

5. RESULTADOS

En este apartado se estudian los resultados obtenidos, fruto de las experiencias realizadas, extrayendo conclusiones en base a los mismos. Está estructurado de forma que en primer lugar se tiene en cuenta el estudio realizado a las muestras mediante el análisis exterior de la probeta, por medio de mediciones, y en un segundo y más extenso estudio, se estudian los datos obtenidos mediante el análisis de imagen.

5.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES MEDIANTE MASA Y DIMENSIONES

5.1.1 BRONCE

Mediante el análisis dimensional se va a ver, en primer lugar, como evoluciona la porosidad, estos resultados serán comparados posteriormente con los obtenidos mediante el análisis dimensional.

En la Tabla 1 y en la Figura 1 se muestra la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización. Tanto en la tabla como en la gráfica se aprecia una tendencia inicial de la porosidad en ligero decremento y de índole lineal, para a partir de los 650° C comenzar a disminuir de manera más acusada.

Tabla 1: Porosidades del bronce medidas mediante análisis dimensional.

Temperatura (° C)	Bronce 0.4	Bronce 0.6
20	0.1692	0.2409
550	0.1665	0.2368
650	0.1638	0.2305
700	0.1546	0.2212
750	0.1521	0.2025
800	0.1287	0.1761

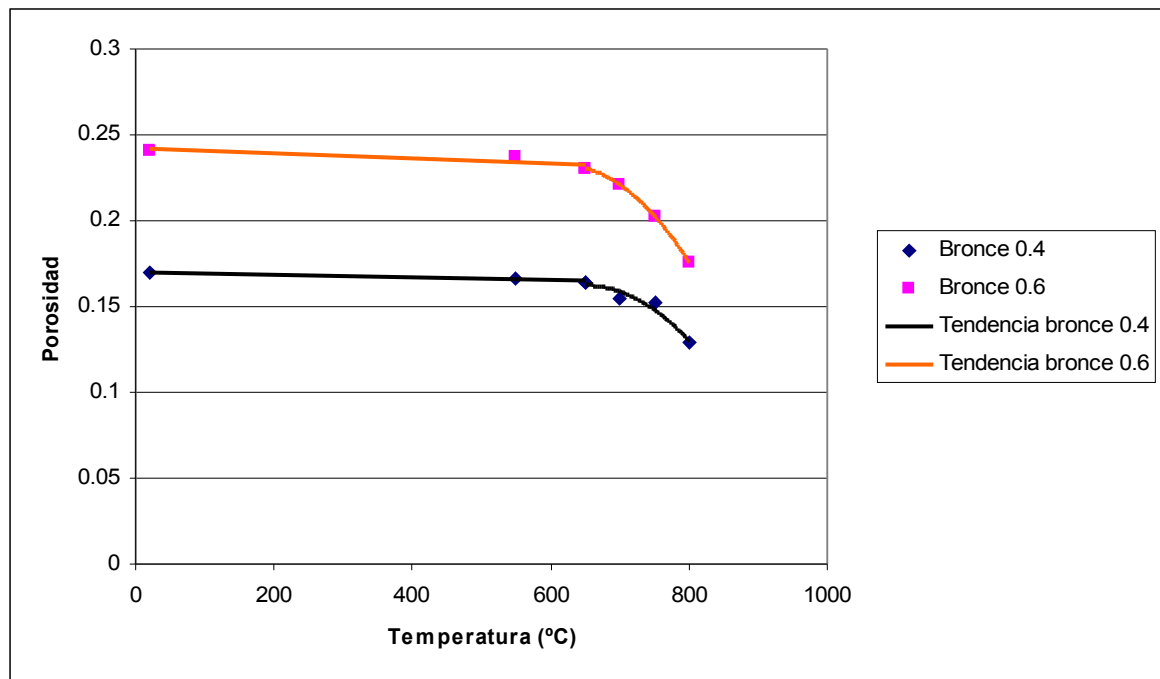


Figura 1: Porosidades del bronce medidas mediante análisis dimensional.

Una vez vista la tendencia descendente de la porosidad, que es su evolución natural, se va a estudiar como afecta a las dos dimensiones principales de la probeta, las cuales son el diámetro y la altura de la misma. Para hacer un análisis similar en todas las probetas, y teniendo en cuenta que todas las dimensiones, inclusive la masa, varían de una probeta a otra se ha establecido un proceso de normalizado de las mismas, de forma que se puedan comparar sus medidas. Este procedimiento consiste en seleccionar una de las dimensiones a estudiar, la cual se analizará considerando el resto de las medidas constantes. La medida obtenida mediante la medición con el pie de rey, se normalizará dividiéndola por la que tendría dicha probeta en caso de que su densidad fuera la teórica del material, considerando el valor del resto de las medidas como el obtenido mediante la medición. Para la mejor comprensión del lector del procedimiento, se muestra a continuación un ejemplo del mismo:

El bronce a una temperatura de 20° C, tiene las siguientes medidas características:

- $D = 12.22 \text{ mm}$
- $h = 12.42 \text{ mm}$
- $m = 10.7711$

Con el diámetro y la masa que se ha obtenido, y teniendo en cuenta que la densidad del bronce es 8.9 g/cm^3 , se obtiene la altura teórica que tendría la probeta si tuviera la densidad del bronce, la cual se denomina h_d :

$$h_d = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho} = \frac{4 \cdot 10.7771}{\pi \cdot 1.222^2 \cdot 8.9} = 1.0325 \text{ cm} = 10.325 \text{ mm}$$

Una vez obtenido el valor de h_d , se normaliza el valor de la altura dividiendo h por h_d , obteniendo la altura normalizada tal y como se muestra a continuación:

$$h_n = \frac{h}{h_d} = \frac{12.22}{10.325} = 1.1835$$

Por medio de la Figura 2 y Figura 3 se comparan las dos magnitudes normalizadas. En ellas se refleja a cual de las dos magnitudes afecta más el cambio dimensional al producirse la sinterización, y se aprecia la influencia que tiene la porosidad de partida en la evolución de las dos dimensiones.

Fruto de la observación de las gráficas, se deduce que la reducción de tamaño es más acusada en la altura que en el diámetro. La explicación de este fenómeno puede ser que, tal y como se observa en la Figura 2 y la Figura 3, la altura parte de un valor mucho más alejado de 1, que es el valor de densidad total, que el diámetro, el cual se encuentra mucho más próximo, por lo que la tendencia a reducir la dimensión es más acusada en la altura, ya que el campo de reducción es mucho mayor.

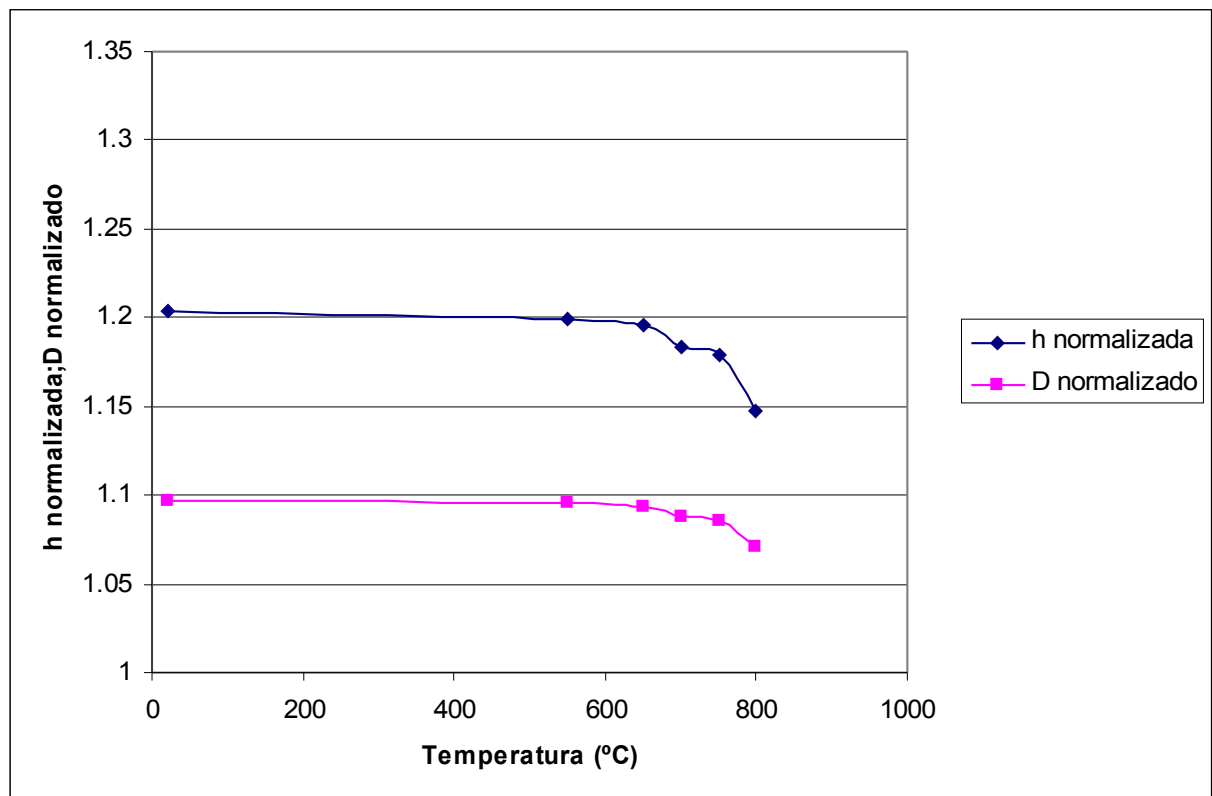


Figura 2: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el bronce 0.4.

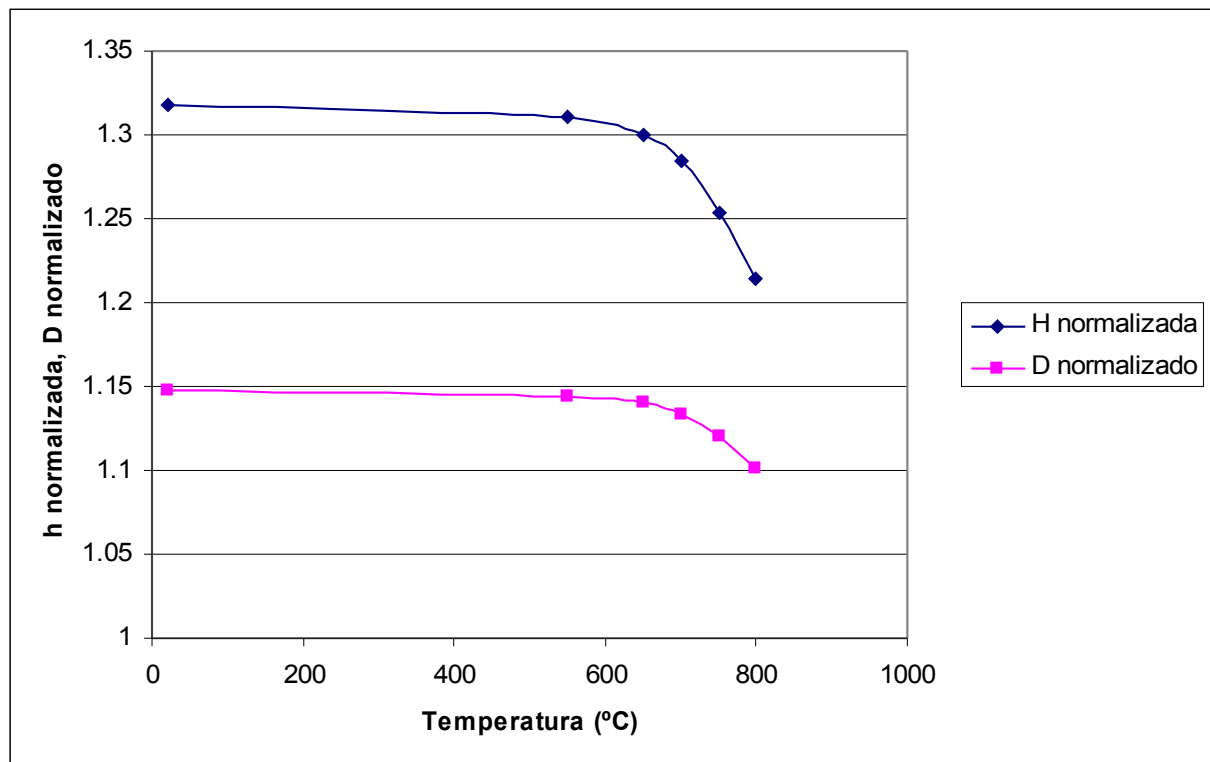


Figura 3: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el bronce 0.6.

Por otro lado, por medio de las magnitudes de las distintas gráficas se realiza la comparación de la evolución de las dos magnitudes, para las distintas porosidades de partida, concluyendo, que tal y como ocurrió con la porosidad, la reducción de tamaño es más considerable en el caso en el cual se parte de mayor porosidad para ambas magnitudes.

5.1.2 ALUMINIO

Se procede en este apartado de forma similar al anterior, pero en este caso analizando los resultados obtenidos para el aluminio.

En primer lugar se estudia la evolución de la porosidad en función de la temperatura, mediante la Figura 4 y la Tabla 2.

Tabla 2: Porosidades del aluminio medidas mediante análisis dimensional.

Temperatura (°C)	Aluminio 0.4	Aluminio 0.6
20	0.1752	0.2548
400	0.1725	0.2484
500	0.173	0.2567
550	0.1612	0.2332
600	0.123	0.2231
650	0.1086	0.2114

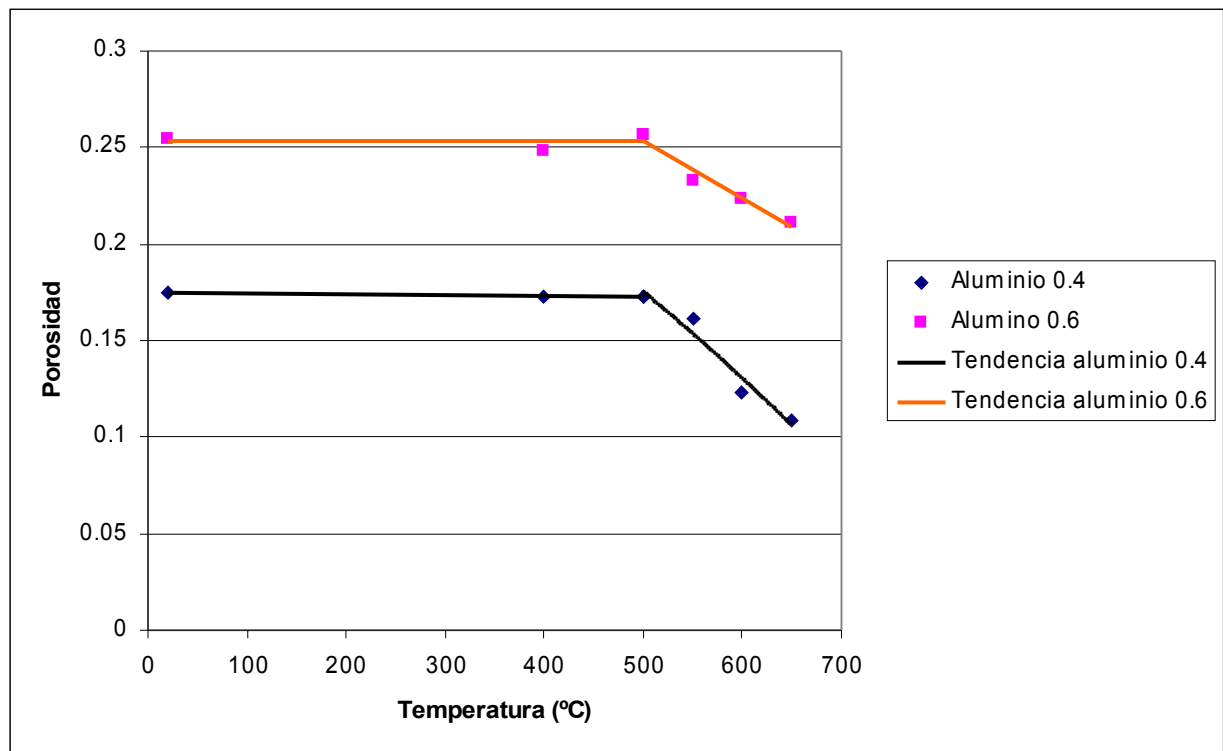


Figura 4: Porosidades del aluminio medidas mediante análisis dimensional.

Una vez más y lógicamente, la porosidad va disminuyendo en función de la temperatura, aunque en este caso se observa un comportamiento anómalo con respecto a lo que sucedió con el bronce. En el aluminio se observa que la tendencia de descenso de la porosidad es mayor en el caso de menor densidad de partida. Este comportamiento no es normal y para explicarlo se esbozan dos hipótesis, que posteriormente se contrastarán con los resultados del análisis. En primer lugar, se supone que los resultados tomados contienen errores, ya sea debido al proceso de compactación o al de sinterización, aunque esta hipótesis no se puede descartar completamente, se puede asegurar que a la hora de realizar el proceso de compactación y sinterizado se ha sido extremadamente escrupuloso con el fin de evitar cualquier tipo de error. La segunda hipótesis, consiste en que el aluminio 0.6 todavía no ha alcanzado su máximo en cuanto a la velocidad de disminución de la porosidad, y la curva esta por desarrollarse todavía, no como en el aluminio 0.4 que ha conseguido alcanzar la máxima velocidad de compactación rápidamente, siendo por lo tanto esta una explicación plausible de los resultados. En un próximo apartado se compararán los resultados mediante masa y dimensiones con los obtenidos mediante el análisis de imagen, con ellos se evaluará la validez de las dos hipótesis anteriormente esgrimidas.

Ahora se va a ver la evolución de las alturas y los diámetros normalizados con respecto a la temperatura, el proceso de normalizado es similar al del bronce, por lo cual es lógica la abstención de la exposición del mismo.

