento.

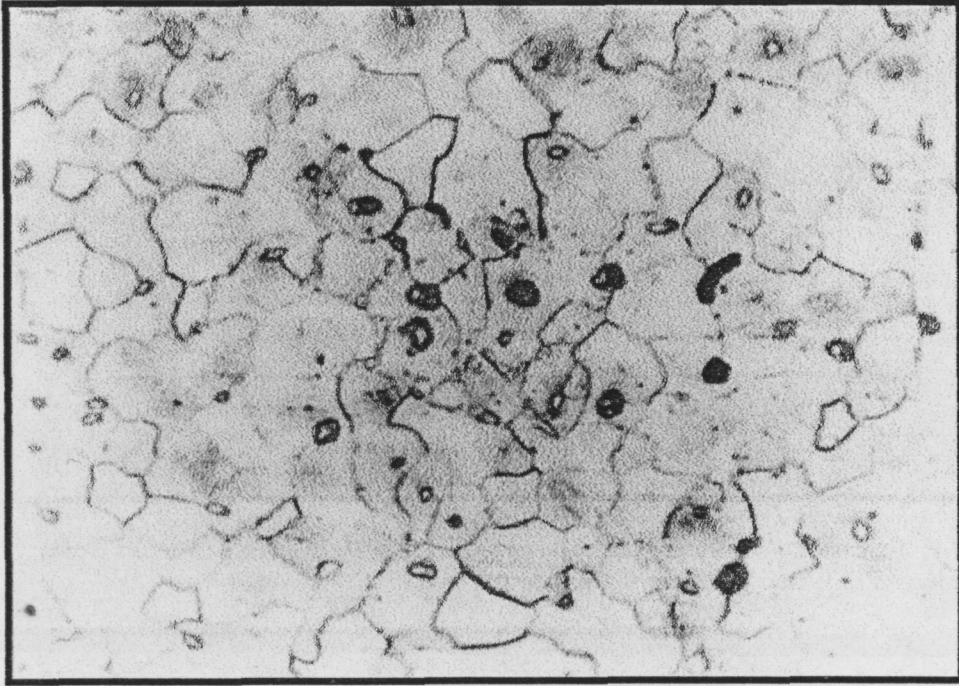


Figura 47: Microestructura del Cerapall 6 (1260 °C) con tratamiento térmico a 900 °C durante 10 minutos (MOx500)

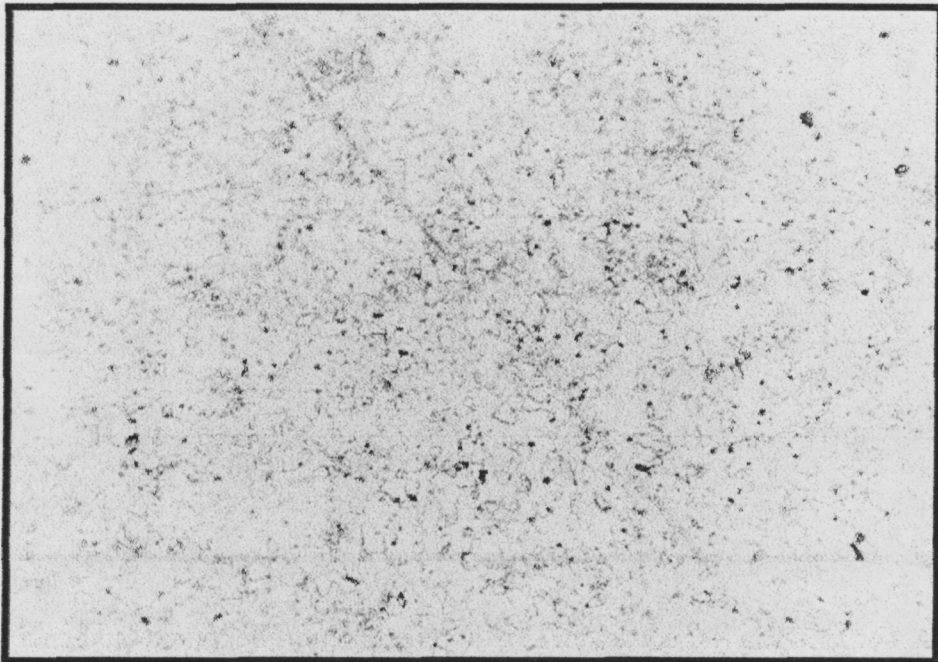


Figura 48: Microestructura del Cerapall 6 (1260 °C) con tratamiento térmico a 900 °C durante 20 minutos (MOx200)

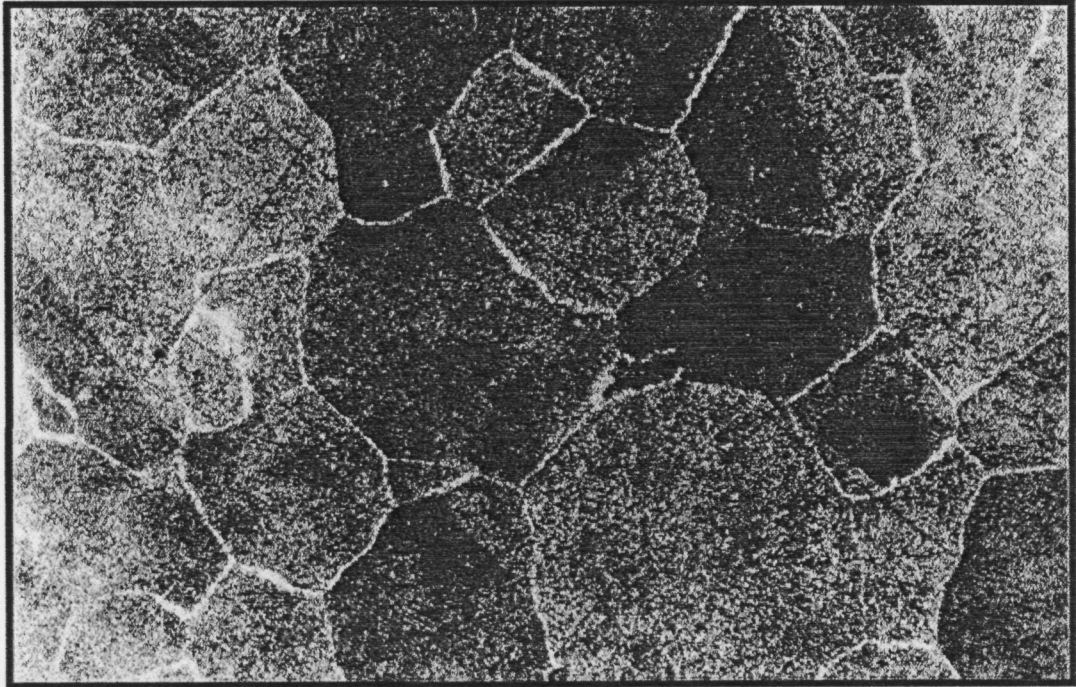


Figura 49: microestructura del Pontor 4CF (1160 °C) con tratamiento térmico a 800 °C durante 30 minutos (MOx500)

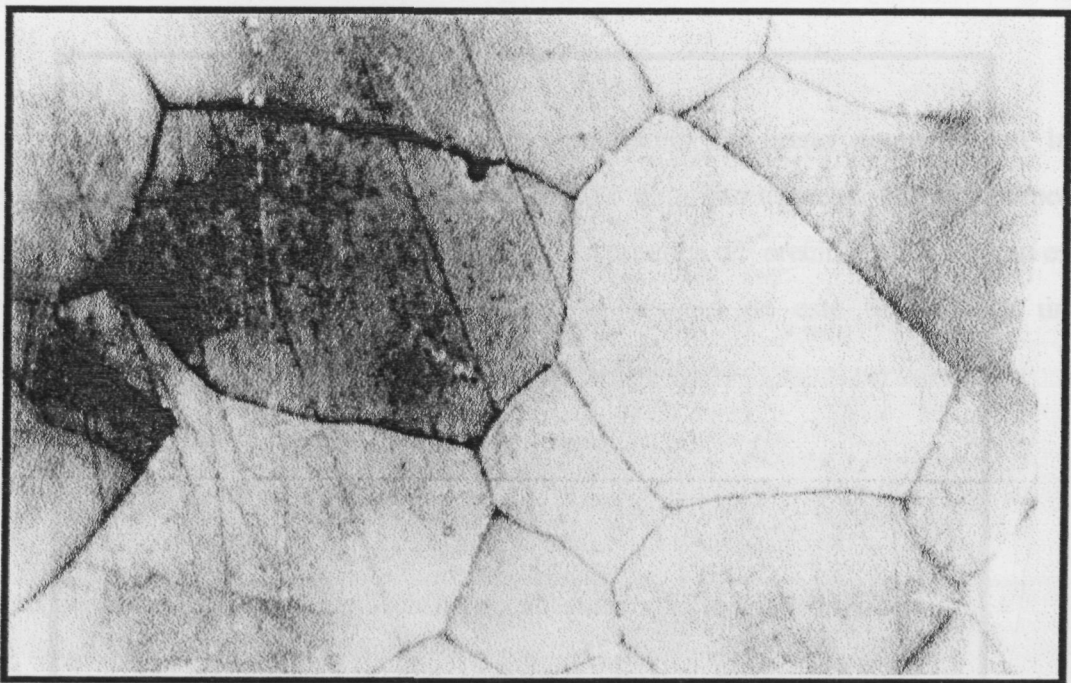


Figura 50: Microestructura del Pontor 4CF (1160 °C) con tratamiento térmico a 900 °C durante 120 minutos (MOx750)

11.3.2.2. Exponente de orden de crecimiento:

Como el diámetro medio es 1.8 veces menor al diámetro máximo, la cinética de crecimiento sigue la distribución de Hillert (Hillert M. 1965). Por eso se asume que el crecimiento de grano toma lugar de una forma uniforme en la totalidad de la muestra y que la distribución de los tamaños de grano sigue una ley asintótica típica de estados en equilibrio. Este comportamiento cinético sigue la ecuación (1). Tomando logaritmos, se obtiene una ecuación lineal ($\log D-D_0 = \log K + n \log t$) de la cual se han obtenido coeficientes de correlación, r , que han resultado ser superiores a 0.98, lo que indica un ajuste casi perfecto del crecimiento de grano. La pendiente de estas rectas es el exponente del orden de crecimiento “ n ”. Los valores obtenidos de n para Cerapall 6 y Pontor 4GF se muestran en la tabla 8.