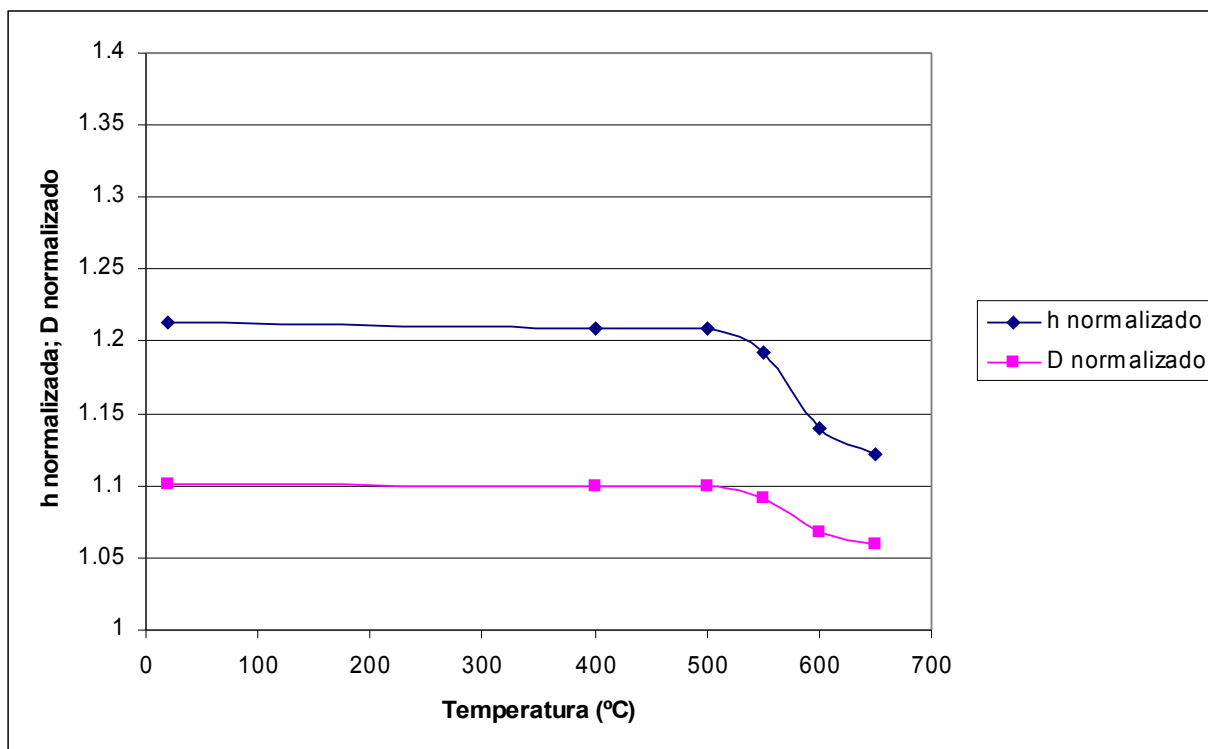


Figura 5: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el aluminio 0.4.

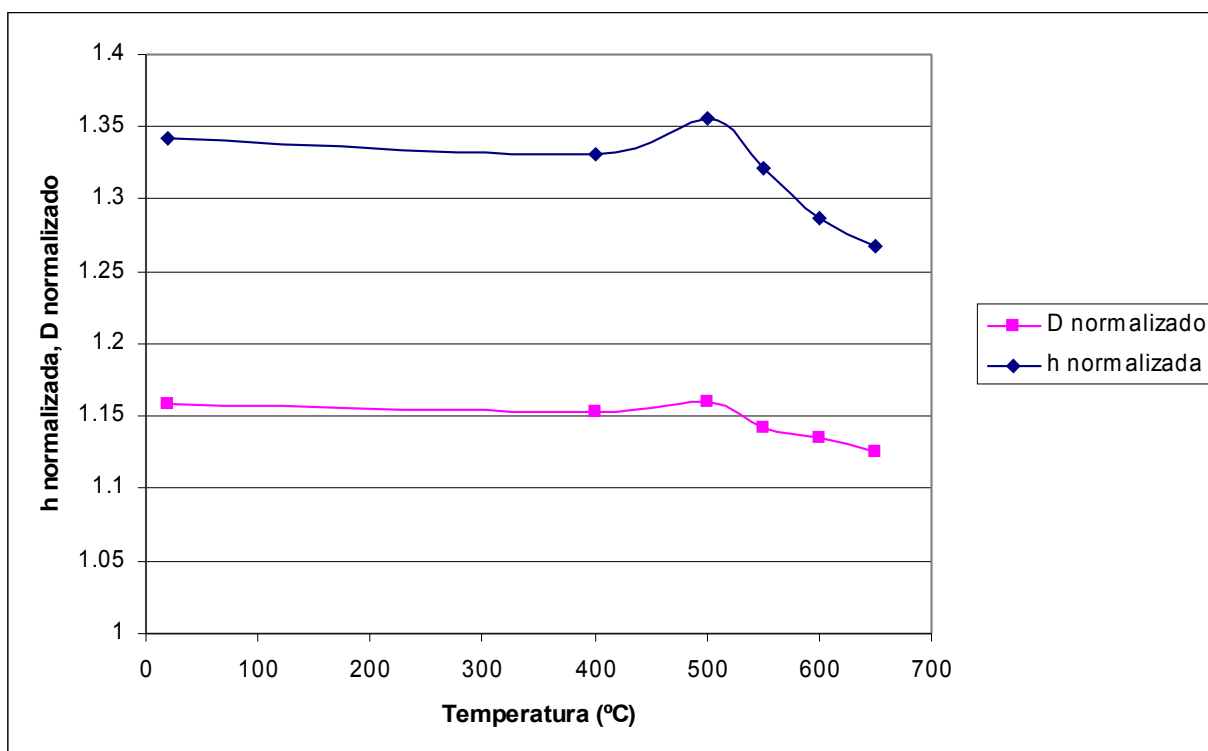


Figura 6: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el aluminio 0.6.

Fruto del estudio de la Figura 5 y la Figura 6 se concluye que, al igual que sucedía en el bronce, la disminución del tamaño de la altura normalizada es mucho más acusada que la

del diámetro, las razones para explicar este comportamiento son las mismas que el caso anterior.

Como fiel reflejo al comportamiento observado en cuanto a la evolución de la porosidad, las comparaciones entre la evolución de la altura en el aluminio 0.4 y en el aluminio 0.6, son similares a las observadas en el caso anteriormente citado. De manera similar ocurre con el diámetro normalizado, estos dos comportamientos eran predecibles fruto de las conclusiones sacadas con la porosidad, y en el caso de no ser así hubiera habido algún error en cuanto a resultados. La explicación al fenómeno ya se detalló en el apartado dedicado a la porosidad, y los resultados aquí expuestos no hacen más que corroborar el comportamiento pero no aportan ningún dato extra que nos ayude a explicar el mismo.

5.1.3: ACERO INOXIDABLE

El último material que se va a analizar es el acero inoxidable, al mismo se le aplicarán los mismos procedimientos de análisis que a los dos anteriores.

Mediante la Figura 7 y la Tabla 3 se estudia la porosidad del acero inoxidable medida mediante masa y dimensiones, de forma similar a como se ha realizado en los casos anteriores. Con ellas se realiza un análisis exhaustivo de la evolución de la porosidad con respecto a la temperatura de sinterización, y se efectúa una comparación de la evolución de la misma en función de la porosidad de partida.

Tabla 3: Porosidades del acero inoxidable medidas mediante masa y dimensiones.

Temperatura (°C)	Acero inoxidable 0.4	Acero inoxidable 0.6
20	0.2	0.336
750	0.2017	0.3348
850	0.1973	0.3065
900	0.1854	0.3006
950	0.1586	0.2444
1000	0.1318	0.2294
1050	0.1098	0.2164

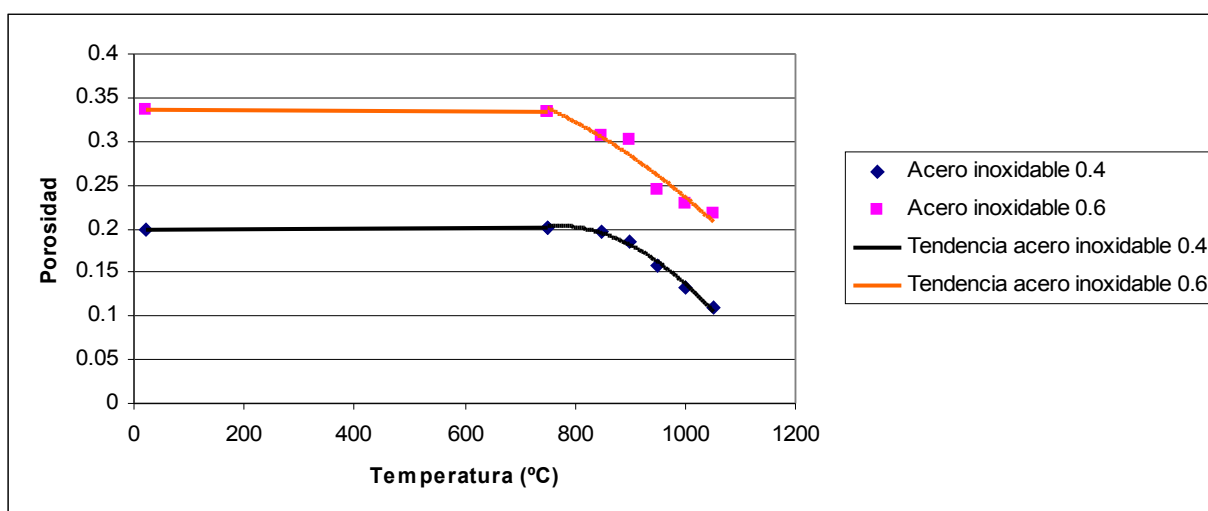


Figura 7: Porosidades del acero inoxidable medidas mediante análisis dimensional.

En este caso se observa que la porosidad, nuevamente, tiene una zona en la cual se mantiene prácticamente constante, para a partir de una temperatura en torno a los 800° C iniciar un descenso que es más acusado para el caso del acero inoxidable 0.6, caso similar al que sucedió en el bronce. Por lo tanto el comportamiento del acero inoxidable se adecua a la evolución lógica que le debe ocurrir a la porosidad.

La porosidad transcurre por los cauces ya previstos, se va a analizar la evolución de las dimensiones de las probetas, tal y como se realizó en los dos casos anteriores, para ello se procede a la normalización de las dimensiones de las mismas mediante el método que ya se expuso en el acero inoxidable. En la y la Figura 9 están recogidas las gráficas del diámetro normalizado y de la altura normalizada, para los casos del acero inoxidable 0.4 y 0.6, respectivamente.

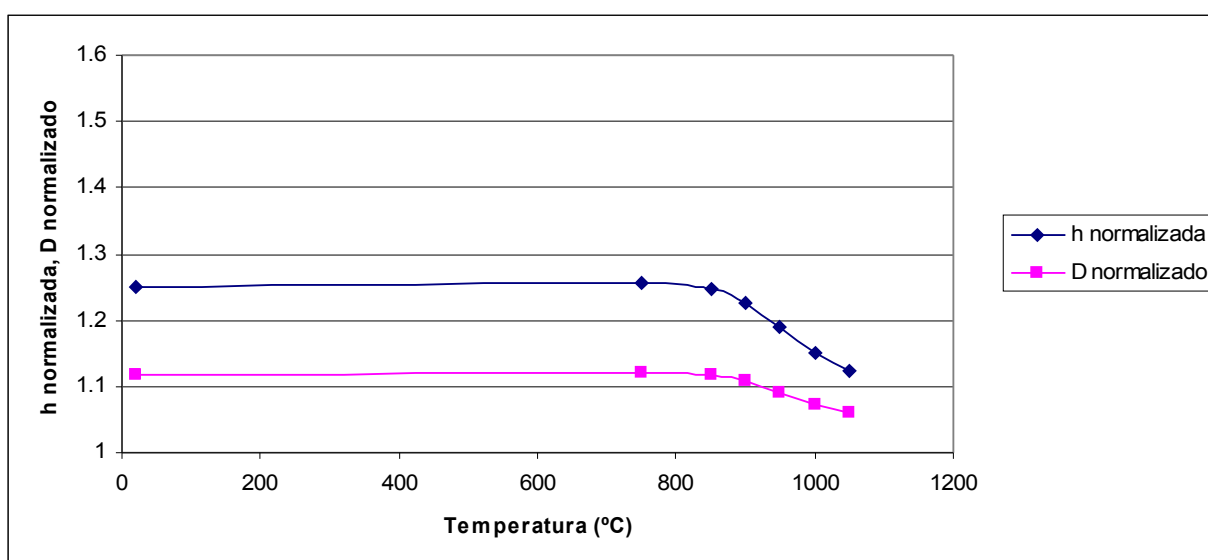


Figura 8: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el acero inoxidable 0.4.

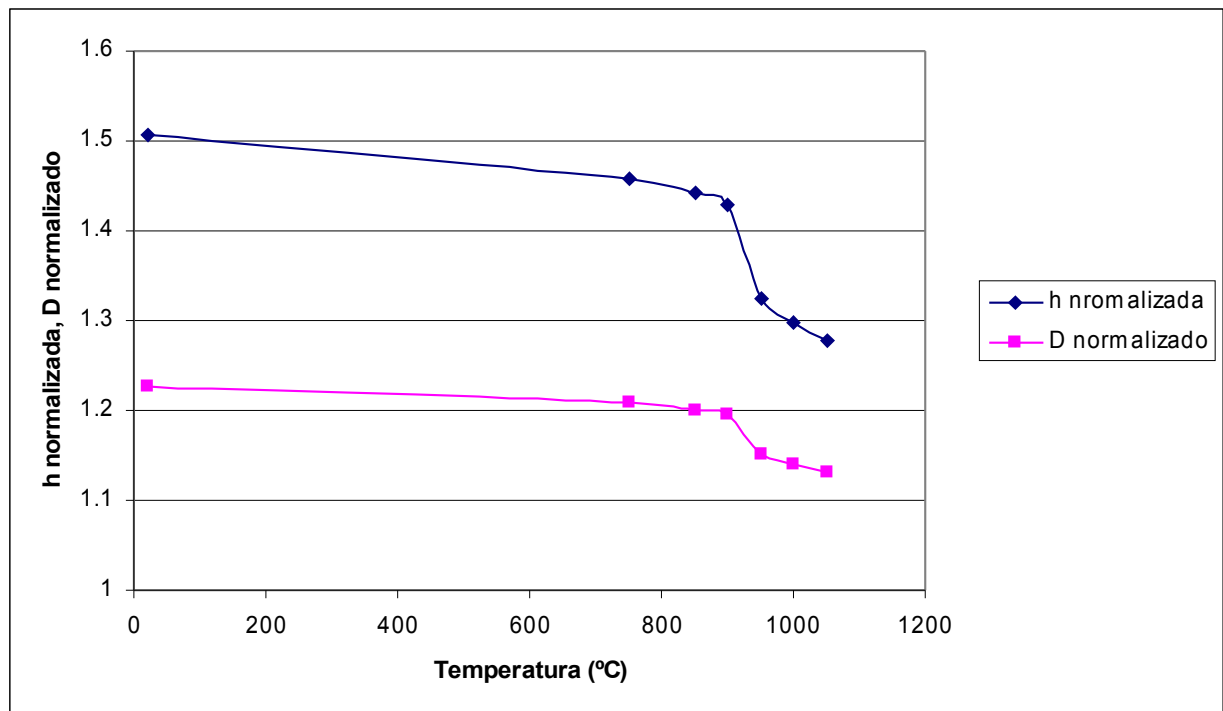


Figura 9: Altura y diámetro normalizados frente a la temperatura, en el acero inoxidable 0.6.

En este caso, tal como sucedió en los del bronce y del aluminio, el comportamiento es totalmente similar, es decir la altura experimenta un decremento mucho mayor que el diámetro. Este comportamiento se produce en los tres casos, por lo tanto se puede generalizar como una constante en la evolución de las probetas al ser sinterizadas.

Por otra parte, en consonancia con la evolución de la porosidad, las tendencias de disminución en cada una de las magnitudes es más acusada en el caso del acero inoxidable 0.6, tal como era previsible.

5.2 ANÁLISIS DE IMAGEN

En este apartado se analizan, de manera completamente independiente al apartado anterior, los resultados obtenidos fruto del estudio de las probetas mediante el método de análisis de imagen, el cual ya ha sido descrito en apartados anteriores.

Fruto del análisis, se van a obtener una serie de valores cuantitativos de la porosidad y de la forma de los poros, los cuales serán, área del espacio poroso, tanto de manera cuantitativa como en tanto por ciento, tamaño, diámetro máximo, mínimo y equivalente de cada uno de ellos, y por último un coeficiente de circunferencialidad que indica, con carácter adimensional, la similitud con respecto a una circunferencia que tiene la forma del poro.

5.2.1 BRONCE

En primer lugar se estudia la evolución de la porosidad, por medio de los resultados obtenidos mediante análisis de imagen, del bronce 0.4. El análisis se apoya en el resumen de los resultados expuesto en la Tabla 4 y la Figura 10.

Tabla 4: Porosidades del bronce 0.4, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Porosidad	Desviación
20	0.1711	0.0403
550	0.1436	0.0207
650	0.1313	0.0187
700	0.0904	0.0243
750	0.0529	0.0215
800	0.046	0.0123

Fruto de la observación de los resultados obtenidos, se aprecia claramente, que hasta 650° C, la porosidad experimenta un descenso muy suave, para a partir de dicha cantidad caer de forma muy marcada, comenzando una ligera estabilización para la temperatura de sinterización final.

Por otro lado también se observa que la desviación, con respecto a la media, va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura de sinterización, lo que puede ser un signo de que a medida que la temperatura de sinterización es mayor, mayor es la homogeneidad de la porosidad en la muestra

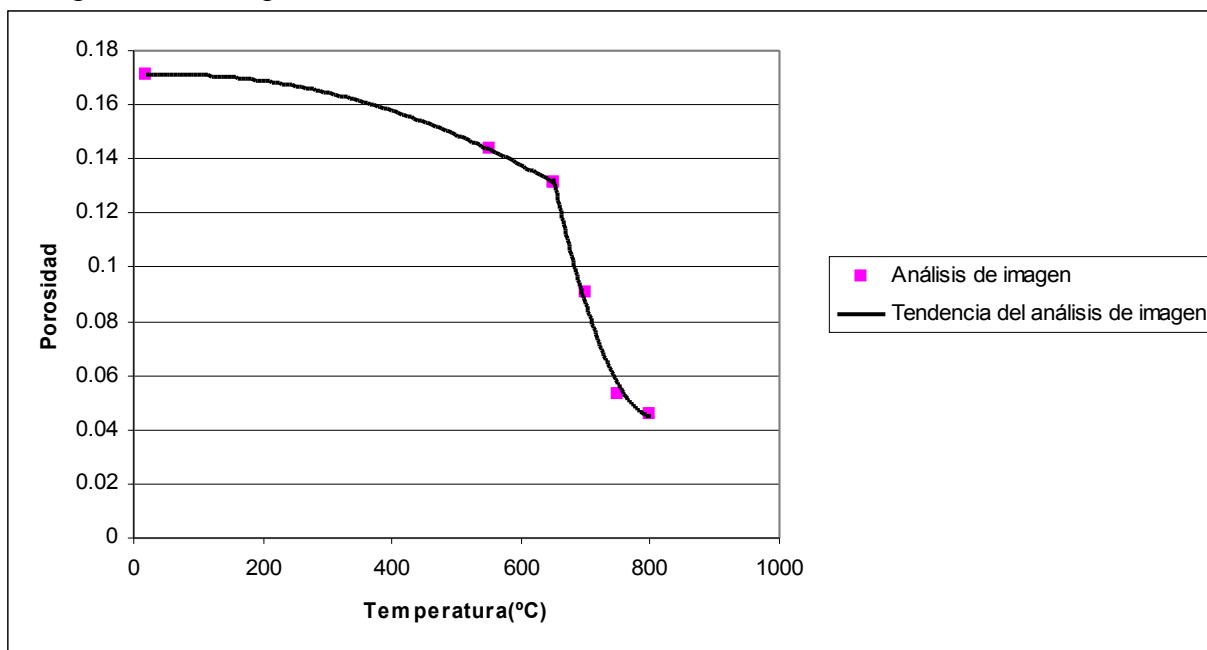


Figura 10: Evolución de la porosidad del bronce 0.4 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

Con el objetivo de una visión más simple del fenómeno, se han aproximado las curvas mediante rectas. Además mediante esta simplificación, a la hora de modelar el

fenómeno, se simplificará mucho el proceso. En la Figura 11 se expone la evolución de la porosidad mediante ajustes de forma lineal.

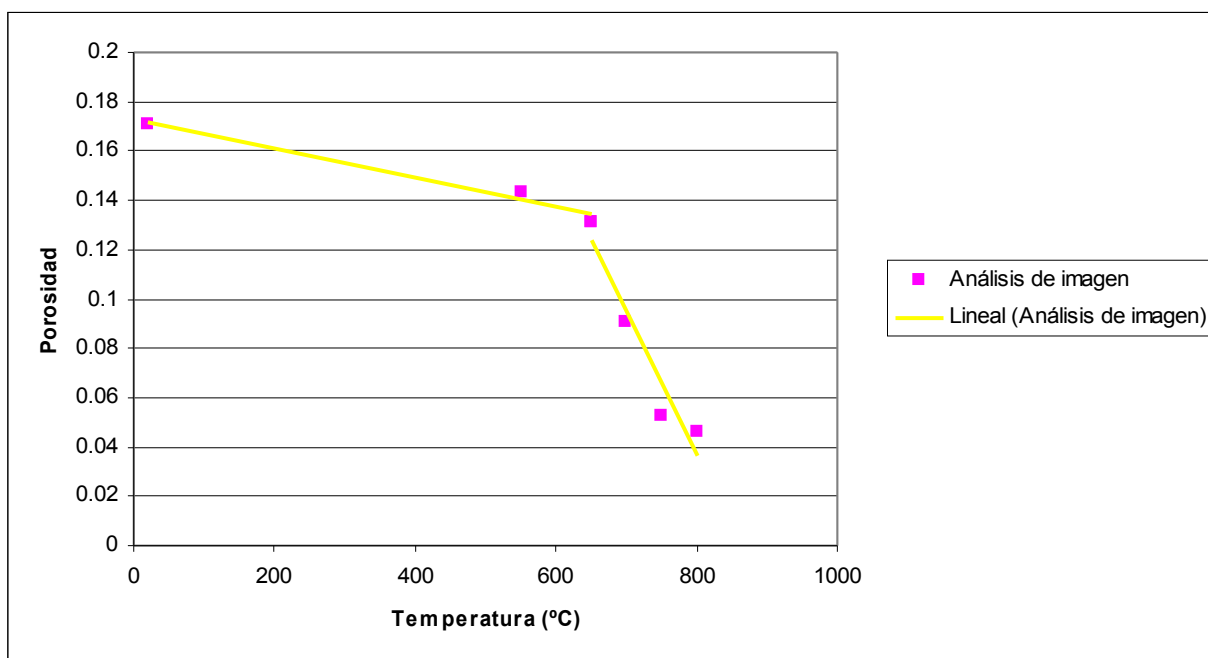


Figura 11: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del bronce 0.4, mediante el análisis de imagen.

Se ve, tal como se indicó anteriormente, que hasta los 650° C la tendencia de disminución es suave, exactamente el valor de la pendiente es de $6 \cdot 10^{-5}$, mientras que a partir de esta temperatura la pendiente se modifica incrementando a un valor de $6 \cdot 10^{-4}$, produciéndose un incremento de un orden de magnitud.

Una vez estudiado el comportamiento en cuanto a la porosidad del bronce 0.4, se analiza el del bronce 0.6 de manera similar a la seguida en el caso anterior. En la Figura 12 y la Tabla 5 se recoge el comportamiento general de la porosidad.

Nuevamente se observa que la tendencia de la porosidad es un ligero descenso hasta llegar a los 650° C, para a partir de esa temperatura de sinterización descender bruscamente, tendiendo a estabilizarse para 800° C.

En cuanto a la dispersión de los resultados de las muestras, con respecto a la media, se ve que a medida que la temperatura desciende va disminuyendo, con la excepción para 750° C, de forma similar al caso anterior. Se supone que esto es debido a una homogenización de la porosidad en cuanto a la distribución de la misma.

Tabla 5: Porosidades del bronce 0.6, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Análisis de imagen	Desviación
20	0.2222	0.032
550	0.2125	0.0246
650	0.2045	0.0269

700	0.1609	0.0237
750	0.0991	0.0288
800	0.0738	0.0213

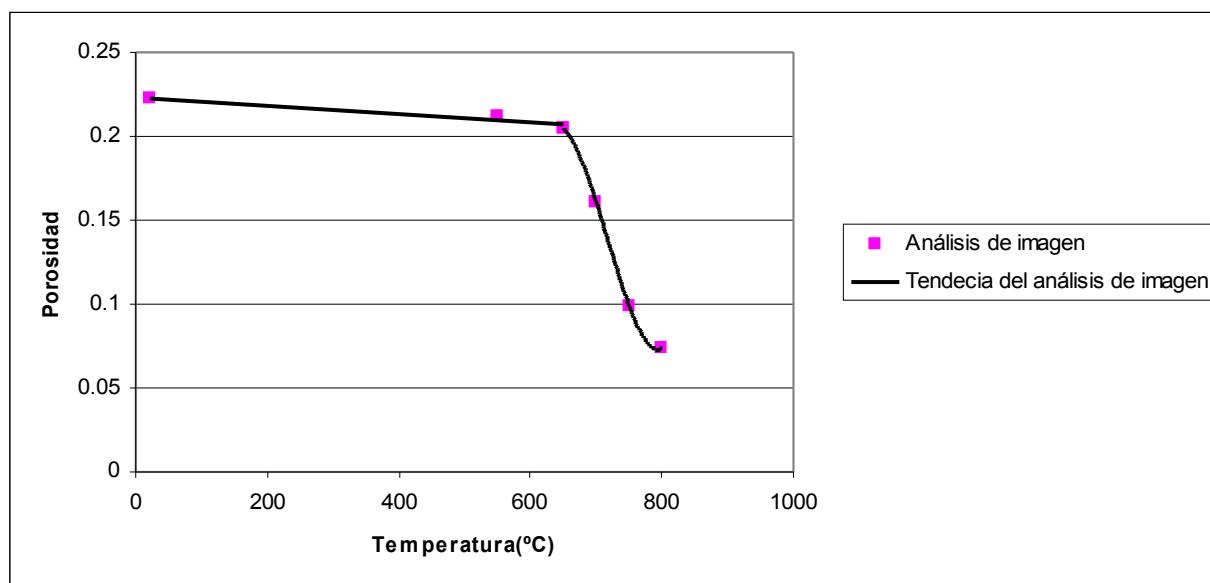


Figura 12: Evolución de la porosidad del bronce 0.4 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

De forma similar al caso anterior, se ajusta la curva de la evolución de la porosidad a dos tendencias lineales, recogidas en la Figura 13. El comportamiento es similar a la curva original, consistiendo la evolución en una recta de pendiente muy ligera, con valor de $2 \cdot 10^{-5}$, hasta los 650°C , a partir de los cuales aumenta hasta alcanzar un valor de $9 \cdot 10^{-4}$, de un orden de magnitud mayor que la pendiente anterior. De la misma forma que con el bronce 0.4, la curva de porosidad del bronce 0.6 se puede modelar de forma que permanezca constante hasta 650°C , para a partir de este valor caer con una pendiente de $9 \cdot 10^{-4}$.

Una vez vistas las distintas evoluciones, en los distintos tratamientos del bronce, se comparan las dos evoluciones para el bronce 0.4 y 0.6, con el objetivo de obtener comportamientos comunes y de determinar, de alguna forma, la influencia de la porosidad de partida en la posterior evolución de la porosidad. Para ello, en la Figura 14, se recoge una comparación de la evolución de la porosidad para ambos bronce.

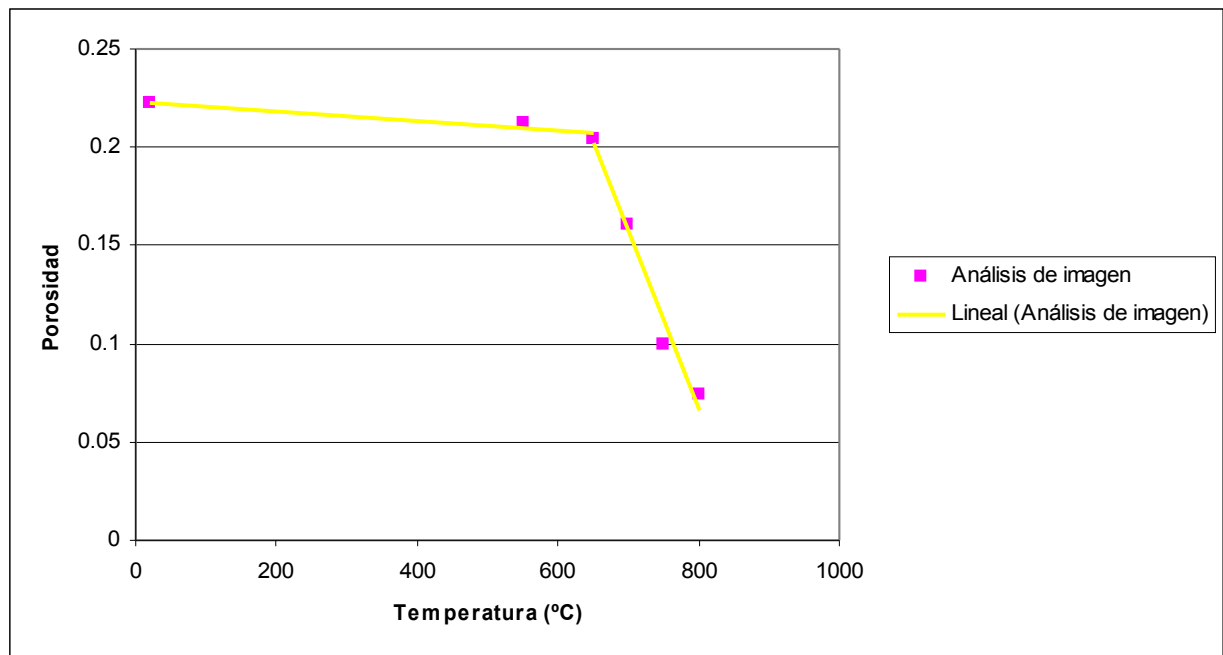


Figura 13: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del bronce 0.4, mediante el análisis de imagen.

Se observa que en la zona donde de ligero descenso, es decir antes de los 650° C, la caída de la porosidad es algo más acusada en el bronce 0.4, que en el bronce 0.6, para posteriormente invertirse las tendencias a partir de los 650° C, donde la pendiente es más acusada en el bronce 0.6. Esto es corroborado por las pendientes de las rectas de ajuste que antes de 650° C son de $6 \cdot 10^{-5}$, para el bronce 0.4 y de $2 \cdot 10^{-5}$, para el 0.6. A partir de 650° C para el bronce 0.4 la pendiente es de $6 \cdot 10^{-4}$, siendo para el 0.6 de $9 \cdot 10^{-4}$, viéndose nuevamente ratificada la observación sobre el comportamiento de ambos. El fenómeno por el cual en el bronce 0.4 disminuye más rápidamente la porosidad en la primera zona, puede ser explicado porque en el bronce 0.4 hay muchos más contactos que en el bronce 0.6, por lo que las partículas tienen más facilidad para establecer puentes de unión que en el de 0.6, donde, debido a la elevada porosidad, los contactos son mucho menores. En principio la sinterización sirve para crear esos contactos entre partículas. A partir de 650° C ocurre el fenómeno inverso. Esto puede ser debido a que al ser menor la porosidad en el caso del bronce 0.4, existe una menor tendencia a que desaparezca la porosidad que en el caso del bronce 0.6, donde hay mayor porosidad y, en consecuencia, una mayor tendencia a su eliminación.

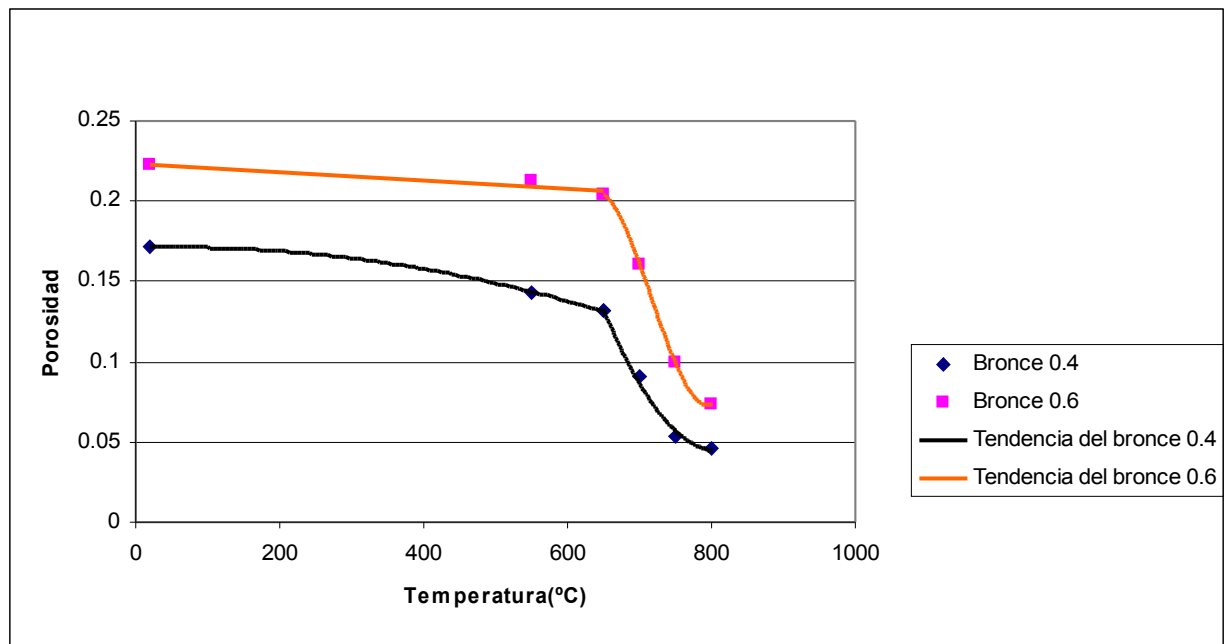


Figura 14: Comparación de la evolución de la porosidad del bronce 0.4 con respecto a la del bronce 0.6.

También se observa que la porosidad tiene una tendencia a estabilizarse mucho más acusada en el caso del bronce 0.4. Esto puede ser debido a que comienzan a quedar menos poros y bastante aislados, con lo cual se dificulta su eliminación, por lo que hay una acusada tendencia a la estabilización. Este fenómeno sería más acusado en el caso de un mayor tiempo de sinterización. En el bronce 0.6 la curva para elevadas temperaturas de sinterización también tiene una ligera tendencia, si no a la estabilización, si a la disminución de la pendiente, lo que indica que la disminución de la misma comienza a ser notable, puesto que la porosidad de partida es mucho mayor.

Otro aspecto a destacar, Tabla 4 y Tabla 5, es que la desviación de la media disminuye más en el caso del bronce 0.4 que en el del bronce 0.6. Esto es otro síntoma de que la homogenización de la porosidad que es más acusada en el bronce 0.4 que en el 0.6.

Una vez que se ha visto el fenómeno de la porosidad de forma general, se estudian las características de los poros.