Pontor 4CF	Diámetro	700	$\log(d-d_0) = -0.45 + 0.45 \log t$	0.98	0.45
	d (μm)	800	$\log(d-d_0) = 0.33 + 0.28 \log t$	0.99	0.28
		900	$\log(d-d_0) = 0.50 + 0.26 \log t$	0.98	0.26
		Área	700	$\log(d-d_0) = 1.17 + 0.55 \log t$	0.98
	A (μm) ²	800	$\log(d-d_0) = 1.81 + 0.28 \log t$	1.00	0.28
		900	$\log(d-d_0) = 2.33 + 0.26 \log t$	0.98	0.26
Cerapall 6		Diámetro	700	$\log(d-d_0) = -0.66 + 0.41 \log t$	0.98
	d (μm)	800	$\log(d-d_0) = -0.26 + 0.33 \log t$	0.99	0.33
		900	$\log(d-d_0) = -0.08 + 0.29 \log t$	0.98	0.29
Área		700	$\log(d-d_0) = 0.44 + 0.45 \log t$	0.98	0.45
	A (μm) ²	800	$\log(d-d_0) = 0.92 + 0.38 \log t$	1.00	0.38
		900	$\log(d-d_0) = 1.07 + 0.35 \log t$	0.98	0.35

(+) r es el coeficiente de correlación (*) n es el orden de crecimiento

Tabla 8 Variación del exponente de orden de crecimiento

El valor medio para el exponente de orden de crecimiento de grano, n , es de 0.35 para el Pontor 4CF y 0.37 para el Cerapall 6 (con una $r \geq 0.98$) el cual es menor que el valor predicho de 0.5.

Experimento 2: Crecimiento de grano.

Examinando los valores de n en la tabla 8 puede verse que n decrece con el incremento de temperatura.

11.3.2.3. Energía de activación:

Usando la ecuación (2) se han evaluado las energías de activación para el crecimiento de grano. (Tabla 9) Los resultados se han conseguido obteniendo el logaritmo de la ecuación (2) y luego haciendo unas tablas de $\ln K$ contra $1/T$ y aplicando una recta de regresión.

$$K = K_0 \cdot \exp(-Q/R \cdot T) \rightarrow \ln(K) = \ln(K_0) - Q/R \cdot T \quad (4)$$

		$\ln(K)$	$1/T$ (K ⁻¹)	Energía (kJ/mol)
Pontor 4CF	Área	18.39	127	1.00
	Diámetro	12.17	105	0.96
Cerapall 6	Área	9.78	70	0.94
	Diámetro	6.51	65	0.99

Tabla 9. Energía de activación, Q , para el Pontor 4CF y Cerapall 6

La energía de activación para el Pontor 4CF está entre 105 KJ/mol para el diámetro y de 127 KJ/mol para el área, y para el Cerapall 6 entre 65 KJ/mol para el diámetro y 70 KJ/mol para el área. El hecho de que los valores área/diámetro sean muy similares muestra que el crecimiento de grano puede ser ajustado por una simple ley de activación, como la de Burke y Turnbull. (Burke J.E. 1952)

11.3.2.4. Ratio del área del límite de grano:

El ratio del área del límite de grano por unidad de volumen, G_v , fue determinado para cada temperatura y el tiempo de tratamiento térmico. Asumiendo que los granos tienen una configuración ideal en tetrakaidecahedron (forma ideal de grano en un metal, donde todas las aristas tienen 120° , dado que es la forma menos energética de todas), entonces el valor de G_v , puede ser determinado por una sección tomada al azar, A , donde (Underwood R.L. 1994)

$$G_v = 3,059/\sqrt{A} \tag{5}$$

G_v en función del tiempo se muestra en la figura 51 para el Pontor 4CFy en la figura 52 para el Cerapall 6. El decrecimiento de G_v significa que la energía de límite de grano decrece y que el sistema tendrá más estabilidad termodinámica. Esta disminución es mayor para tiempos hasta 30 minutos, para después seguir una ley asintótica.

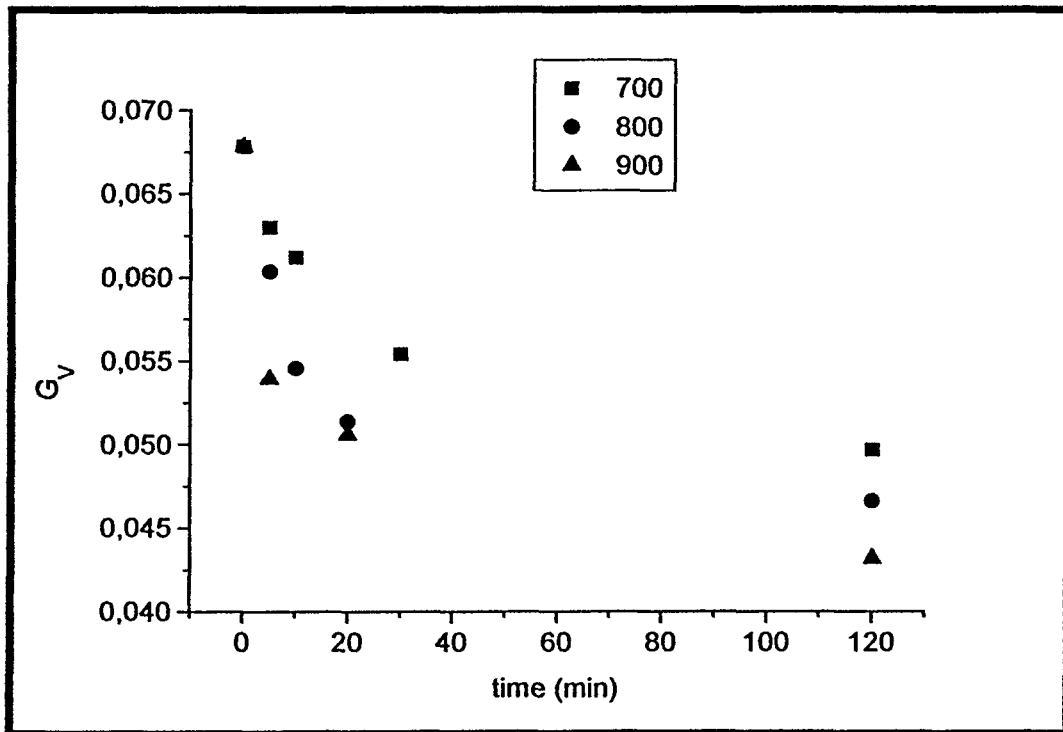


Figura 51: El ratio del área de límite de grano por unidad de volumen, G_v , respecto al tiempo de tratamiento térmico a cada temperatura testada para el Pontor 4CF.

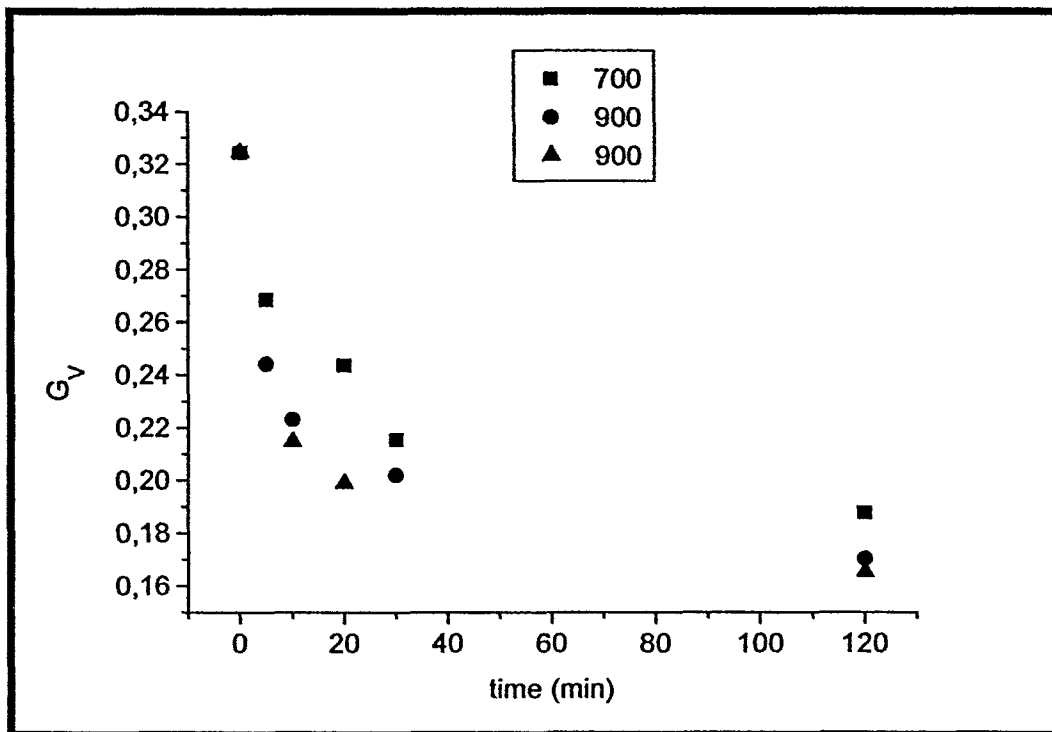


Figura 52: El ratio del área de límite de grano por unidad de volumen, G_v , respecto al tiempo de tratamiento térmico a cada temperatura testada para el Cerapall 6.

11.4. Discusión:

El tamaño de grano observado para Pontor 4CF a la temperatura de colado recomendada por el fabricante es igual a la hallada por Bessing para aleaciones de oro de composición similar (Midas y Rajah), no así para las aleaciones de paladio (Alba V) que presenta un tamaño de grano mucho mayor, al igual que los hallados por Brantley. (Brantley W.A. 1995, Bessing C. 1986) Los valores de tamaño de gran hallados por Bessing después del tratamiento térmico no son comparables a los que nosotros hallamos dado que los somete una hora a 100 grados por debajo de la temperatura de solidus. (Bessing C. 1986)

El descenso en la velocidad del crecimiento de grano una vez superados los primeros 20 minutos puede ser explicado del siguiente modo: cuando el grano crece, el porcentaje de área de límite de grano por unidad de volumen decrece. Este decrecimiento implica una reducción de la energía total de límite de grano y como esta

es la fuerza que guía el, la cinética de crecimiento se enlentece. Llega un momento en el que el tamaño del grano no aumenta más porque es estable y aunque aportemos más temperatura el grano no crece. Estos resultados se ajustan perfectamente al comportamiento teórico que deberían seguir las aleaciones.

El valor medio para el exponente de crecimiento de grano, n , es de 0.35 para el Pontor 4CF y 0.37 para el Cerapall 6 (con una $r \geq 0.98$) el cual es menor que el valor predicho de 0.5. Pero como se menciona antes este valor teóricamente predicho por Burke y Turnbull (**Burke J.E. 1952**) sólo se encuentra en metales de alta pureza y a altas temperaturas. Ti-6Al-4V tiene un grado de crecimiento de 0.56 (**Gil F.J. 1991**). El aluminio (con una pureza del 99.99%) tiene 0.1 a 400 °C, que aumenta a 0.3 a 600 °C (**Fullman R.L. 1952**). Para aleaciones cúbicas a cuerpo centrado con una estructura más abierta aumenta la difusión atómica, encontrándose valores mayores. (**Fisher J.C. 1952**)

Que n disminuya tiene que ser el objetivo de un estudio más detallado, pero parece que puede ser debido a efectos de residuos de soluto (El impedimento de Zenner: debido a la presencia de fases secundarias o otras partículas) como en Ti-6Al 4V o Ti-0.2Pd. (**Gil F.J. 1991**)

Las energías de activación son levemente menores comparándolas con otras aleaciones. Por ejemplo, Cu en Al tiene una Q de 171 KJ/mol (**Guilemany J.M. 1991**). El resultado de una energía de activación tan baja implica que la difusión a través de los límites de grano en esas dos aleaciones ocurre más fácilmente.

**12. EXPERIMENTO 3:
DUREZA.**

12. EXPERIMENTO 3: DUREZA.

12.1. Material y método:

La dureza fue medida en todas las muestras, tanto para evaluar la dureza en relación a la temperatura de colado, como en relación al tiempo de tratamiento térmico para cada temperatura de tratamiento.

Se usaron dos cargas diferentes. Para Nibon y Cerapall 6 se usó la carga de 0.5 Kp, pero para el Pontor 4CF tuvimos que usar la carga de 10 Kp ya que su tamaño de grano era tan grande que la indentación realizada con 0.5 Kp no cruzaba más de un límite de grano, lo que daba valores irrelevantes. La carga de 10 Kp sobrepasaba diversos granos. Ver figura 53, mostrando la marca de una indentación de 0.5 Kp y la figura 54 mostrando la marca de una indentación de 10 Kp, ambas en Pontor 4CF.

Para la medición de la dureza donde la carga fue de 0.5 Kp usamos una micro-durómetro (Akashi MVK-H0) y para las cargas de 10 Kp se usó un durómetro convencional. Se hicieron cinco indentaciones en cada muestra. Las dos diagonales (d_x , d_y) de la indentación se midieron, y la mayor, d , se calculó y se transformó en dureza Vickers usando la ecuación que hemos visto en el apartado dedicada a la dureza en el capítulo 4.2.. La dureza de las muestras se obtuvo cogiendo el mayor de los cinco resultados. Cuando usamos el micro-durómetro, las diagonales pudieron ser medidas directamente con el microscopio con ocular de medida. En el caso del durómetro convencional las diagonales son medidas con un microscopio óptico combinado con un programa de análisis de imagen instalado en un PC.

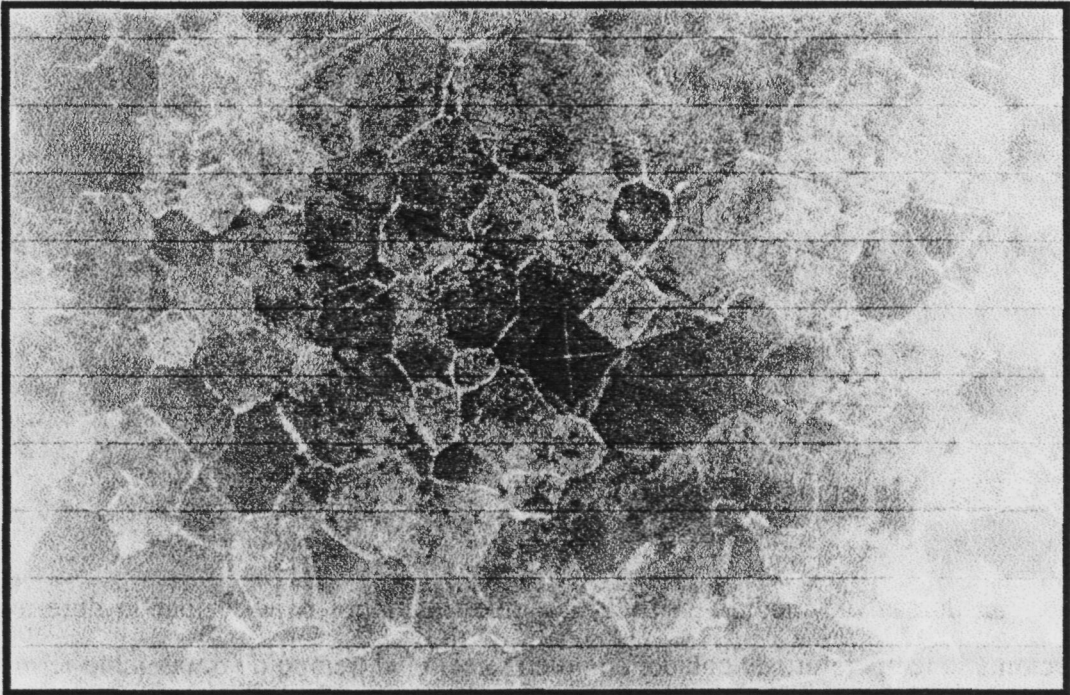


Figura 53: Indentación Vickers de carga 0.5 Kp en Pontor 4CF (1160 °C) con tratamiento térmico a 800 °C durante 120 minutos (MOx200)