En primer lugar se analiza la evolución del número de poros en la zona analizada, viendo la diferencia existente entre partir de una porosidad u otra. Para ello se aportan los resultados del estudio de análisis de imagen que se muestran en la Tabla 6 y la Figura 15. Se puede observar que en el bronce 0.4 la tendencia es a incrementarse, hasta los 550° C, prácticamente de forma lineal, y a partir de esta temperatura la tendencia es parabólica, aunque de forma muy suave. En el bronce 0.6, hasta los 550° C la evolución es prácticamente constante, produciéndose a partir de esta temperatura un incremento muy brusco.

El número de poros inicial es mayor en el bronce 0.4, que en el 0.6, a pesar de que la porosidad es mayor en el 0.6. Esto es lógico y se debe principalmente, como se verá más

adelante, a que el tamaño de los poros es bastante mayor en el caso del bronce 0.6, ya que al haber pocos contactos entre las partículas los poros ocuparán grandes zonas, que se unirán formando grandes poros, pero en un número pequeño.

Tabla 6: Número de poros del bronce, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Bronce 0.4	Bronce 0.6
20	424	300
550	591	305
650	715	348
700	749	533
750	742	1325
800	985	1382

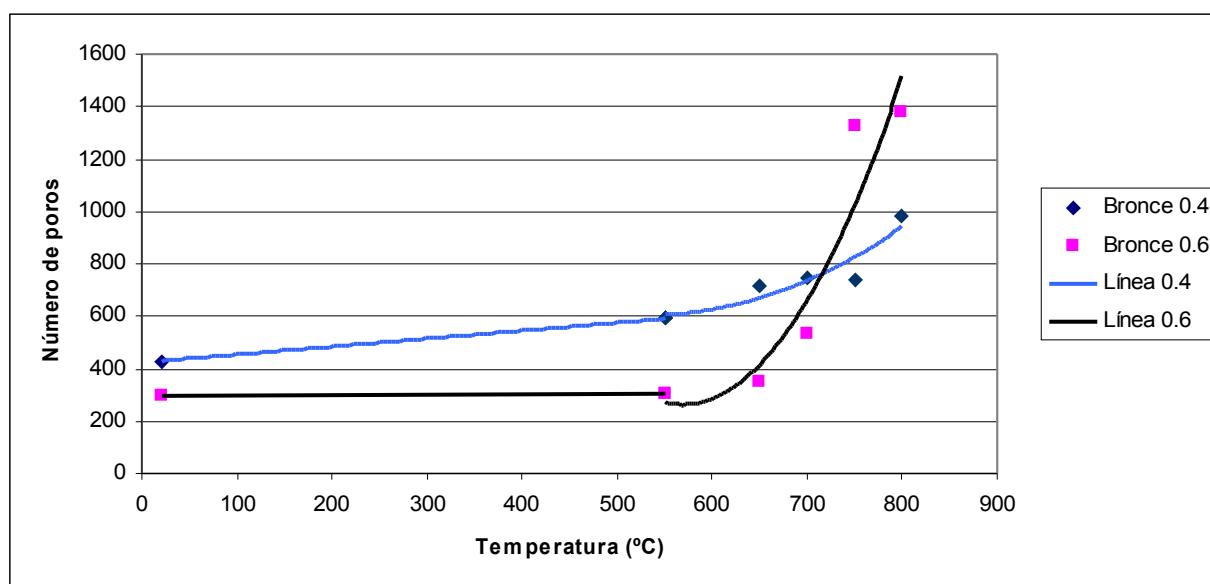


Figura 15: Evolución del número de poros en el bronce, en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante el análisis de imagen.

Pero a pesar de que el número de poros es mayor en el bronce 0.4, esto se modificará conforme comiencen a dividirse los grandes poros del bronce 0.6, lo que provocará un gran incremento en el número de poros, tal como puede observarse en la Figura 15.

Debido a que esta es una característica importante del comportamiento del material en la sinterización, se ha realizado una aproximación, por medio de rectas, de la evolución de la misma, con cuyo resultado se podrá realizar un modelado de la misma.

La mejor aproximación del comportamiento tanto del bronce 0.4 como del bronce 0.6, consiste en dos rectas, una desde 20° C hasta los 650° C, y otra a partir de 650° C hasta 800° C (Figura 16). En el caso del bronce 0.4 las pendientes tendrán un valor de 0.4133 y 1.606, mientras que en el bronce 0.6 serán de 0.0541 y 7.788. Se observa que la pendiente

en el caso del bronce 0.4 tiene una variación pequeña, mientras que en el bronce 0.6 se produce un cambio de dos órdenes de magnitud, pasando de ser prácticamente constante en un primer momento a una pendiente bastante mayor que la del bronce 0.4. Con los valores proporcionados, se puede realizar un fácil modelado del comportamiento de las dos evoluciones del bronce en función de la porosidad de partida.

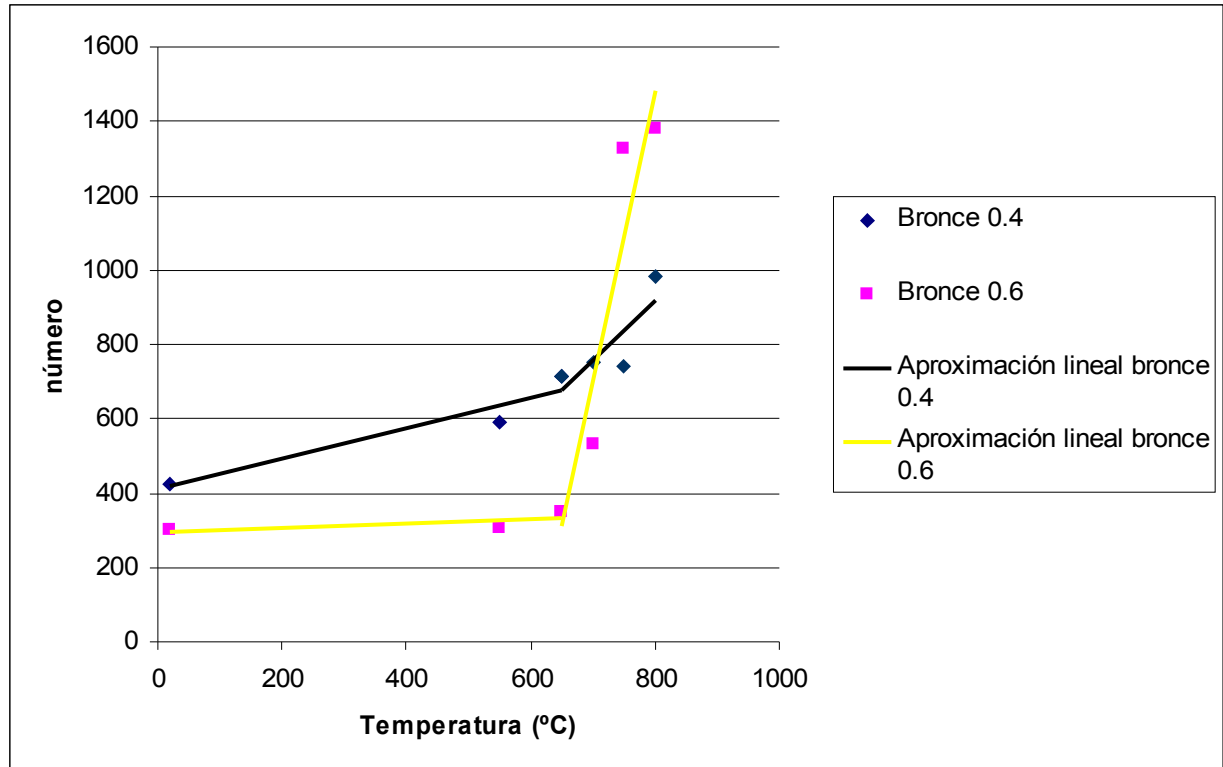


Figura 16: Aproximación lineal de la evolución del número de poros en el bronce, obtenida mediante análisis de imagen.

Una vez visto el número de poros, se va a proceder a analizar una propiedad de gran importancia, el tamaño de los poros. Para realizar el análisis se han dispuesto los resultados del mismo mediante la Tabla 7 y la Figura 17.

Tal y como se indicó al discutir el número de poros, el tamaño de los poros es mayor en el caso del bronce 0.6 que en el del bronce 0.4. La diferencia de magnitudes es mayor en la zona de baja temperatura de sinterización, y va tornándose a valores similares para altas temperaturas de sinterización. La evolución del tamaño en el bronce 0.4 es una curva descendente bastante suave que varía su pendiente de manera poco marcada. En cambio, en el bronce 0.6 la disminución del tamaño es hasta los 650° C muy suave, para a partir de esta temperatura caer de manera vertiginosa. Se observa que el tamaño de los poros a altas temperaturas de sinterización es prácticamente similar en ambos casos. Esto, conjuntamente con el número de poros, es lo que determina la mayor o menor porosidad en cada caso.

Por otra parte, se deduce que para el bronce 0.4, el descenso en el tamaño de los poros se realiza de forma suave debido a que hay suficientes contactos entre partículas para que desde el primer momento descienda el tamaño de los poros. En cambio en el bronce 0.6

es difícil la formación de los primeros puentes de contacto, para posteriormente dar paso a una caída brusca en el tamaño de los poros una vez formados estos primeros contactos.

Tabla 7: Tamaño de los poros del bronce y la desviación, obtenido mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Bronce 0.4	Desviación	Bronce 0.6	Desviación
20	2001.24	3788.74	3674.61	8747.13
550	1101.96	1803.45	3326.62	5825.71
650	982.22	1453.2	3028.88	5102.38
700	598.86	850.91	1497.56	2343.25
750	353.92	706.12	370.92	877.34
800	186.97	213.39	264.74	771.26

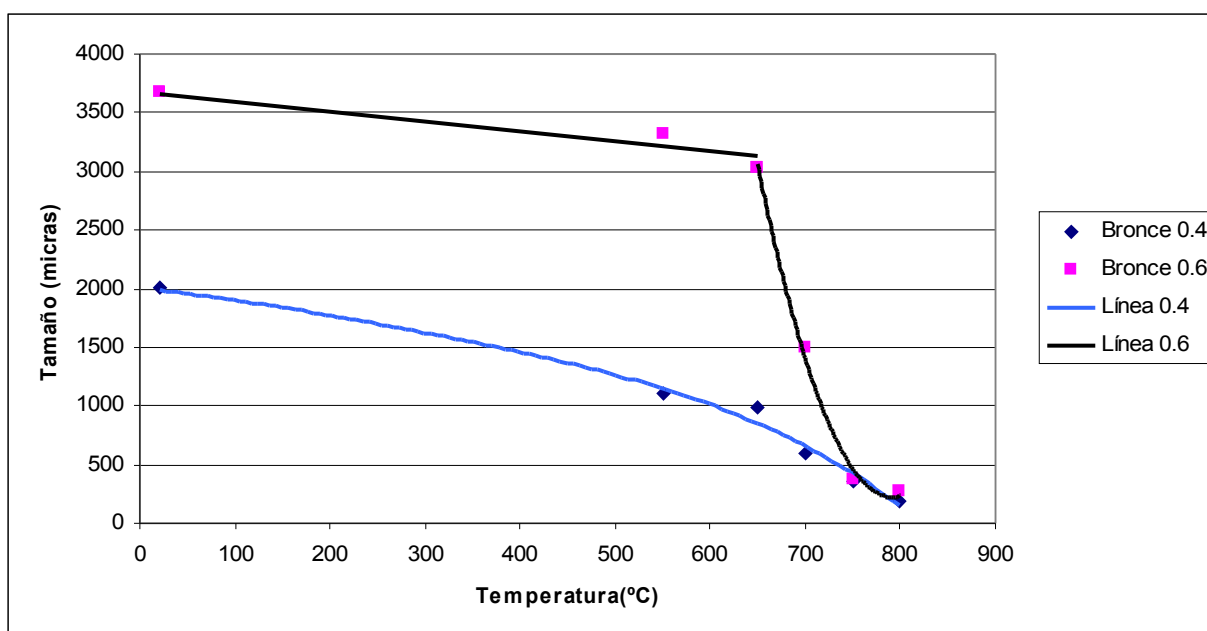


Figura 17: Evolución del tamaño de los poros en función de la temperatura de sinterización, para el bronce, obtenida mediante análisis de imagen.

Con el objetivo de modelar la evolución del tamaño de los poros, se ha tratado de linealizar este comportamiento. El resultado de esta operación se muestra en la Figura 18. El valor de las pendientes en el primer tramo es de 0.9029 para el bronce 0.6 y de 1.6438 para el bronce 0.4. En el segundo tramo los valores son de 18.838 para el bronce 0.6 y de 5.2614 para el bronce 0.4. La linealización realizada ratifica el comportamiento anteriormente analizado por medio de la Figura 17.

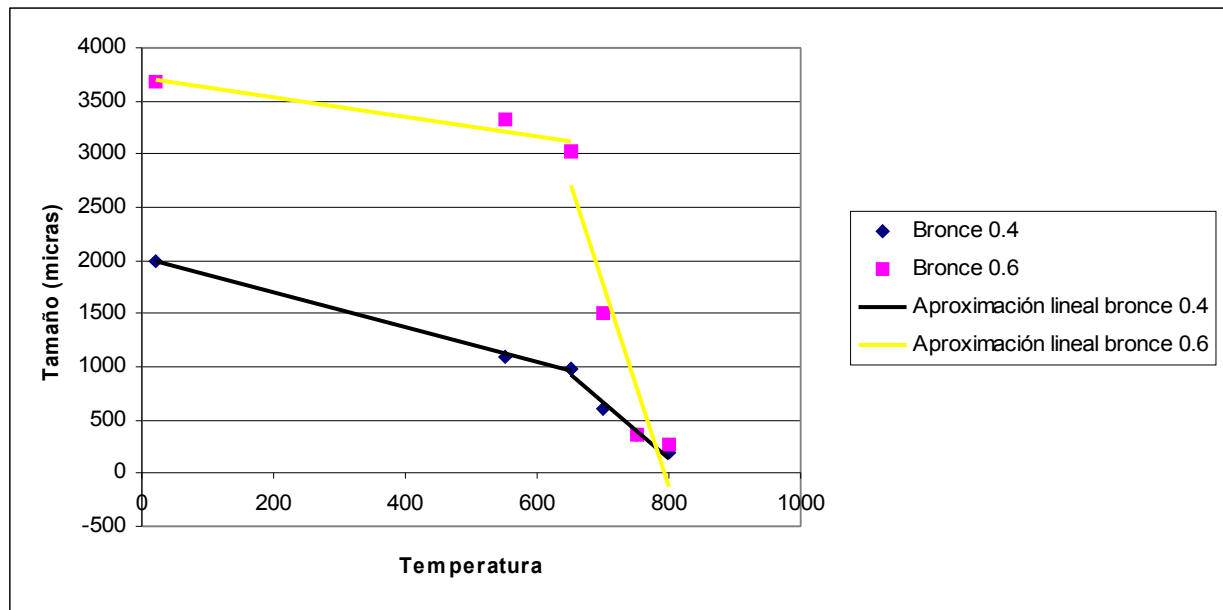


Figura 18: Aproximación lineal de la evolución del tamaño de los poros en el bronce, obtenida mediante análisis de imagen.

Por otra parte es importante reseñar, la elevada dispersión de resultados respecto de la media, lo que indica que la media es poco representativa del tamaño real de los poros. De modo cualitativo, se presenta la visión del fenómeno de manera absoluta en la Figura 19 y la Figura 20.

Los resultados de la distribución de tamaños muestran que, a pesar de la dispersión tan grande respecto a la media en el tamaño de los poros, el decremento en el tamaño de los mismos es notable. Por otra parte, comparando las distribuciones del número de poros para las diferentes temperaturas de sinterización, el número de poros más pequeños (intervalo 0-100 μm) crece y el de los más grandes (intervalo $>1900 \mu\text{m}$) disminuye, hasta casi desaparecer, al ser la temperatura de sinterización mayor. En el caso del bronce 0.6 el porcentaje de los poros más pequeños (intervalo 0-100 μm) crece mucho más que en el bronce 0.4, y el porcentaje de poros grandes (intervalo $>1900 \mu\text{m}$) experimenta un descenso más brusco que el del bronce 0.4. Luego el bronce 0.6 parte de una distribución de valores con una tendencia mayor hacia los valores grandes que el bronce 0.4, acabando con una tendencia más acusada hacia los valores mucho más pequeños que el bronce 0.4.

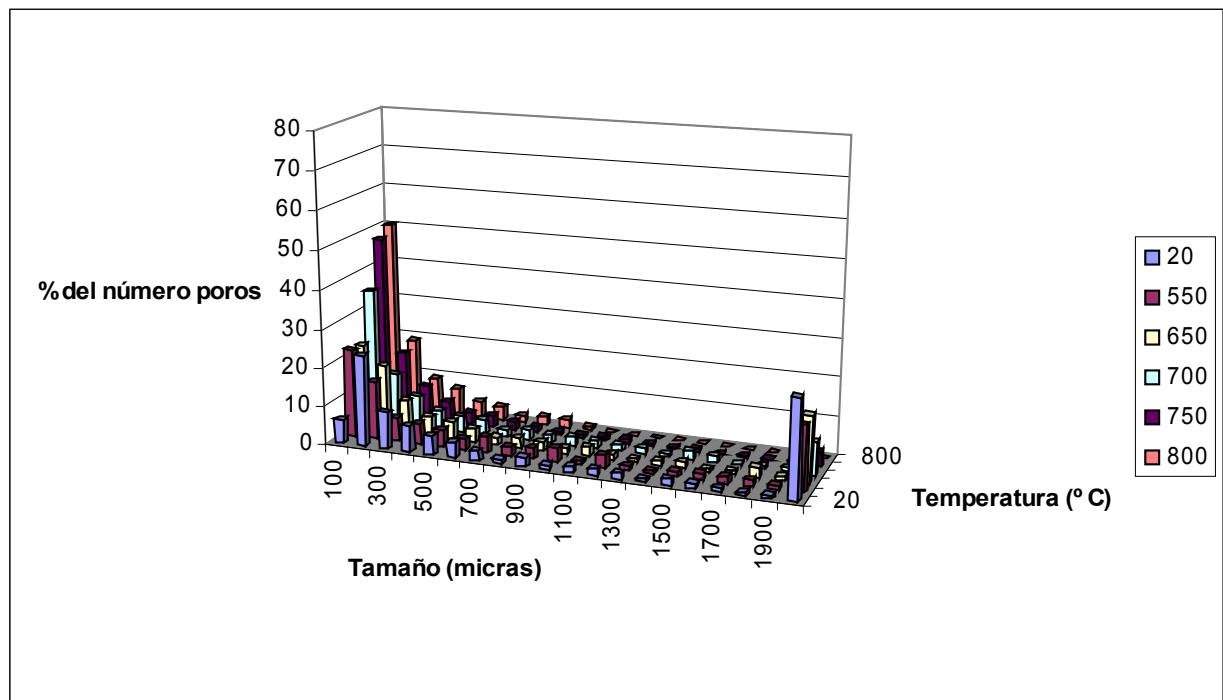


Figura 19: Distribución del tamaño de los poros en el bronce 0.4, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

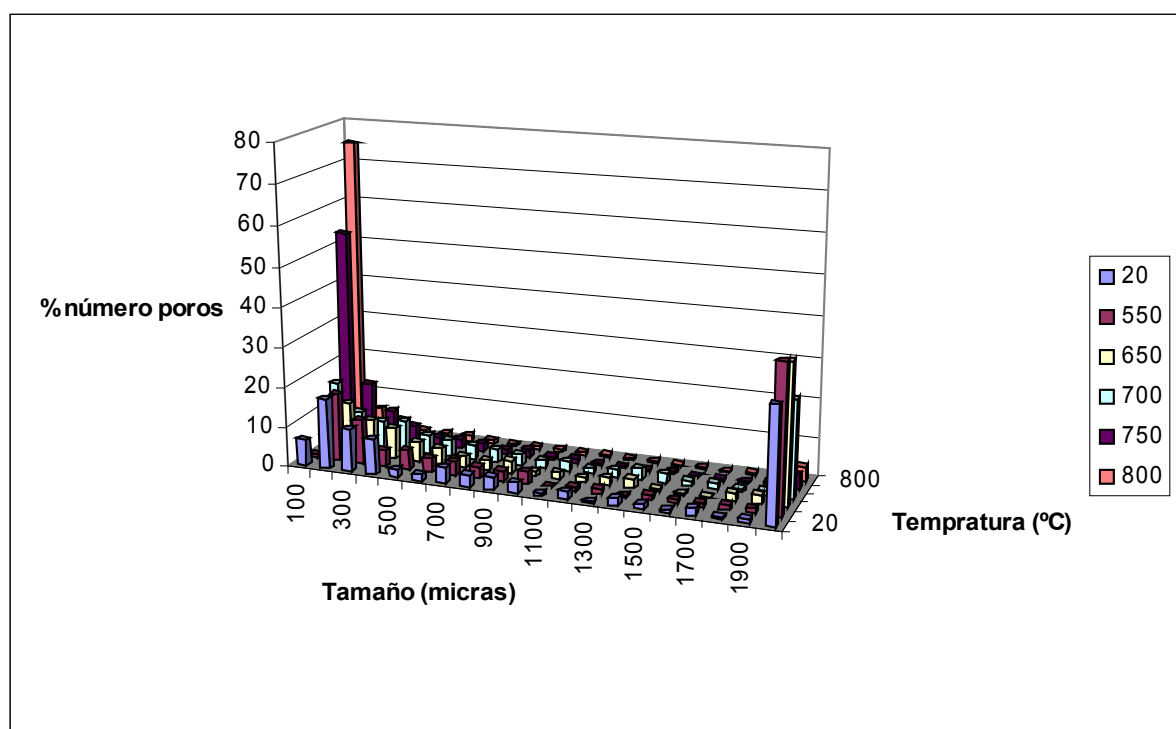


Figura 20: Distribución del tamaño de los poros en el bronce 0.6, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

Con el objetivo de profundizar en este aspecto, se ha realizado un estudio de la distribución del tamaño de los poros en todo el espectro de temperaturas, comparando con la media de cada distribución. El resultado se muestra en la Figura 21 y la Figura 22. Hay que

indicar que cada grupo de valores de tamaños se ha puesto en función de su media y en función de la temperatura de sinterización. El valor de la media se ha normalizado a 100 y los valores que hay por encima y por debajo se han normalizado en el intervalo de 100 a 200 por arriba y en el intervalo de 0 a 100 por abajo.

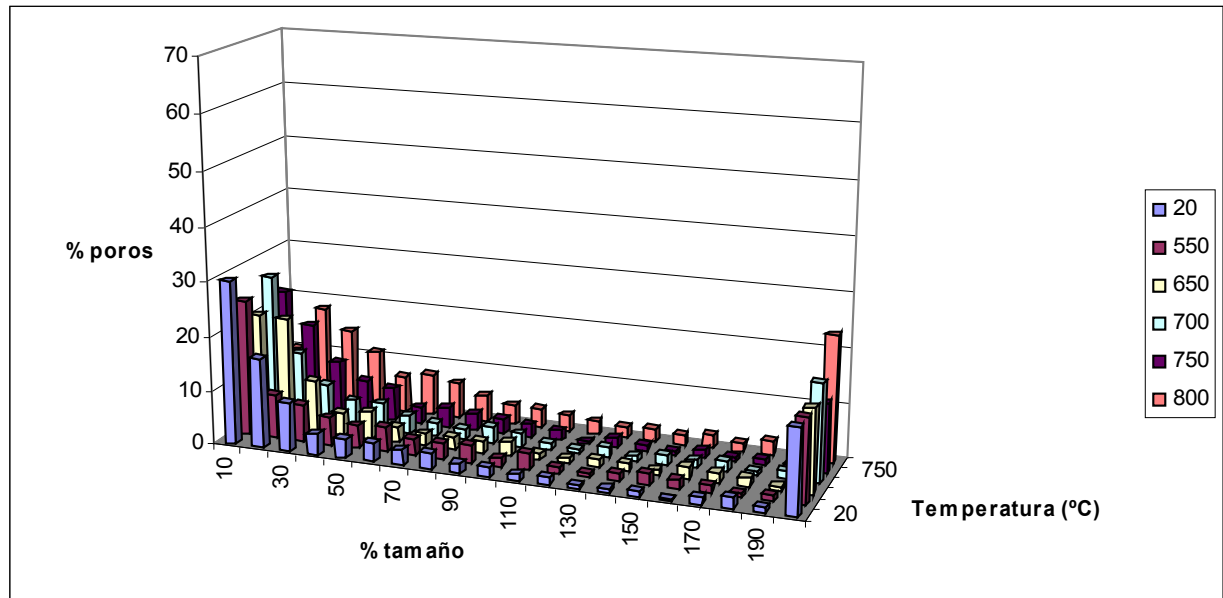


Figura 21: Dispersión del tamaño de los poros en el bronce 0.4, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

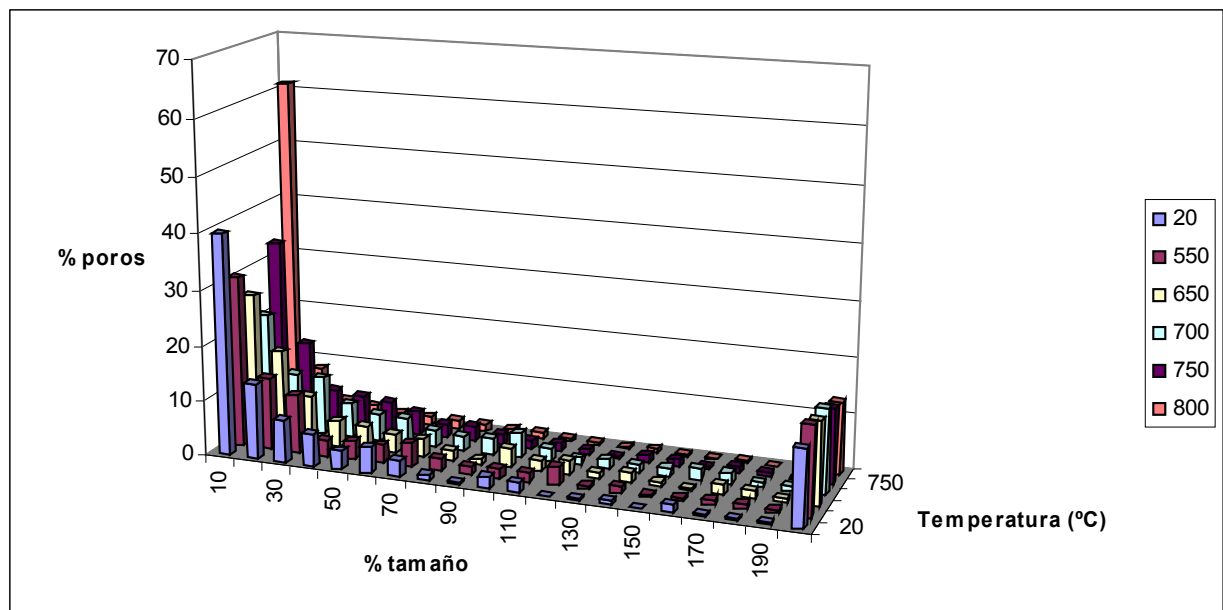


Figura 22: Dispersión del tamaño de los poros en el bronce 0.6, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

Se observa que como rasgo general los poros están distribuidos de forma polar, es decir los poros tienen o un tamaño bastante menor que la media, o bastante mayor, como se puede observar en las dos gráficas anteriores. Es reseñable que en el caso del bronce 0.4 la desviación es notablemente menor que en el caso del bronce 0.6. Esto se ve reforzado por una mayor homogenización de la distribución de tamaños en el bronce 0.40, lo cual indica

que en el bronce 0.4 la porosidad es notablemente más homogénea que en el bronce 0.6, donde la distribución de tamaños es prácticamente polar, casi sin ratios intermedios de valores. Por lo tanto, se puede concluir que a menor porosidad de partida, más homogénea será la misma para el caso del bronce.

Para completar el estudio de los tres principales indicadores de la densificación del material durante la sinterización, se ha realizado una comparación de los mismos, para ver como están relacionados. Esto se muestra en la Figura 23.

Se observa como el descenso de la porosidad se ve acompañado con un descenso del tamaño de los poros, lo cual lo incita, pero a su vez también se produce un incremento del número de poros, fenómeno que no incentiva la densificación del material. Al comparar el fenómeno de aumento de poros, con el de disminución del tamaño de los mismos, se explica este comportamiento teniendo en cuenta que al disminuir el tamaño de poro, y cerrarse de algún modo, pueden promoverse nuevos contactos internos entre los límites del propio poro, lo que da lugar a una división de los poros en otros tantos. Por otra parte, se observa que el descenso del tamaño de los poros es mucho más marcado que el aumento del número de poros, lo cual se ve traducido en una disminución de la porosidad general.

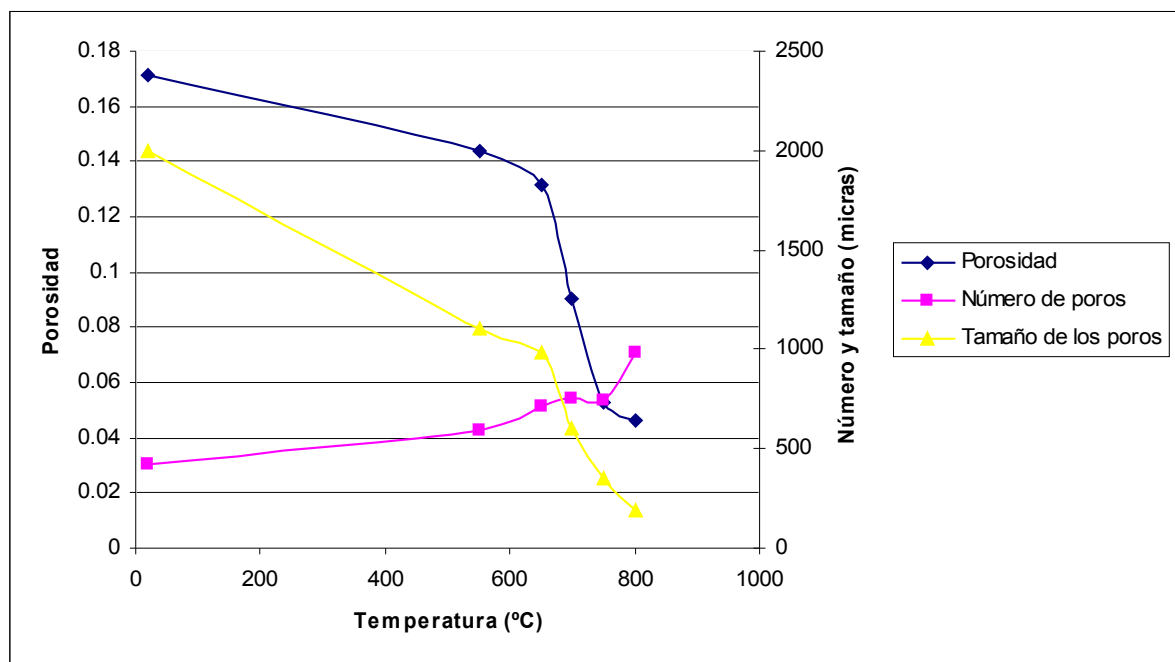


Figura 23: Comparación entre la porosidad, el número y el tamaño de los poros para el bronce 0.4

Con el fin de completar el estudio de la evolución de la sinterización en el bronce, se han estudiado otros parámetros, para encontrar una información adicional a la extraída mediante los resultados antes analizados, y también para reafirmar, en caso de que así sea, o poner en tela de juicio las conclusiones obtenidas anteriormente.

En primer lugar se ve la evolución del coeficiente de circunferencialidad con la temperatura de sinterización. Se trata de un indicador de lo aproximado que es la forma del poro a la de una circunferencia, teniendo el valor de 1 en caso de que sea una circunferencia, y disminuyendo el valor conforme se aleja de la forma.

Los resultados obtenidos sobre el coeficiente de circunferencialidad se representan mediante la Figura 24 y la Tabla 8.

Tabla 8: Coeficiente de circunferencialidad y desviación del mismo, del bronce, obtenido mediante análisis de imagen.

Temperatura	Bronce 0.4	Desviación	Bronce 0.6	Desviación
20	0.2748	0.2315	0.2735	0.2507
550	0.3552	0.2057	0.3102	0.2194
650	0.5117	0.2447	0.3795	0.2249
700	0.595	0.2498	0.5549	0.2573
750	0.6153	0.2457	0.5285	0.247
800	0.6306	0.214	0.6792	0.2156

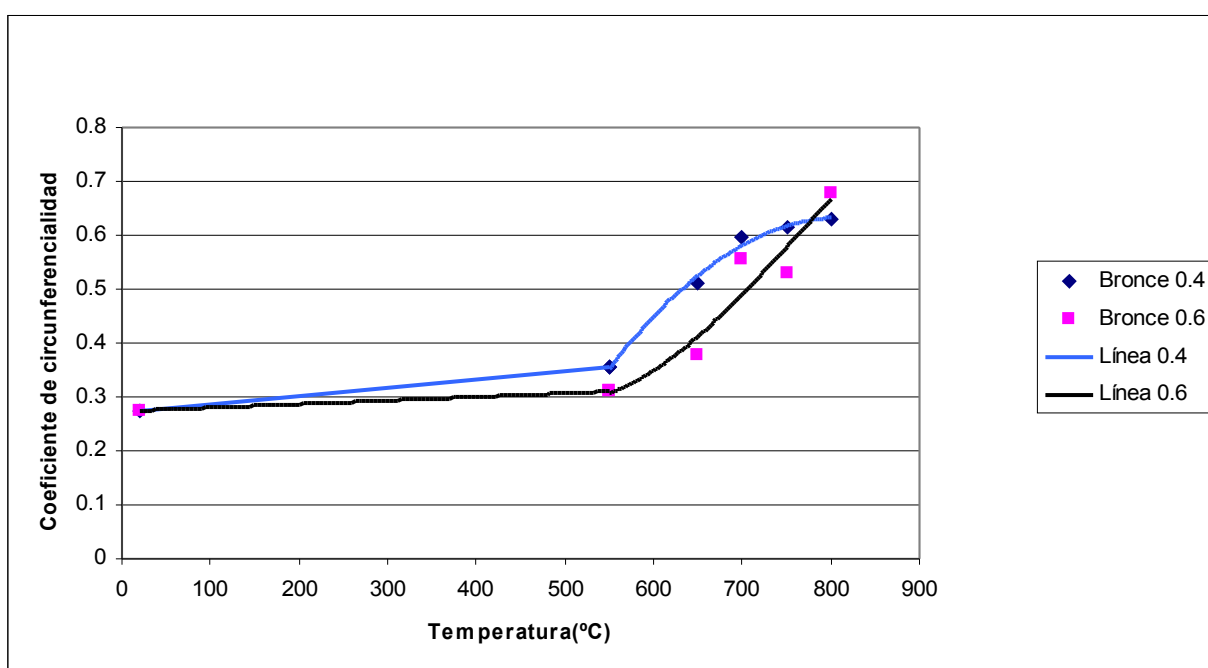


Figura 24: Evolución del coeficiente de circunferencialidad del bronce en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

Se observa que a medida que pasa el tiempo los poros son cada vez más circulares. La tendencia a la circunferencialidad es mayor en el bronce 0.6, que el bronce 0.4, siendo los poros para 800° C, más circulares en el bronce 0.6. Este fenómeno se puede explicar sabiendo que a menor tamaño de los poros, más circulares son. Observando la dispersión de los tamaños de los poros, se ve que la proporción de poros de pequeño tamaño va creciendo en el bronce 0.6, mientras que ocurre un fenómeno inverso en el bronce 0.4, por ello el coeficiente de circunferencialidad aumenta mucho más en el bronce 0.6 que el 0.4. De todas formas la desviación con respecto a la media es bastante grande, lo que es un indicador de que la forma de los poros no es demasiado homogénea.