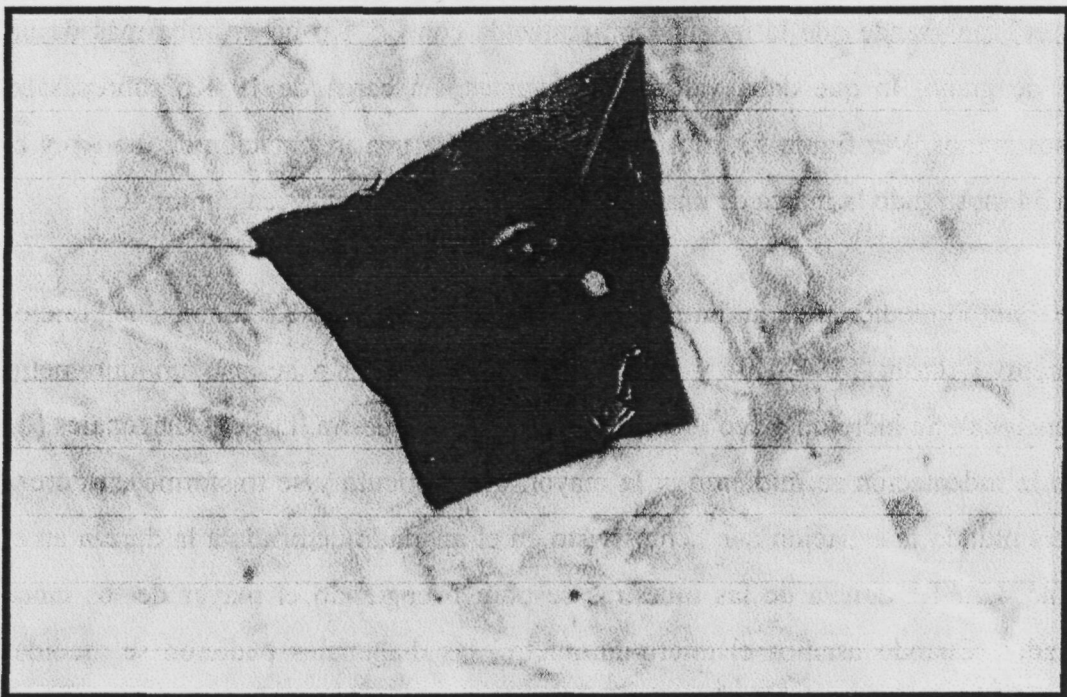


Figura 54: Indentación Vickers de carga 10 Kp en Pontor 4CF (1160 °C) con tratamiento térmico a 900 °C durante 20 minutos (MOx200)

12.2. Resultados

Los resultados de dureza de las muestras respecto la temperatura de colado se puede ver en la tablas 10. Examinando estos resultados se puede concluir que para ninguna de las aleaciones, la temperatura de colado tiene influencia en la dureza.

Aleación	Temp. de colado (°C)	HV _{0.5}	sd ⁺	r ²	HV ₁₀	sd ⁺	r ²
Cerapall 6	1260	244	10	0.57	-	-	-
	1320	242	10		-	-	-
	1420	248	5		-	-	-
Nibon	1300	238	8	0.95	-	-	-
	1420	239	10		-	-	-
	1480	240	12		-	-	-
	1580	242	7		-	-	-
Pontor 4CF	1000	-	-	-	216	4	0.67
	1060	-	-	-	202	9	
	1160	-	-	-	201	9	

Tabla 10: Resultado de la dureza para todas la muestras.

Aunque en Nibon hallemos una r² de 0.95 la pendiente de la recta de regresión es de 0.014 con lo que el aumento de dureza no es de una magnitud que podamos considerar importante.

En la tabla 11 se muestran los resultados de dureza respecto al tamaño de grano en las aleaciones en las que efectuamos la medición después de aplicarles el tratamiento térmico.

Para el Nibon y el Cerapall 6 el tratamiento térmico no tiene efecto sobre la dureza (r² para Cerapall fue de 0.55), ver figuras 55 y 56. Para el Pontor 4CF se puede observar un decrecimiento inicial de la dureza en la figura 57 que resultó ser

Experimento 3: Dureza.

significativo con una r^2 de 0.82. Se puede corroborar que normalmente la dureza decrece al aumentar el tamaño del grano. (Aunque no hicimos la medición del crecimiento de grano en el Nibon, sometimos las muestras al tratamiento térmico igualmente)

Aleación	Diámetro (μm)	HV _{0.5, 10}	sd
Cerapall 6	9	244	2
	10	242	3
	15	248	4
	20	247	3
	32	250	2
	45	241	5
	52	240	2
	61	238	1
	65	239	1
	70	240	2
75	237	3	
Pontor 4CF	36	229	3
	40	233	3
	44	220	2
	48	220	2
	52	210	1
	69	208	4
	72	205	6
	75	200	5
	79	198	4
	84	190	2
	110	189	1
	121	187	2
142	186	2	

Tabla 11: Dureza según tamaño de grano para Cerapall 6 y Pontor 4CF.

Experimento 3: Dureza.

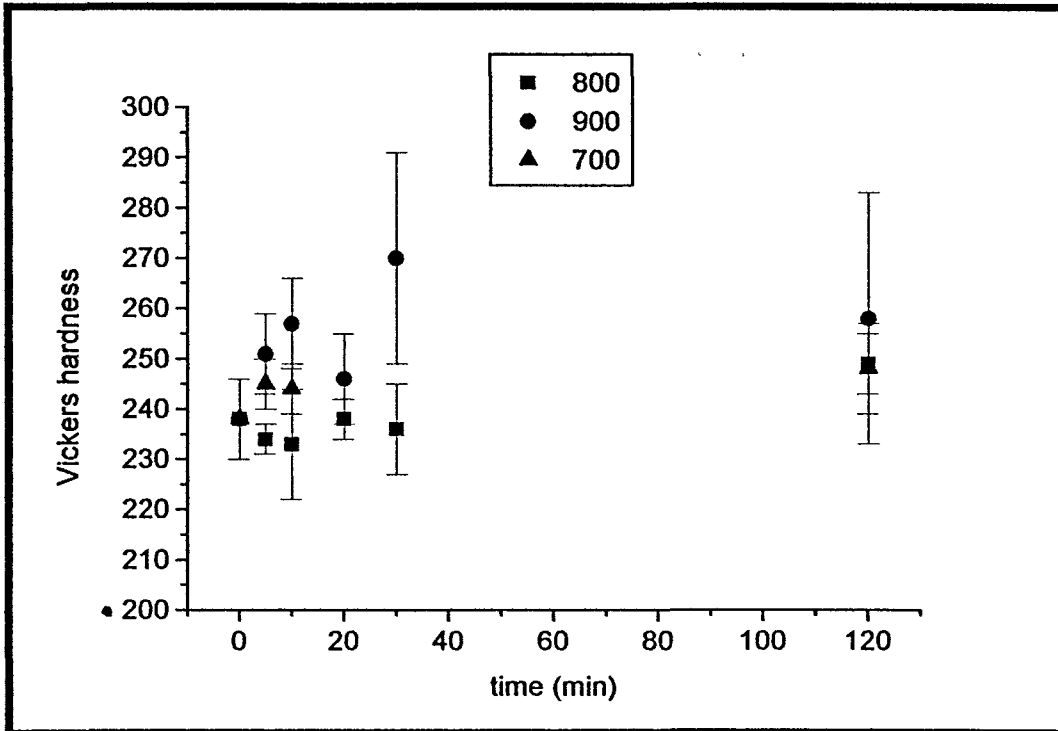


Figura 55: Dureza en relación con en tiempo de tratamiento térmico y a cada temperatura para el Nibon. Carga aplicada: 0.5 Kp

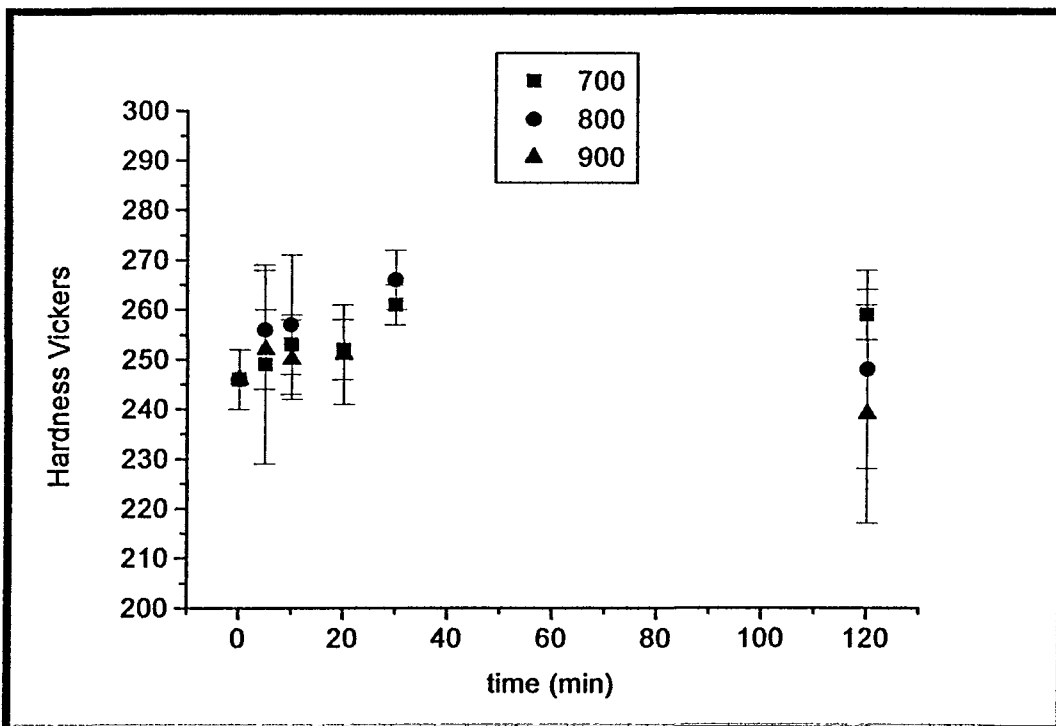


Figura 56: Dureza en relación con en tiempo de tratamiento térmico y a cada temperatura para el Cerapall 6. Carga aplicada: 0.5 Kp