Otro buen indicador de la evolución de la porosidad es el diámetro equivalente. Este se define como el diámetro que tendría el poro en caso de que su superficie fuera un círculo.

El resumen de los resultados obtenidos sobre el mismo se presenta en la Tabla 9 y la Figura 25.

Tabla 9: Diámetro equivalente y desviación del mismo, del bronce, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Bronce 0.4	Desviación	Bronce 0.6	Desviación
20	37.9731	33.2974	46.7124	50.0496
550	29.6627	22.8926	49.6083	42.1953
650	28.3772	21.5357	48.115	39.3177
700	21.9438	16.7733	35.1346	25.9534
750	16.3017	13.6063	15.7504	14.9787
800	14.1778	9.6963	11.4022	14.395

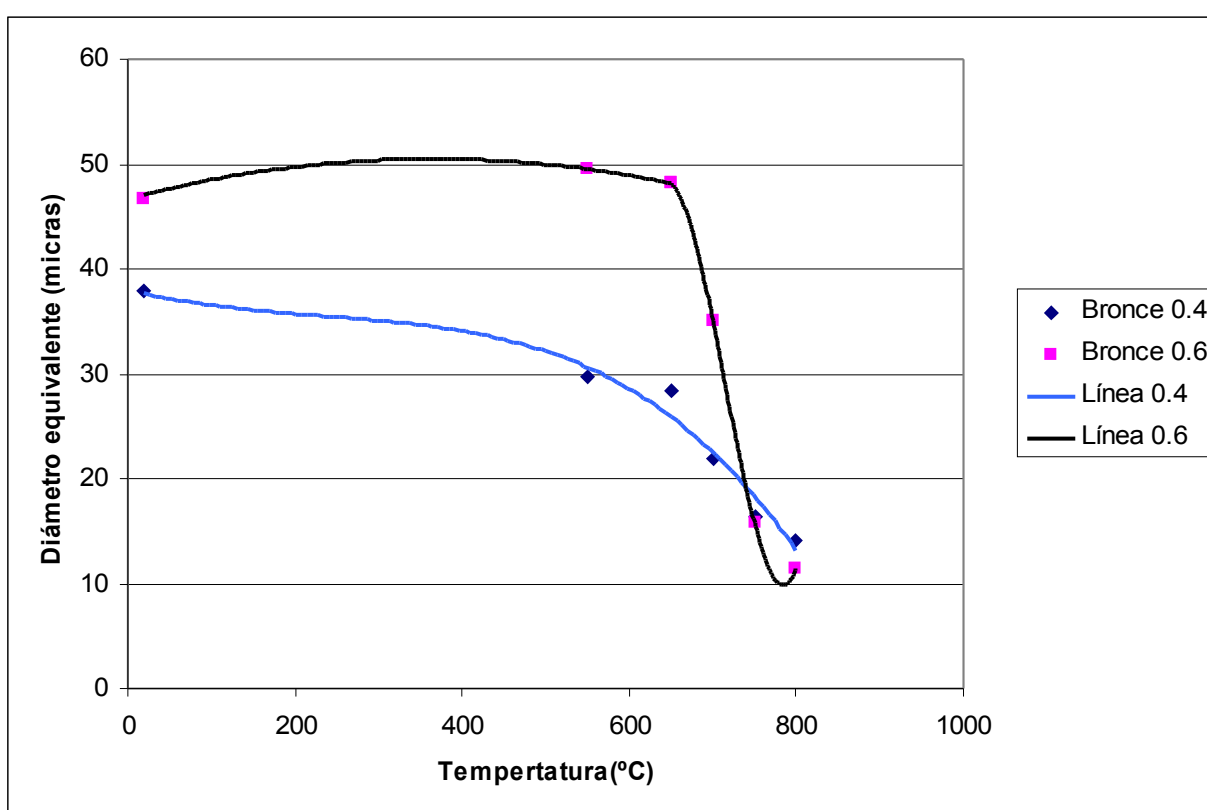


Figura 25: Evolución del diámetro equivalente del bronce en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen

El diámetro equivalente va descendiendo en función de la temperatura, de forma suave en el bronce 0.4 y de forma mucho más brusca en el bronce 0.6. Coincide este comportamiento con el de la porosidad, el tamaño de los poros y el número de poros, lo cual sirve de reafirmación de las discusiones antes esgrimidas. Hay una peculiaridad, que se sale del comportamiento mostrado en los otros aspectos de la porosidad: el diámetro equivalente es menor en las mayores temperaturas de sinterización en el bronce 0.6 que en el bronce 0.4. Esto se puede explicar viendo que el tamaño de los poros es muy parecido para estas altas temperaturas, mientras el coeficiente de circunferencialidad comienza a ser mayor en el bronce 0.6.

Con el fin de completar el estudio, se ha realizado una observación de las micrografías de la estructura de las probetas, sin segmentar y segmentadas con el programa de análisis de imagen, para cada una de las temperaturas de sinterización. Primeramente, se han analizado las imágenes obtenidas del bronce 0.4, a lo largo de las distintas temperaturas de sinterización.

- **Bronce 0.4 a 20° C**

En primer lugar, hay que explicar que a la hora de analizar la imagen se ha realizado un doble segmentado. Esto se debe a que hay partículas que han sido arrancadas en la preparación metalográfica de la muestra. Se aprecia en la Figura 26, que en la imagen segmentada aparecen algunas partículas que no aparecen en la imagen real de la probeta. Estas partículas aparecen porque hay evidentes muestras de desprendimiento de las mismas mediante un oscurecimiento mayor de la zona. Mediante este procedimiento podemos acercarnos de forma más fehaciente a la porosidad real de la probeta ya que se consigue eliminar gran parte de este error consecuencia de la preparación. Como efecto contrapuesto deforma los límites entre las partículas, introduce mayor número de poros del real y los deforma, aumentando la proporción de poros de pequeño tamaño, que en realidad no existen como tales, ya que en realidad forman parte de un poro mayor que se ha dividido por el proceso realizado a la imagen.

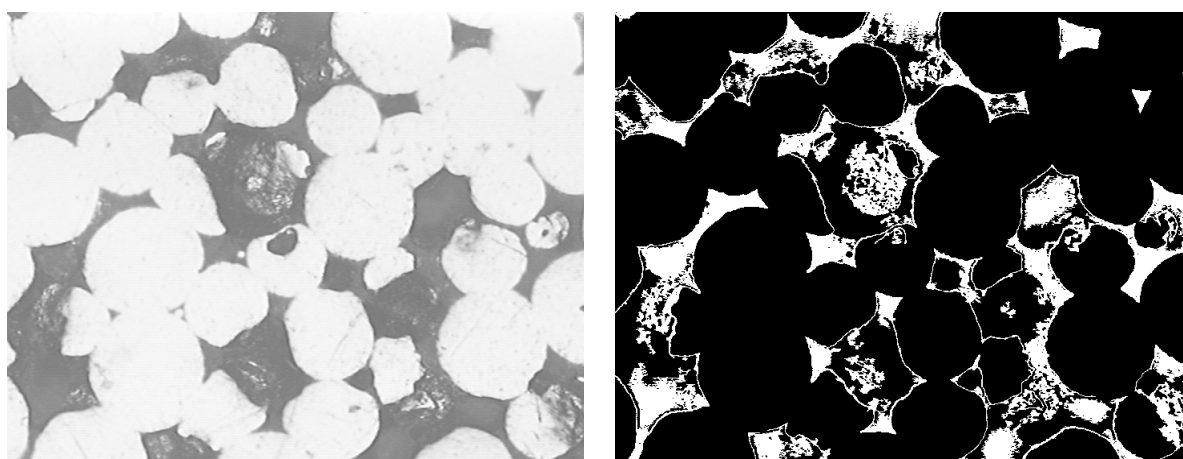


Figura 26: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sin sinterizar.

A la hora de analizar la imagen, se aprecia que los poros son de gran tamaño. Por norma general, su forma es bastante irregular, distando notablemente de la circunferencialidad. En la imagen, también se aprecia la existencia de abundantes contactos entre partículas, aunque hay importantes separaciones entre distintos grupos de partículas que están fuertemente agrupadas. También se observa, que el número de poros es pequeño y que el tamaño de los mismos es bastante grande. Sin embargo debido al doble segmentado, el número de poros no es tan pequeño y se reduce el tamaño de los mismos.

- **Bronce 0.4 a 550° C**

En la micrografía de la Figura 27, y en las posteriores, en el caso del bronce 0.4, únicamente se ha realizado un solo segmentado. Esto se debe a que ya no hay evidencias de desprendimiento de partículas, debido a que han sido sinterizadas las muestras y las

partículas han establecido cuellos de unión entre ellas. La realización de un solo segmentado salta a la vista en la imagen tratada ya que, como se puede apreciar en la Figura 27, hay una enorme similitud entre la imagen tratada y la original.

En este caso se observa como el número de poros ha ido aumentando fruto de la división de los del caso anterior, que eran de gran tamaño, aunque todavía aparecen poros de gran tamaño con formas irregulares. Se aprecia la aparición de poros de pequeño tamaño de forma redondeada. Por otra parte, se va vislumbrando una red de contactos entre partículas que ya prácticamente se extiende a todas las partículas, sin aparecer ya, grupos de partículas agrupadas entre si pero independientes del resto.

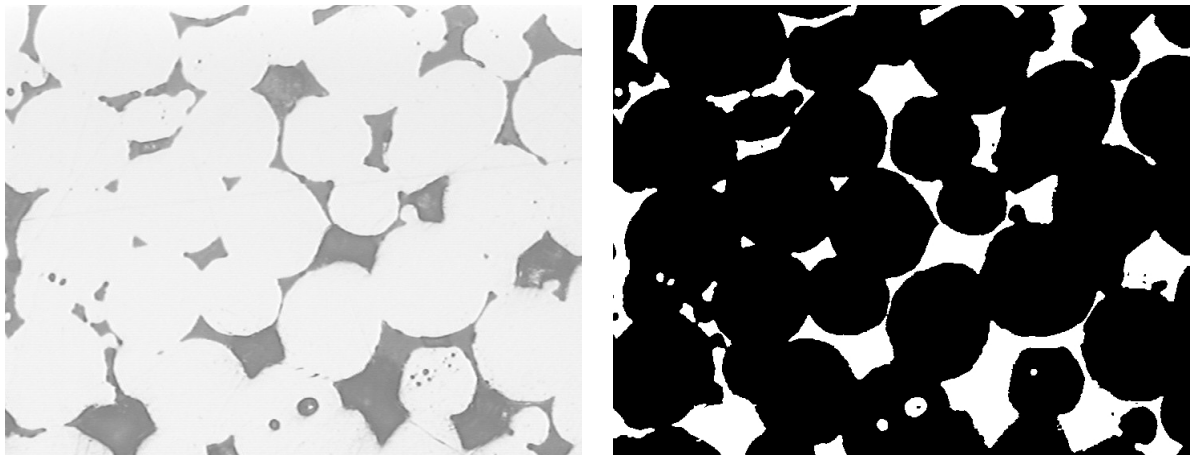


Figura 27: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sinterizado a 550° C.

- **Bronce 0.4 a 650° C**

Se observa que los poros más grandes comienzan a reducir su tamaño, y van redondeando sus formas, los poros de menor tamaño comienzan a proliferar, y se empiezan a difuminar las conexiones entre las partículas, aunque todavía se pueden apreciar. Todavía la porosidad se puede apreciar de forma notable. Se puede vislumbrar, como se van dividiendo los poros de mayor tamaño en otros menores, y van apareciendo nuevas conexiones entre las partículas menos conectadas. Todavía se puede observar como los poros forman una red de porosidad, con pequeñas separaciones entre ellos

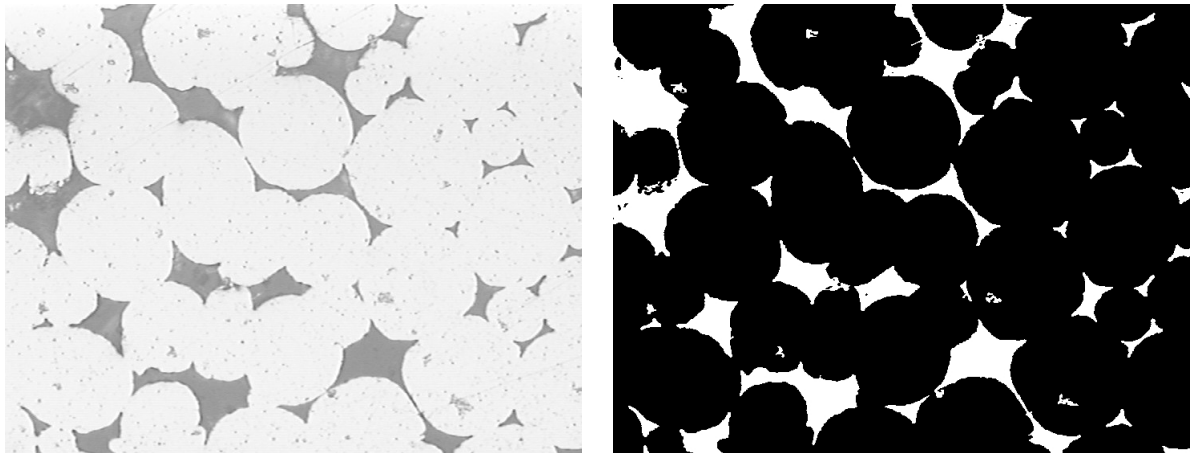


Figura 28: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sinterizado a 650° C.

- **Bronce 0.4 a 700° C**

Se presenta en la Figura 29 una micrografía de una muestra de bronce 0.4 a 700° C. A estas alturas la diferenciación entre las partículas ha desaparecido completamente, todavía se mantienen poros de notable tamaño, aunque bastante inferior a los grandes poros anteriores. Los poros van adquiriendo una forma cada vez más redondeada, y comienzan a estar bastante aislados unos de los otros, se aprecia que la porosidad ya es pequeña.

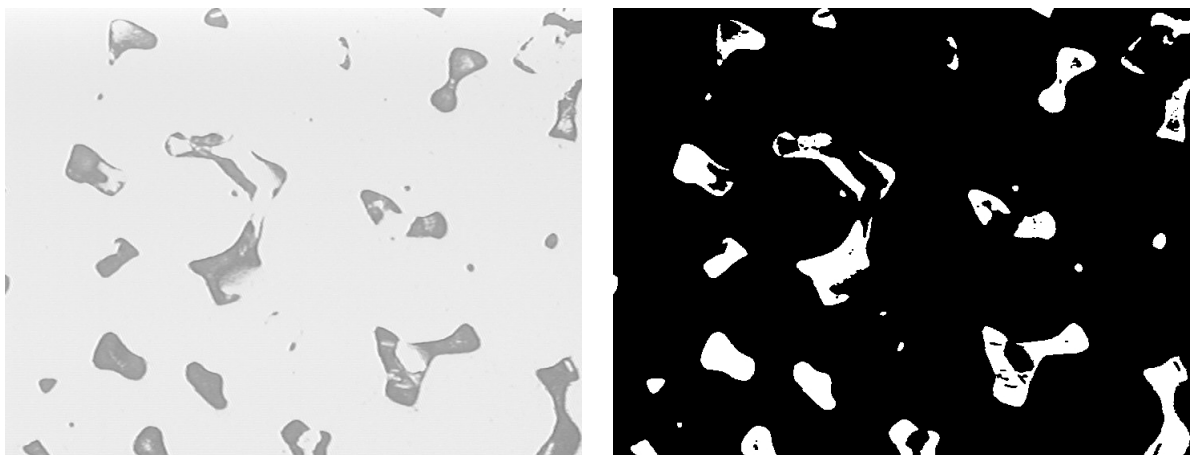


Figura 29: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sinterizado a 700° C.

- **Bronce 0.4 a 750° C**

Los poros van disminuyendo en tamaño. Se observa como los mayores poros de la Figura 29, son notablemente menores que los de Figura 30 . Por contra se observa que hay un mayor número de poros, muchos de ellos de pequeño tamaño. Las formas de los mismos siguen tendiendo a una mayor circunferencialidad. Por otra parte es destacable, que hay algunas zonas donde hay una gran acumulación de poros de pequeño tamaño, esto puede ser debido a la división de un poro de mayor tamaño en muchos poros de pequeño tamaño, quitando estas acumulaciones de pequeños poros, el resto de los poros se encuentran aislados unos de otros. Es de destacar, como a partir de un poro más grande, ahora se

generan varios poros pequeños, lo que corrobora lo establecido anteriormente del aumento del número de poros simultáneamente con la disminución de la porosidad total.

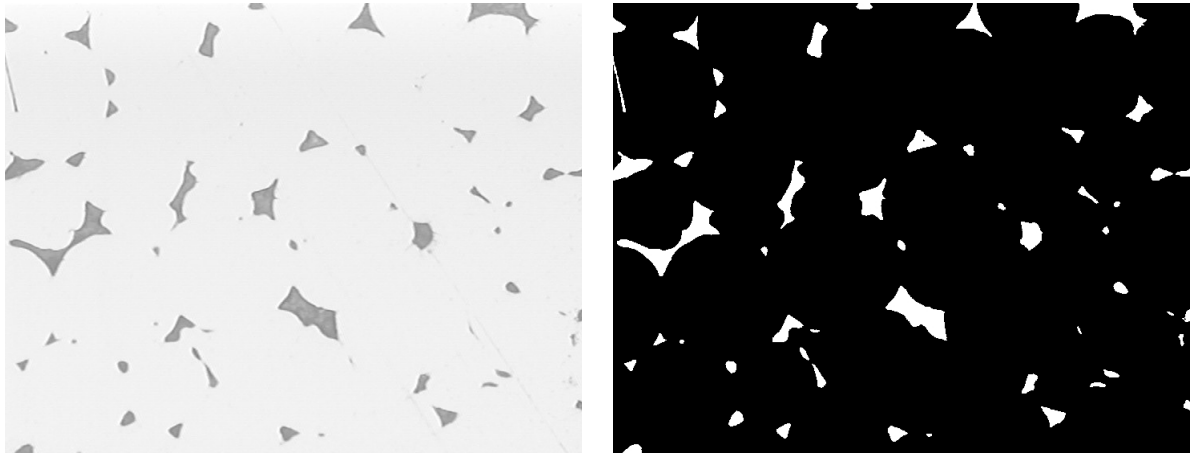


Figura 30: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sinterizado a 750° C.