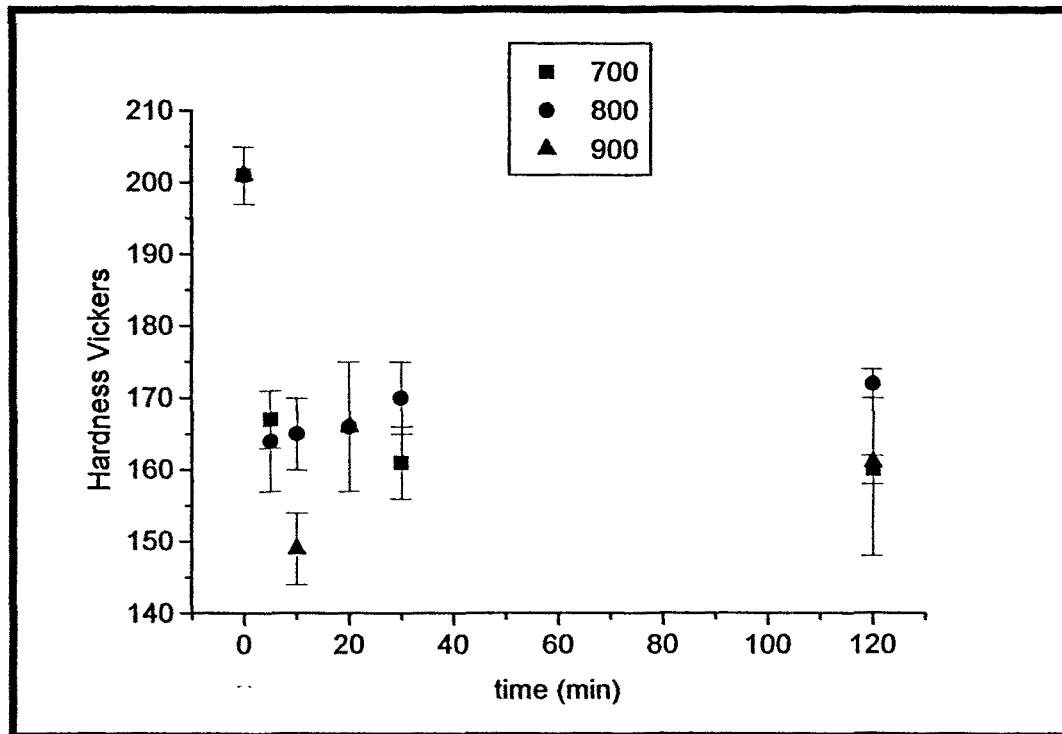


Figura 57: Dureza en relación con en tiempo de tratamiento térmico y a cada temperatura para el Pontor 4CF. Carga aplicada: 10 Kp

12.3. Discusión:

Los hallazgos experimentales muestran que la dureza de los colados de Cerapall 6 y de Nibon están en concordancia con el valor que nos da el fabricante de la aleación ($HV_{0.5} = 240$ para Cerapall 6 y de 230 para Nibon), no así los del Pontor 4CF. La dureza del Cerapall 6 y del Nibon es prácticamente idéntica. Vermilyea también halla total concordancia en la dureza hallada en aleaciones de paladio con los datos aportados por los fabricantes. (Vermilyea S.G. 1996)

La dureza del Pontor 4CF es idéntica a la hallada por Bessing en otras aleaciones de oro (Midas y Rajah) al comparar las cifras de dureza según el tamaño de grano. (Bessing C. 1986)

Experimento 3: Dureza.

Parece observarse que en Cerapall 6 y Nibon el aumento de tamaño de grano debido al tratamiento térmico no sigue las expectativas teóricas de disminución de la dureza, suceso que sí encontramos en Pontor 4CF. En el caso de las aleaciones de paladio, estos resultados no coinciden con los hallados por Vermilyea, quien refiere un descenso del 4-8% en la dureza inicial de las aleaciones de alto contenido ($\delta > 75\%$) en paladio al ser sometidas a tratamiento térmico. (Vermilyea S.G. 1996)

**13. EXPERIMENTO 4:
DESGASTE.**

13. DESGASTE.

13.1. Introducción:

Los resultados de desgaste se expresan en masa y volumen perdidos.

Aunque el desgaste puede ser una ventaja en el proceso de bruñido, en la mayor parte de los casos es un efecto indeseable que se debe minimizar. De los diferentes tipos de desgaste y de sus consecuencias hemos hablado en el capítulo 4.1.

En este estudio se ha evaluado para las tres diferentes aleaciones su comportamiento ante el desgaste abrasivo.

13.2. Material y método:

El equipo usado para el test de desgaste consiste en un cilindro horizontal que rodaba sobre unos cojinetes y sobre el que se fijó una hoja de tela de esmeril. Un esquema del aparato se muestra en la figura 58. El cilindro se movía por un motor eléctrico a una velocidad de 40 r.p.m. La velocidad era suficientemente baja para evitar la fusión y la oxidación de la superficie de desgaste. Además, se usó una carga de 1 Kg. para evitar que existiera desgaste adhesivo. El ensayo se realizó en un medio salivar a 37° C.

La saliva utilizada corresponde a la formulación que se puede ver en la tabla 12.

Experimento 4: Desgaste

Producto químico	(g/dm ³)
K ₂ KPO ₄	0.20
KCl	1.20
KSNC	0.33
Na ₂ KPO ₄	0.26
NaCl	0.70
NaJCO ₃	1.50
Urea	1.50
Ácido Láctico	Hasta pH= 6.7

Tabla 12: Formulación de la saliva utilizada. (F.J. Gil 1997)

Las muestras que debían ser desgastadas fueron primero pesadas y luego sujetadas al aparato. Durante el test, el cilindro fue parado a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 120 minutos para evaluar la pérdida de peso. Como habían diferentes materiales en el estudio, se calibró la pérdida de volumen por unidad de tiempo para encontrar la velocidad de desgaste en vez de medir la pérdida de peso por unidad de tiempo. La pendiente de esta línea se define como la velocidad de desgaste.

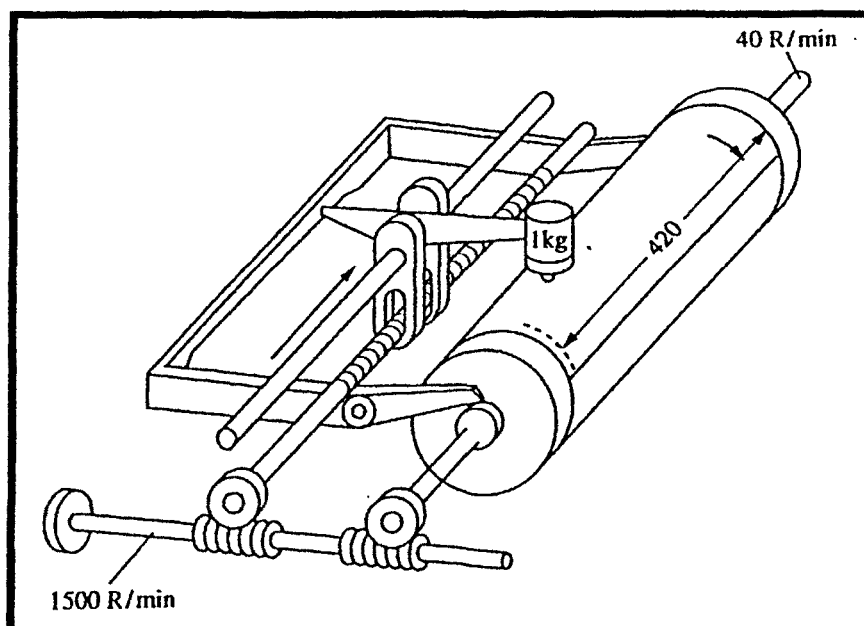


Figura 58: Esquema del sistema utilizado para testar el desgaste.

13.3. Resultados:

Las figuras de la 59 a la 68 muestran los valores de pérdida de volumen para las diferentes aleaciones. Las figuras muestran que el volumen perdido es linealmente proporcional al tiempo empleado. La pendiente de esas líneas rectas representa la velocidad de desgaste. La velocidad de desgaste para cada una de las aleaciones se muestran en la tabla 13.

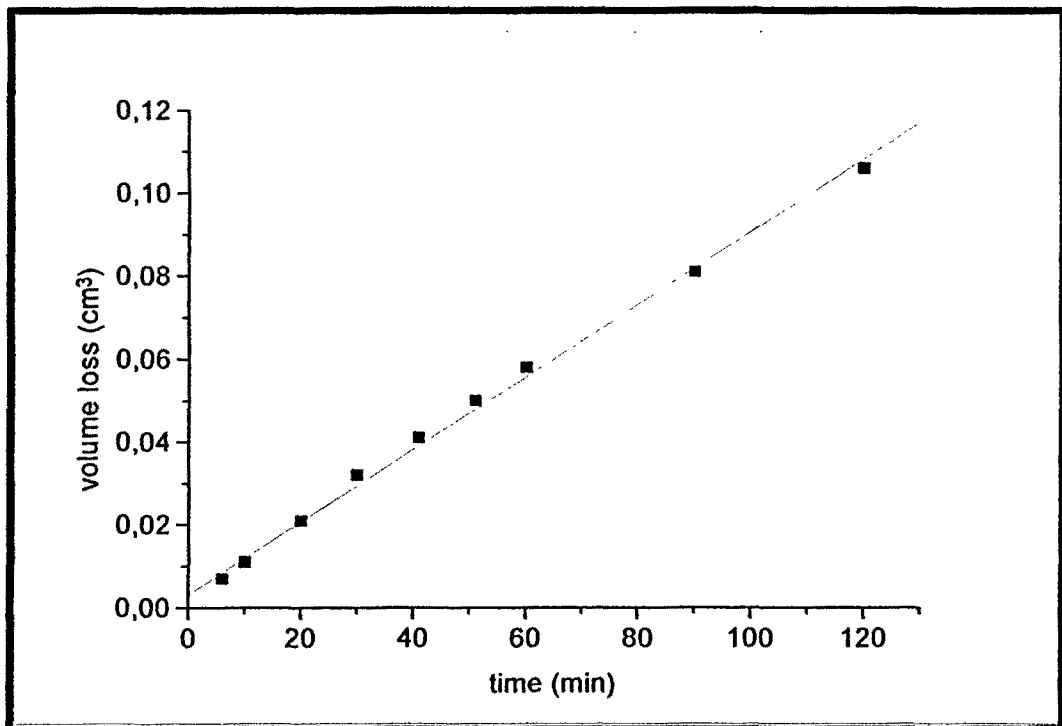


Figura 59: Volumen perdido en función del tiempo para el Nibon colado a 1300 °C.

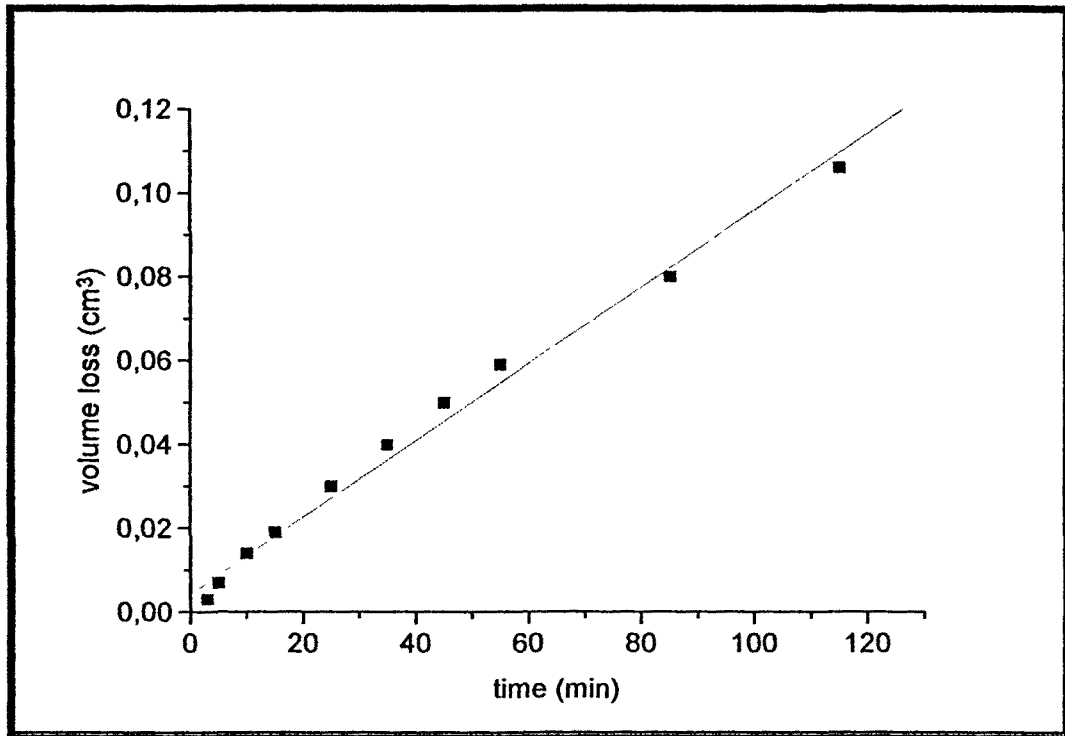


Figura 60: Volumen perdido en función del tiempo para el Nibon colado a 1580 °C.

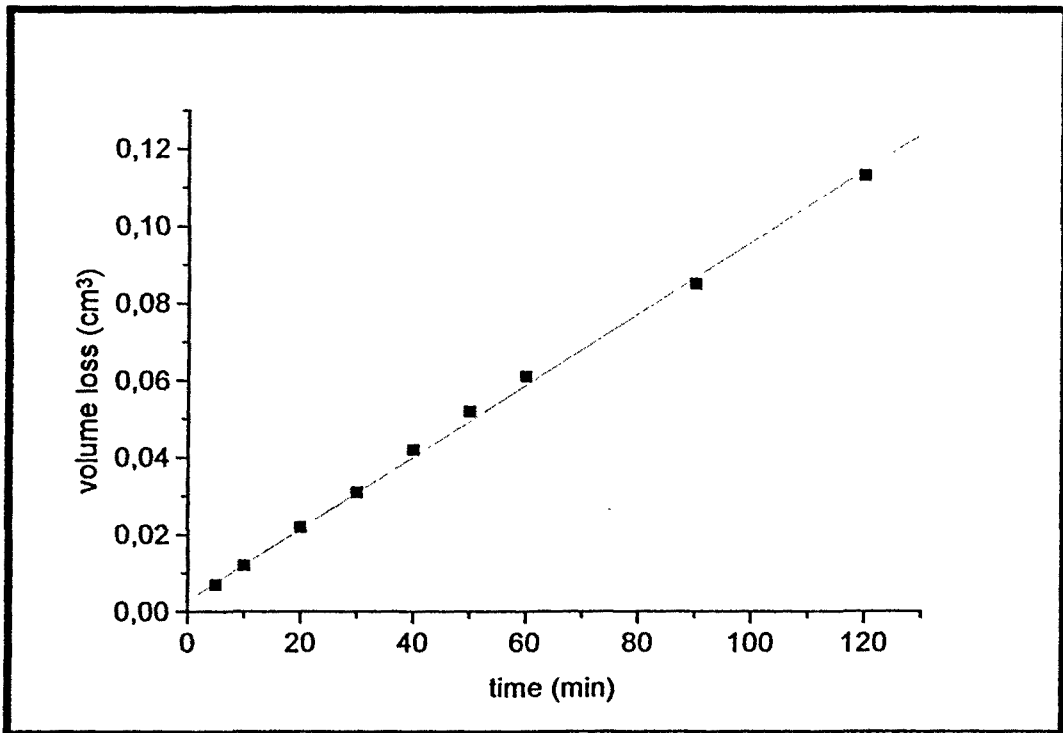


Figura 61: Volumen perdido en función del tiempo para el Nibon colado a 1420 °C.

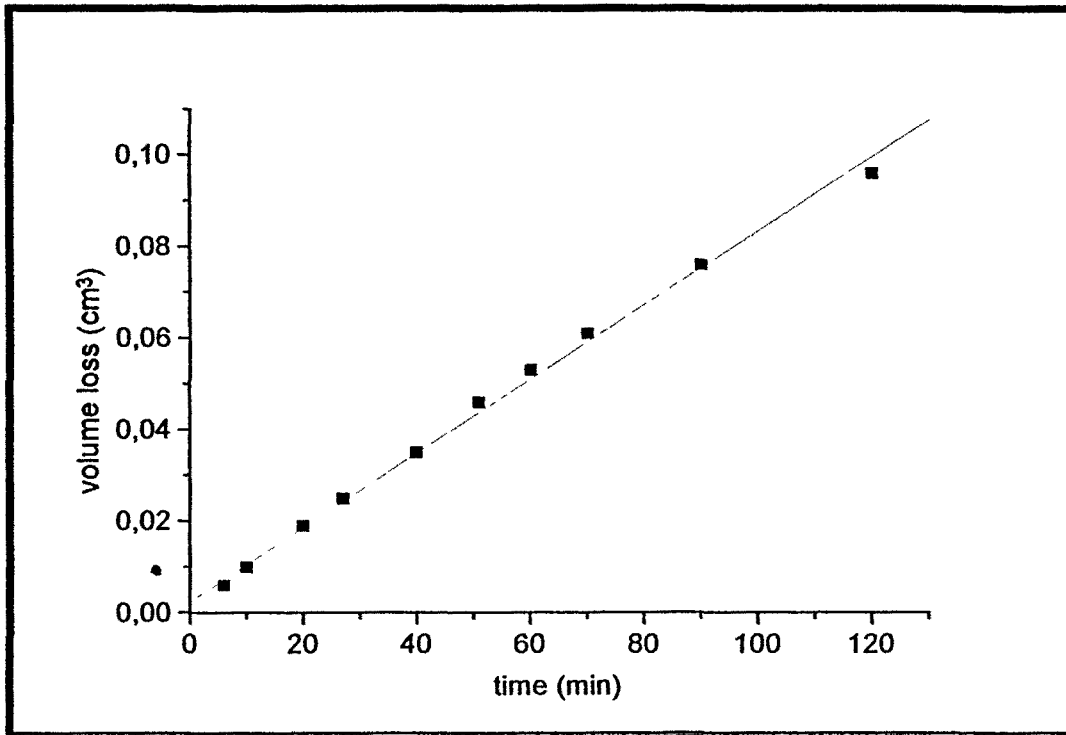


Figura 62: Volumen perdido en función del tiempo para el Nibon colado a 1480 °C.