- **Bronce 0.4 a 800° C**

En la Figura 31 hay un mayor número de poros pero todos de menor tamaño que en los casos anteriores, sus formas son más redondeadas y, en su mayor parte, se encuentran aislados unos de otros, permaneciendo definitivamente como porosidad residual. Persisten todavía algunos poros que podrán experimentar una división y eliminación de los mismos.

Una vez analizada la evolución del bronce 0.4, por medio de las imágenes se ha procedido a hacer lo mismo con el bronce 0.6.

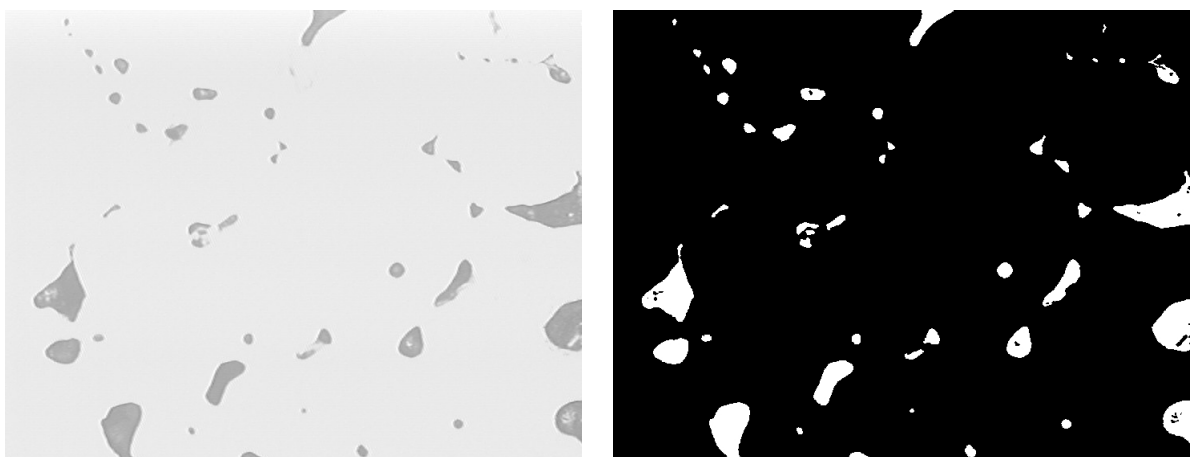


Figura 31: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.4, sinterizado a 800° C.

- **Bronce 0.6 a 20° C**

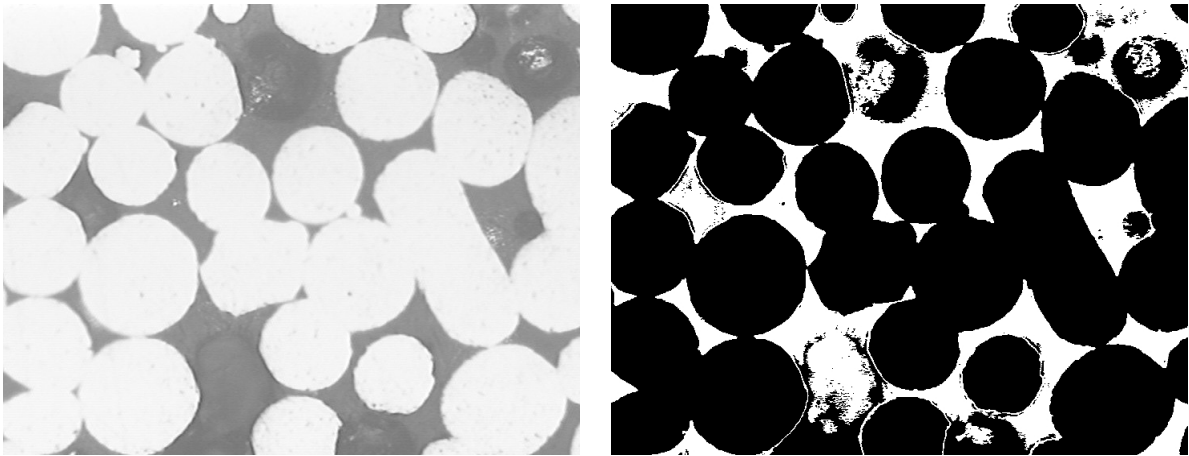


Figura 32: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sin sinterizar.

En la Figura 32, se muestra la probeta de bronce 0.6 sin sinterizar, en ella se aprecia que la conexión entre partículas es prácticamente nula, incluso bastante menor que en el caso del bronce 0.4 sin sinterizar, los poros son de gran tamaño, y prácticamente está todos interconectados, existiendo muy pocos poros de pequeño tamaño. En la imagen segmentada, tal y como ocurre en la Figura 26, aparecen partículas que no aparecen en la imagen real, esto es debido al doble segmentado. Por otra parte los poros no aparecen perfectamente delimitados, esto es debido al doble segmentado

- **Bronce 0.6 a 550° C**

La Figura 33, muestra la probeta sinterizada a 550° C de bronce 0.6, prácticamente la forma la porosidad y la unión entre partículas no ha variado apenas, quizás han aumentado algo las uniones, pero casi no se percibe, además el tamaño de los poros es prácticamente el mismo, por lo menos no se aprecia una variación notable.

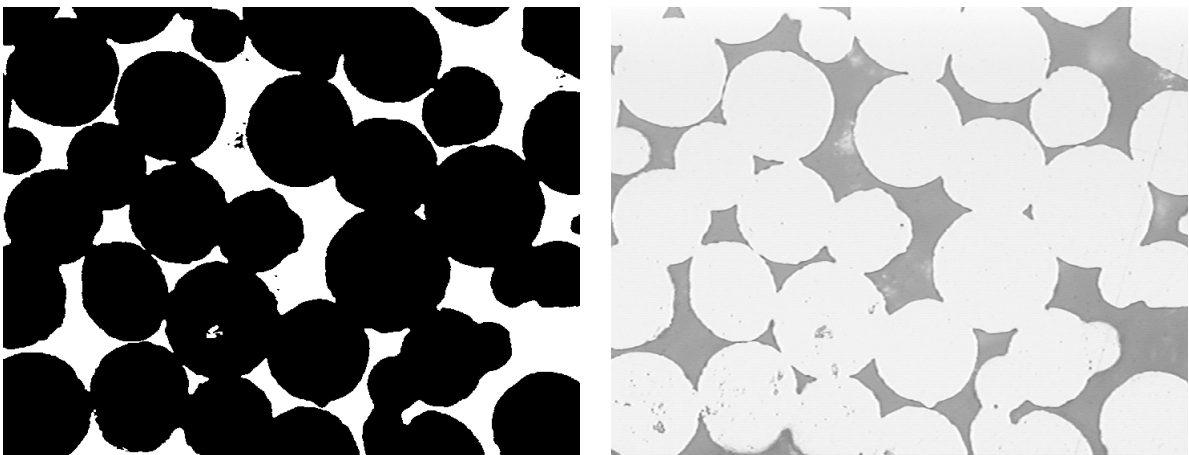


Figura 33: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sinterizado a 550° C.

- **Bronce 0.6 a 650° C**

El tamaño de los poros va disminuyendo pero muy levemente, su forma todavía es bastante irregular, comienzan a aparecer conexiones abundantes entre las partículas, pero todavía no se aprecia una red de partículas perfectamente conectadas. Los poros de pequeño tamaño prácticamente no existen, y el número de poros prácticamente no ha experimentado aumento perceptible. Esto se muestra en la Figura 34.

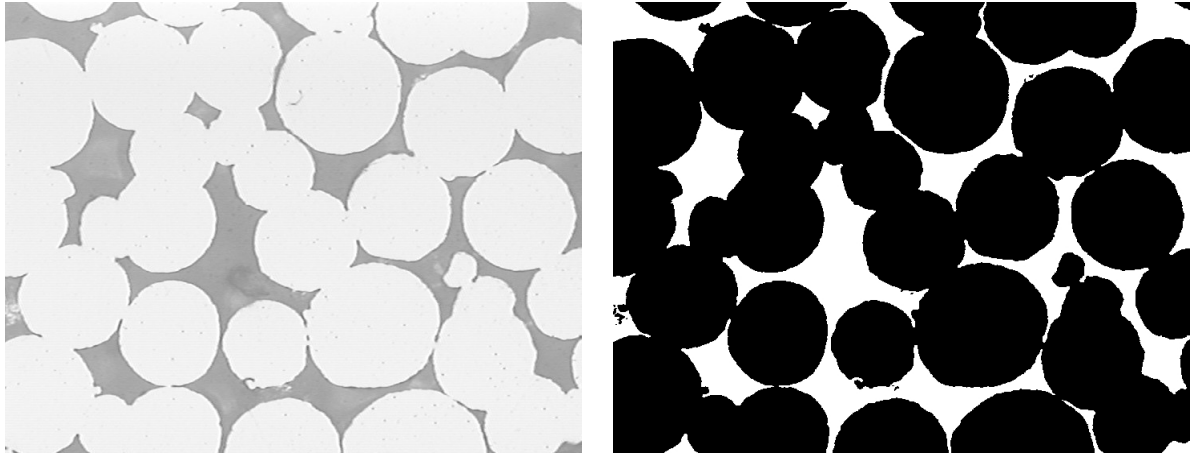


Figura 34: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sinterizado a 650° C.

- **Bronce 0.6 a 700° C**

La Figura 35 muestra la probeta de bronce 0.4 sinterizada a 700° C, en ella se aprecia como las uniones empiezan a ser mucho más notables, y las partículas cada vez se diferencian menos unas de otras. Por otro lado el tamaño de los poros ha disminuido notablemente, y se han ido redondean, han comenzado a aumentar en número debido a la división de los grandes poros, y comienzan a proliferar poros de pequeño tamaño. Los poros comienzan a estar cada vez más aislados unos de otros, pero todavía existen algunos poros de gran tamaño, pero que se puede apreciar como van a ir dividiéndose en poros más pequeños.

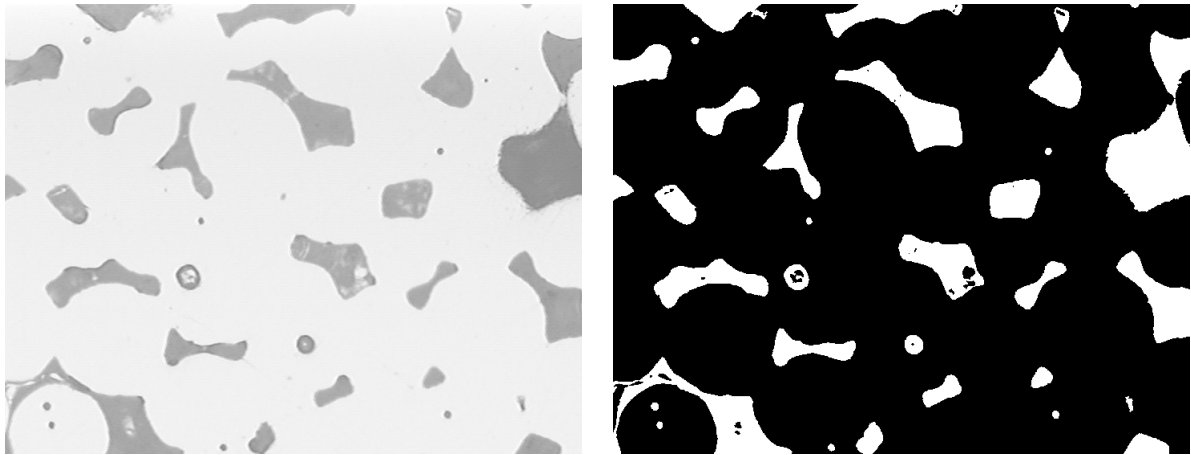


Figura 35: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sinterizado a 700° C.

- **Bronce 0.6 a 750° C**

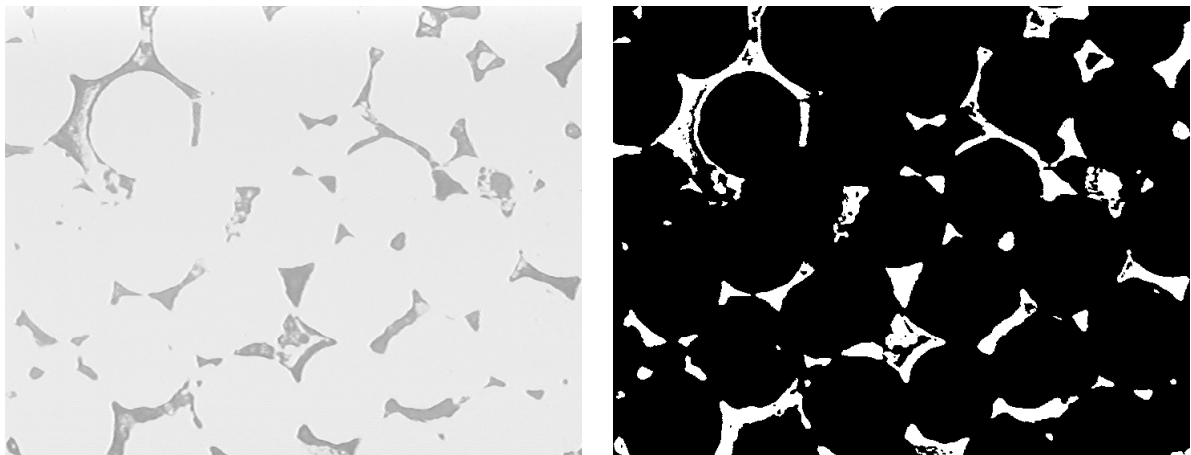


Figura 36: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sinterizado a 750° C.

En la Figura 36, se observa como las partículas todavía se aprecian, aunque levemente, los poros han disminuido de tamaño y han aumentado en número, prácticamente desapareciendo los de mayor tamaño y comenzando a proliferar en gran número los de pequeño tamaño. La forma de los poros comienza a ser cada vez más parecida a la de la circunferencia, aunque todavía se aprecian algunos de forma irregular. Todavía el aislamiento entre los poros es bastante atenuado.

- **Bronce 0.6 a 800° C**

En la Figura 37, se observa que la diferenciación entre partículas ha desaparecido totalmente, de modo que ya no se puede apreciar ninguna unión entre ellas. Los poros son muy redondeados y han aumentado en número y disminuido en tamaño, aunque aún persisten algunos de notable tamaño que están bastante aislados unos de otros al contrario que la porosidad de menor tamaño que parece estar agrupada en zonas.

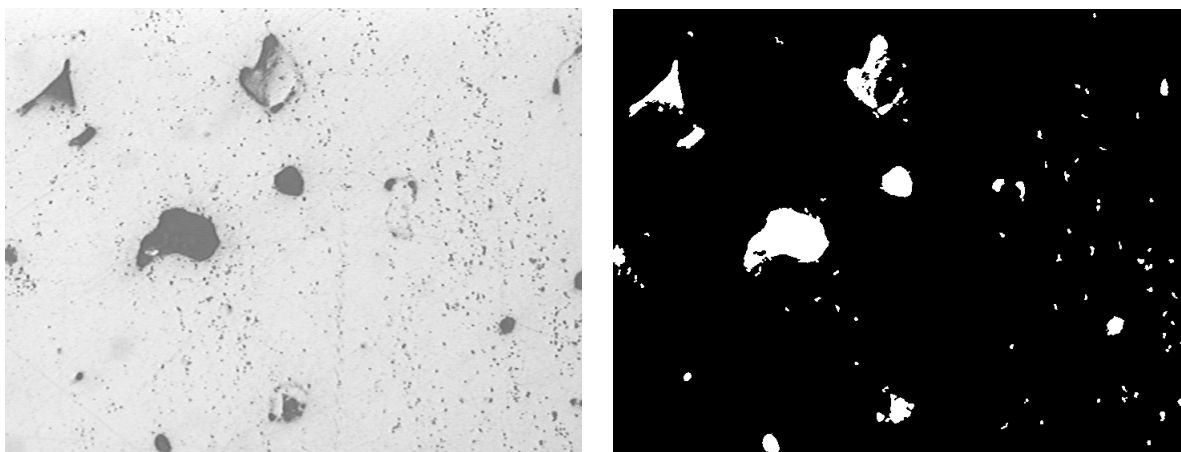


Figura 37: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del bronce 0.6, sinterizado a 800° C.

5.2.2 ALUMINIO

En la Tabla 10 y la Figura 38 se recogen los resultados, obtenidos mediante el análisis de imagen, de la porosidad del aluminio 0.4.