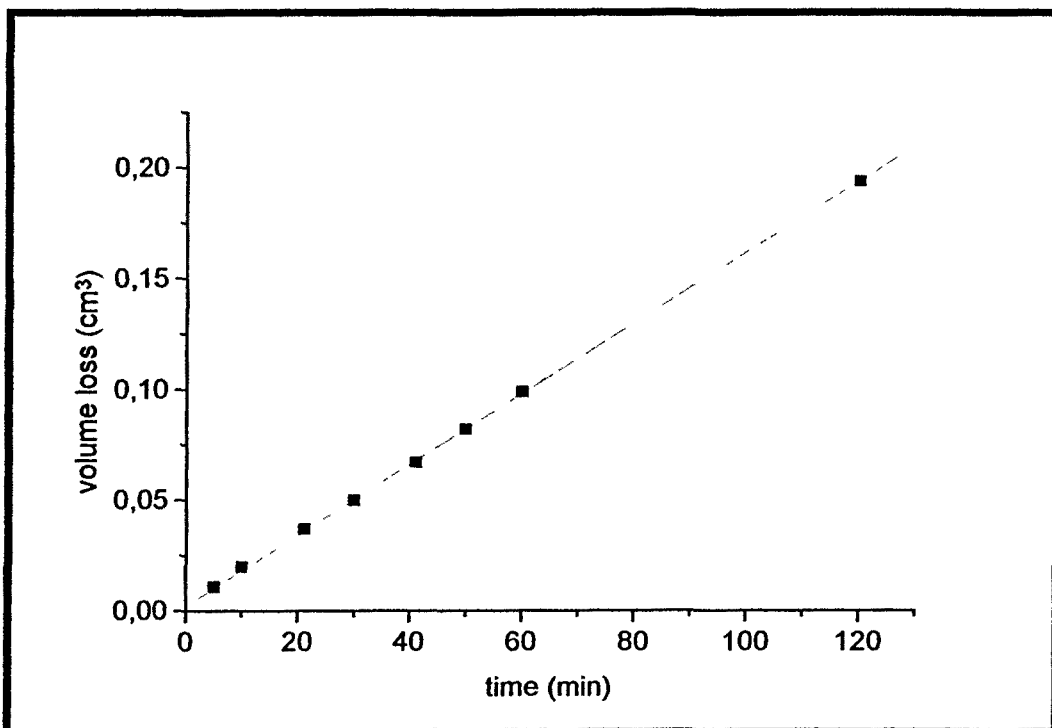


Figura 63: Volumen perdido en función del tiempo para el Pontor 4CF colado a 1000 °C.

Experimento 4: Desgaste

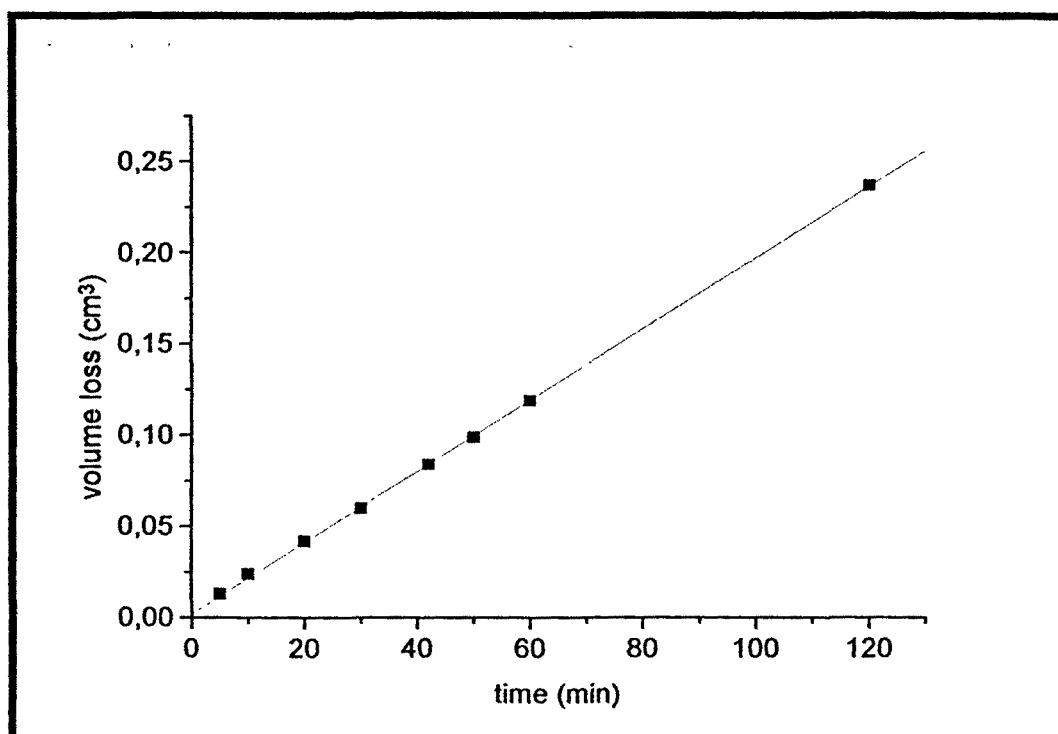


Figura 64: Volumen perdido en función del tiempo para el Pontor 4CF colado a 1060 °C.

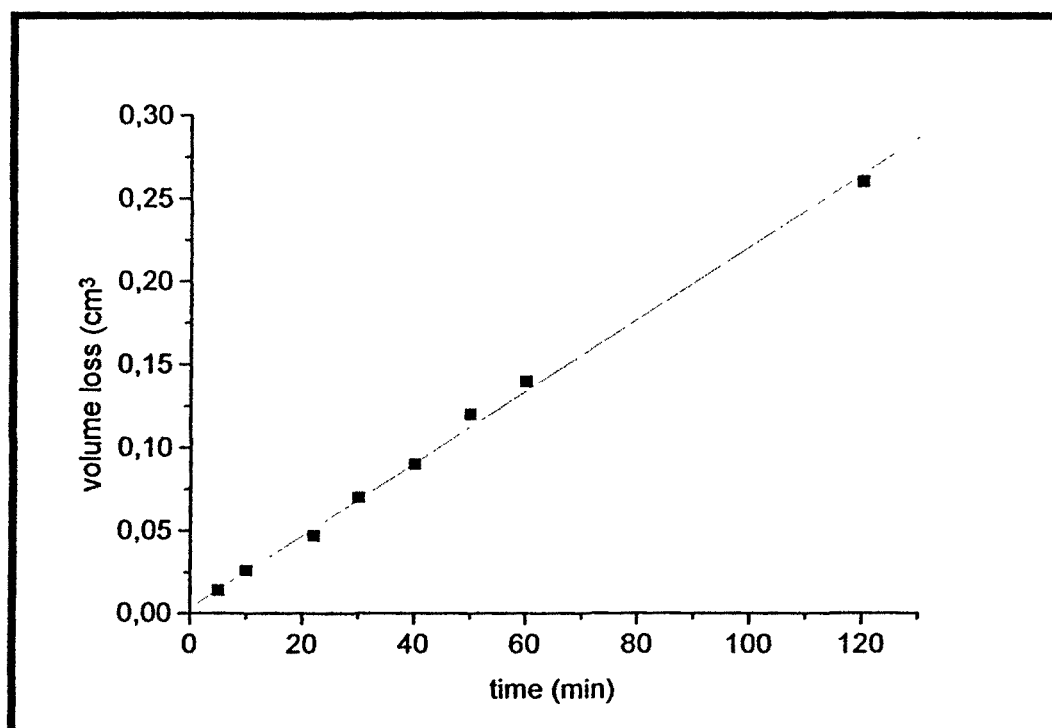


Figura 65: Volumen perdido en función del tiempo para el Pontor 4CF colado a 1160 °C

Experimento 4: Desgaste

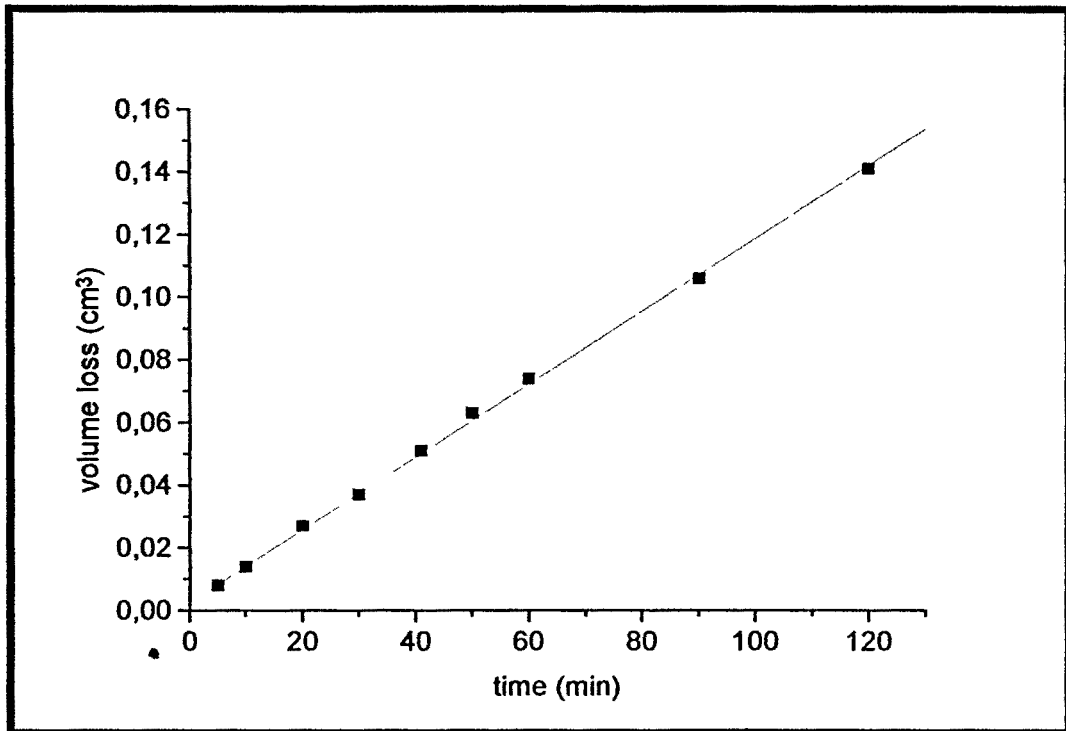


Figura 66: Volumen perdido en función del tiempo para el Cerapall 6 colado a 1320 °C

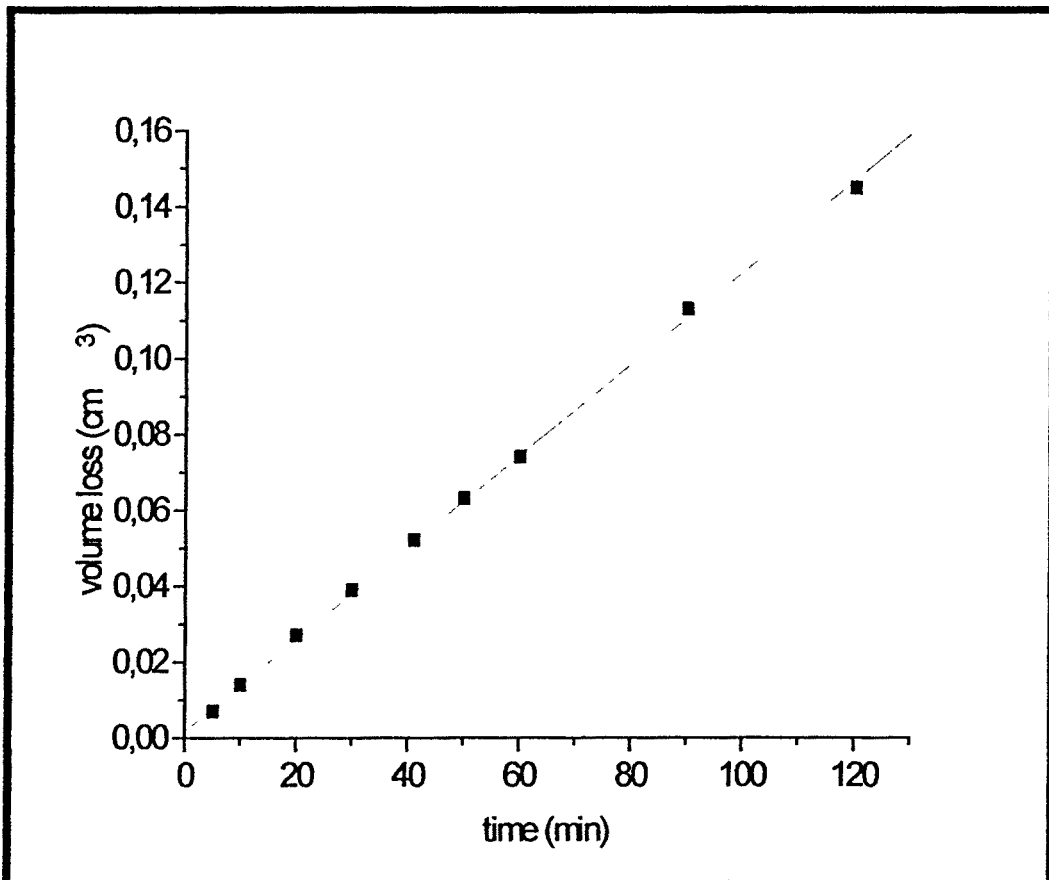


Figura 67: Volumen perdido en función del tiempo para Cerapall 6 colado a 1260 °C.

Experimento 4: Desgaste

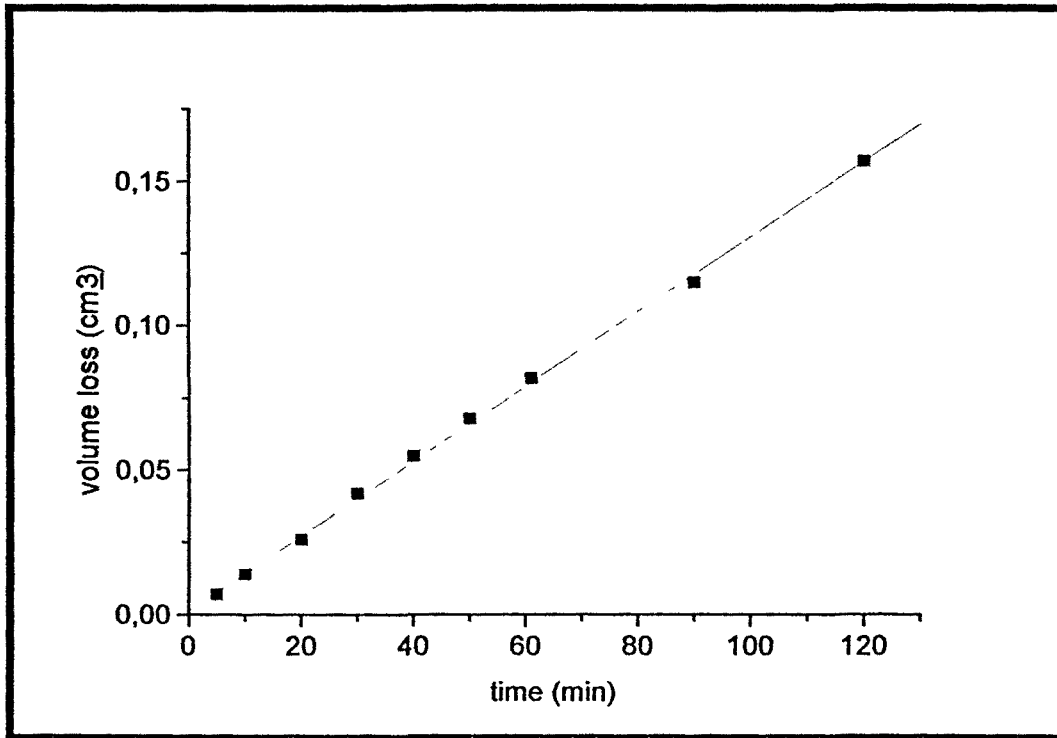


Figura 68: Volumen perdido en función del tiempo para el Cerapall 6 colado a 1260 °C

Alación	Temperatura de colado (°C)	Densidad (g/cm³)	Time (min)	Coefficiente de Correlación
Cerapall 6	1260	11.55	70	0.9995
	1320	11.55	74	0.9997
	1420	11.55	78	0.9987
Nibon	1300	8.10	51	0.9982
	1420	8.10	49	0.9981
	1480	8.10	52	0.9974
	1580	8.10	51	0.9967
Pontor 4CF	1000	14.70	96	0.9979
	1060	14.70	118	0.9996
	1160	14.70	134	0.9962

Tabla 13: Resultados de desgaste.

Experimento 4: Desgaste

De la tabla 13 se puede observar en el Cerapall 6 una leve tendencia a incrementar el ratio de desgaste con la temperatura de colado. Esta tendencia es más marcada en el Pontor 4CF, ya que en el análisis de regresión tanto para el Pontor 4CF como para Cerapall 6 la r^2 que hallamos fue de 0.94 y 0.97 respectivamente pero la pendiente de la recta era de 0.048 para el Cerapall 6 y de 0.229 para el Pontor 4CF.

El decrecimiento en la resistencia al desgaste con el incremento de la temperatura de colado tiene su explicación en la tabla 7 donde se puede ver que el tamaño de grano aumenta con la temperatura de colado. Un tamaño de grano mayor tiene, normalmente, una peor resistencia al desgaste que uno menor.

Para el Nibon la temperatura de colado parece no tener ninguna influencia en el ratio de desgaste. (r^2 de 0.26)

En todos los casos la velocidad de abrasión es constante, obsérvese que en la tabla 7 los coeficientes de correlación son superiores a 0.99.

Las superficies desgastadas fueron examinadas por un microscopio electrónico (SEM) como se muestra en las figuras de la 69 a la 75.

En todos los tres casos se mostraron superficies muy rugosas, especialmente el Pontor 4CF, figuras 69 y 70. Las estrías están bien definidas y son paralelas la unas con las otras. Pontor 4CF muestra una mayor densidad de estrías y también la mayor deformación plástica. La presencia de arañazos o estrías de diferente grosor también se puede ver junto con la pérdida de partículas laminares y fracturas del material que es arrastrado en al dirección del rascado.