Tabla 10: Porosidades del aluminio 0.4, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Análisis de imagen	Desviación
20	0,194	0,0285
400	0,1529	0,0259
500	0,1164	0,0257
550	0,1051	0,0339
600	0,073	0,0168
650	0,0228	0,0116

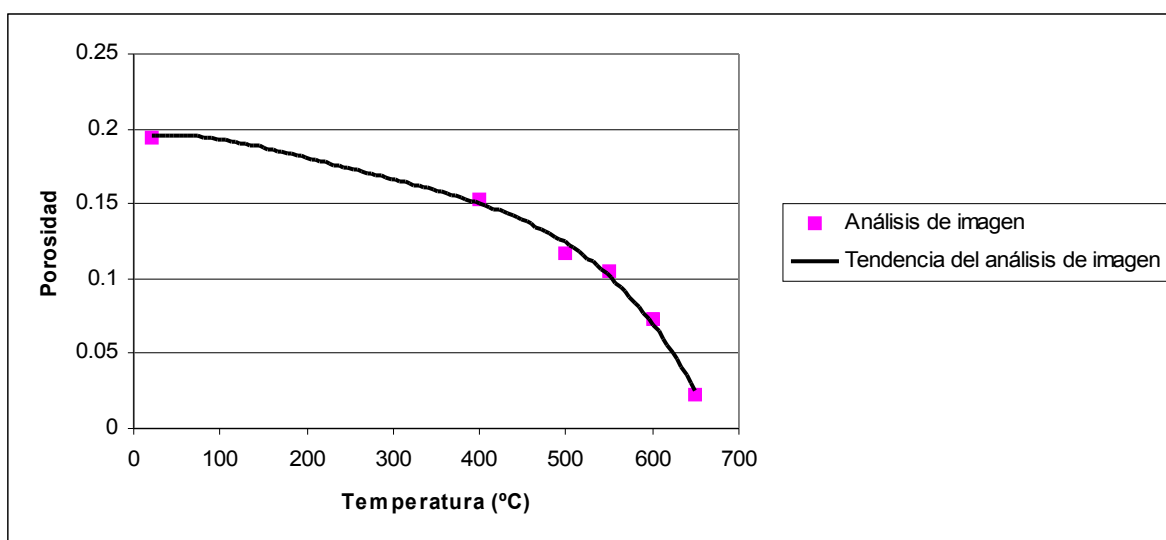


Figura 38: Evolución de la porosidad del aluminio 0.4 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

La porosidad presenta una pendiente descendente prácticamente lineal hasta llegar a los 500° C, a partir de esta temperatura de sinterización el descenso es más acusado, presentando una curva en la cual la pendiente de descenso de la porosidad es cada vez mayor.

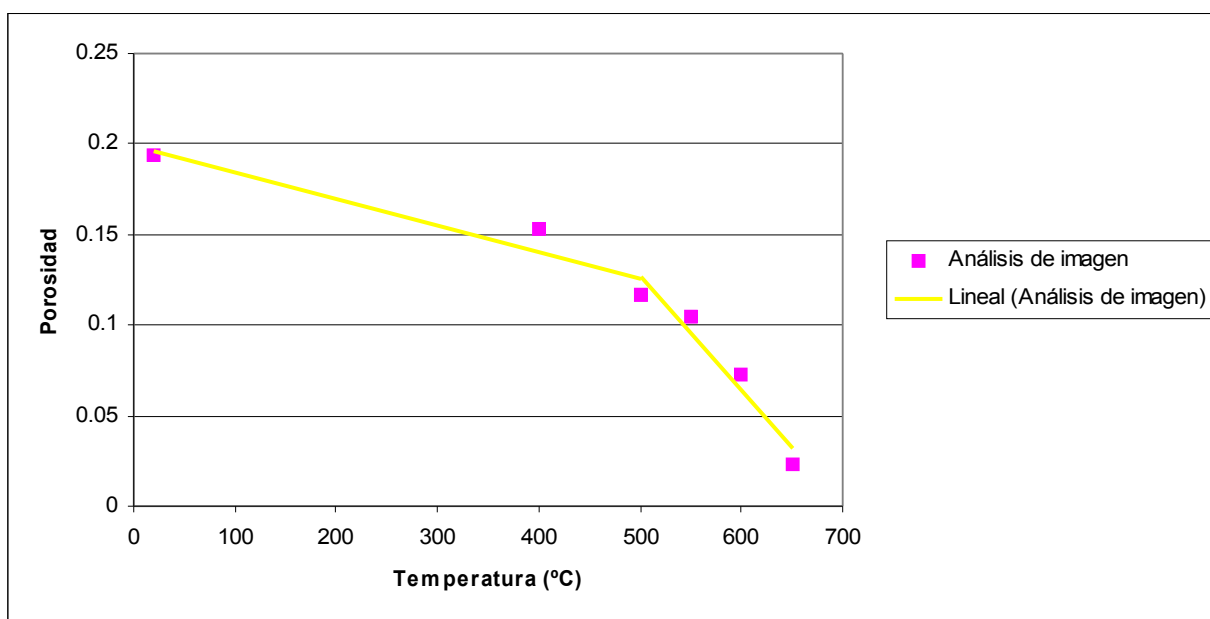


Figura 39: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del aluminio 0.4, mediante el análisis de imagen.

La desviación de la porosidad con respecto a la media va disminuyendo a medida que va aumentando la temperatura de sinterización, lo que puede ser un signo de que a medida que la temperatura de sinterización es mayor, mayor es la homogeneidad de la porosidad en la muestra.

En la gráfica se aprecia que, a pesar de que la pendiente de disminución de la porosidad va aumentando, lo hace muy ligeramente, solo se produce un cambio apreciable

en el paso por los 500° C. Luego se puede aproximar, la evolución de la porosidad, mediante dos rectas de pendiente constante.

La pendiente de la recta que va desde 20° C hasta los 500° C tiene un valor de $1 \cdot 10^{-4}$, y a partir de 500° C el valor se incrementa hasta llegar a $6 \cdot 10^{-4}$. El incremento experimentado en la pendiente no es notable, al contrario de lo que ocurría en el caso del bronce. Esto se puede achacar a que los datos obtenidos para la probeta sin sinterizar no son del todo fiables, ya que no se le pudo aplicar una doble segmentación a la misma debido a que el contraste entre partículas y poros es muy pequeño, con lo que no se pudieron definir bien las partículas desprendidas, quedando un valor de la porosidad mayor del que tendría en realidad. Por lo tanto la pendiente de la primera recta en realidad sería menor que la obtenida, aunque no se puede determinar si lo suficientemente pequeña como para poderla considerar constante.

Una vez estudiados los resultados de la porosidad del aluminio 0.4, se realiza el estudio de la porosidad para el aluminio 0.6. Para ello se dispone de los resultados del análisis de imagen que están recogidos en la Figura 40 y la Tabla 11.

Se aprecia un acusado descenso de la porosidad en el primer tramo, aunque esta es una apreciación falsa debido a que no se ha podido realizar el doble segmentado al analizar la probeta. Al observar la probeta al microscopio se apreciaron muchos indicios de partículas desprendidas, por lo que se deduce que el error debe ser bastante notable en la porosidad de la probeta sin sinterizar. En función de los resultados obtenidos para el resto de casos, se deduce que el valor de la misma cuando no ha sido sinterizada debe estar muy próximo al de la probeta sinterizada a 400° C. A partir de los 500° C, se produce un descenso notable de la porosidad de índole prácticamente lineal, lo que indica una gran similitud con el comportamiento experimentado por el aluminio 0.4.

Tabla 11: Porosidades del aluminio 0.6, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Análisis de imagen	Desviación
20	0,4374	0,124
400	0,2321	0,0312
500	0,21	0,0361
550	0,1648	0,0268
600	0,1012	0,0189
650	0,0441	0,033

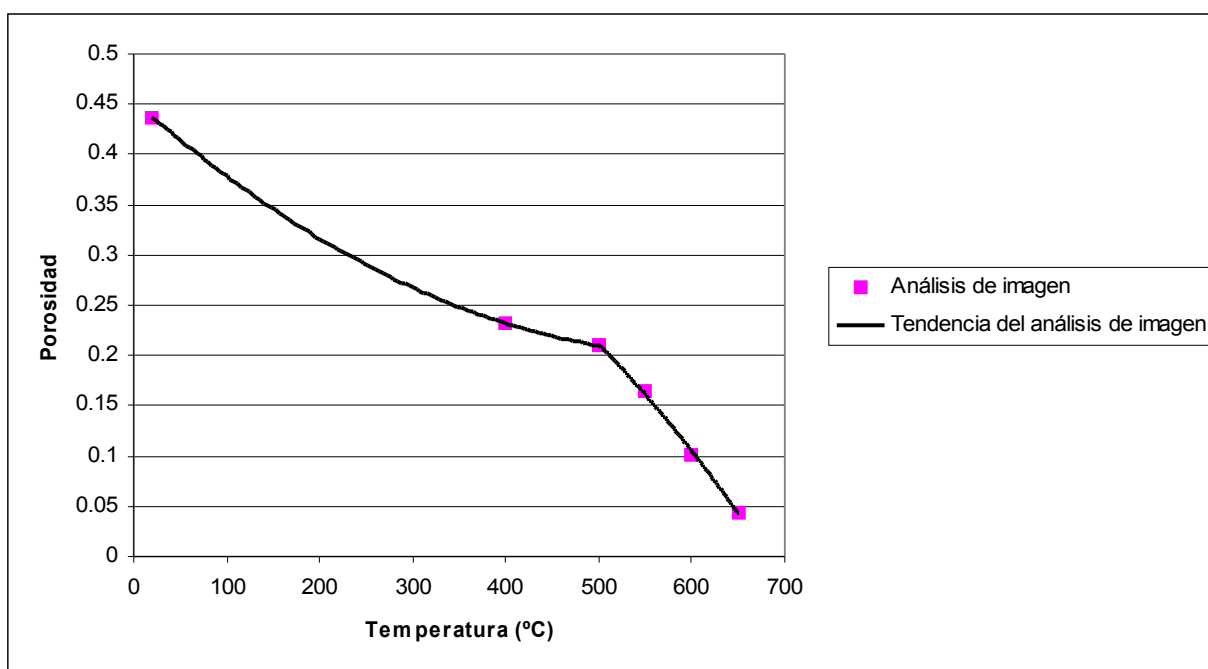


Figura 40: Evolución de la porosidad del aluminio 0.6 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

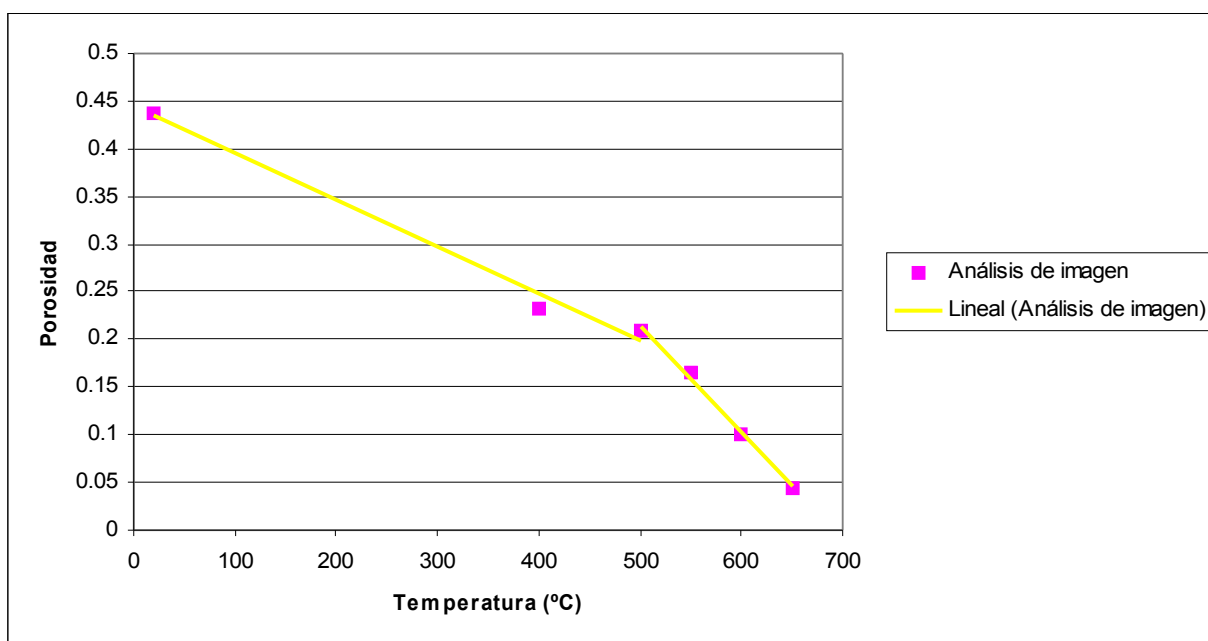


Figura 41: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del aluminio 0.6, mediante el análisis de imagen.

La dispersión de los resultados con respecto a la media es enorme para la probeta sin sinterizar, resultado lógico por lo anteriormente expuesto. A medida que aumenta la temperatura de sinterización, disminuye la dispersión, con la excepción de la temperatura de

sinterización mayor. Esto se ha considerado un error puntual, ya que la tendencia a la disminución de la dispersión, se manifiesta claramente para el resto de las temperaturas de sinterización en el aluminio 0.6 y en todo el rango de resultados del aluminio 0.4.

Siguiendo el procedimiento de estudio, varias veces aplicado, se ajusta la evolución de la porosidad mediante una recta, resultado que se muestra en la Figura 41. Se observa que el aumento de la pendiente de descenso de la porosidad es muy leve a partir de 500° C, con respecto al tramo anterior, pero esto se debe al error anteriormente comentado. Debido al elevado error la pendiente del primer tramo no se va a tener en cuenta. El valor de la pendiente del segundo tramo de descenso de la porosidad es de $11 \cdot 10^{-4}$. Se puede suponer que la otra pendiente sería prácticamente nula, o cuanto menos de un valor cercano a 0, lo cual se deduce de la observación de los valores de la porosidad para 400° C y para 500° C.

Una vez estudiadas las distintas evoluciones en los tratamientos del aluminio, se comparan para el aluminio 0.4 y el 0.6, con el fin de sacar conclusiones generales sobre el comportamiento experimentado en ambos casos. Para apreciar bien la comparación, se han recogido los resultados de la evolución de la porosidad de ambos aluminios en la Figura 42.

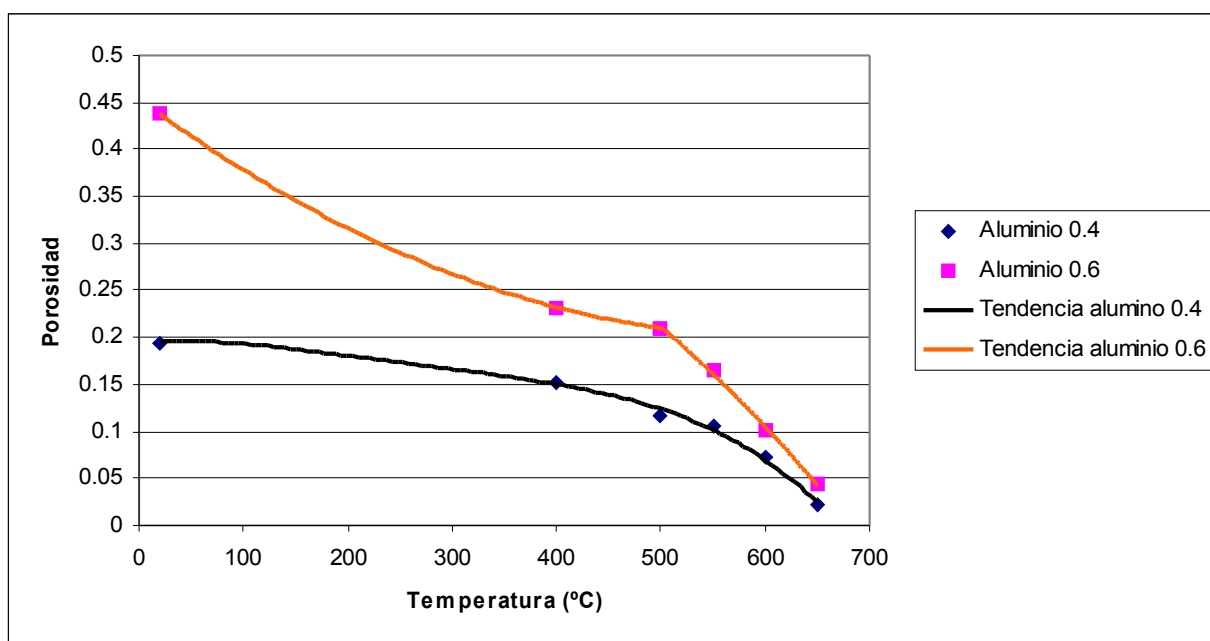


Figura 42: Comparación de la evolución de la porosidad del aluminio 0.4 con respecto a la del aluminio 0.6.

Teniendo en cuenta solamente la zona de resultados a partir de 500° C, puesto que es la que tiene unos resultados más fehacientes, se observa que la pendiente en el aluminio 0.6 es prácticamente una recta, mientras que en el caso del de 0.4 la pendiente va evolucionando, incrementando cada vez más, pero siempre con valores menores a la que tiene el aluminio 0.6. El comportamiento debe ser así, ya que la disminución de porosidad debe ser más acusada en el caso de mayor porosidad de partida.

A pesar de que la pendiente del aluminio 0.4 siempre es menor que la del de 0.6, sus valores son bastante similares, tal como se apreció al hacer la linealización de la pendiente en la Figura 39 y la Figura 41. La igualdad de las pendientes, se hace patente sobre todo en

el último tramo de las curvas de evolución de la porosidad de ambos aluminios, donde su valor es prácticamente el mismo.

Por otra parte, si se desprecian los errores introducidos por la porosidad de las probetas sin sinterizar, se intuye que la evolución es muy suave en el primer tramo, y que es prácticamente similar en ambos casos, aunque un poco más acusada en el caso del aluminio 0.4, fenómeno predecible ya que en el caso del de menor porosidad de partida, hay una mayor tendencia a la eliminación de la porosidad.

La dispersión de los resultados con respecto a la media, es mayor en el caso del aluminio 0.6 que en el caso del 0.4, luego en el caso del menos poroso la homogeneidad en la porosidad es mayor.

Para continuar analizando el fenómeno de sinterización en el aluminio, se estudian las características de los poros. En primer lugar se estudian los resultados obtenidos en cuanto al número de poros, que se recogen en la Figura 43 y la Tabla 12.

Tabla 12: Número de poros del aluminio, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Aluminio 0.4	Aluminio 0.6
20	4185	66
400	931	559
500	1468	1056
550	1532	1499
600	2086	1560
650	1600	1287

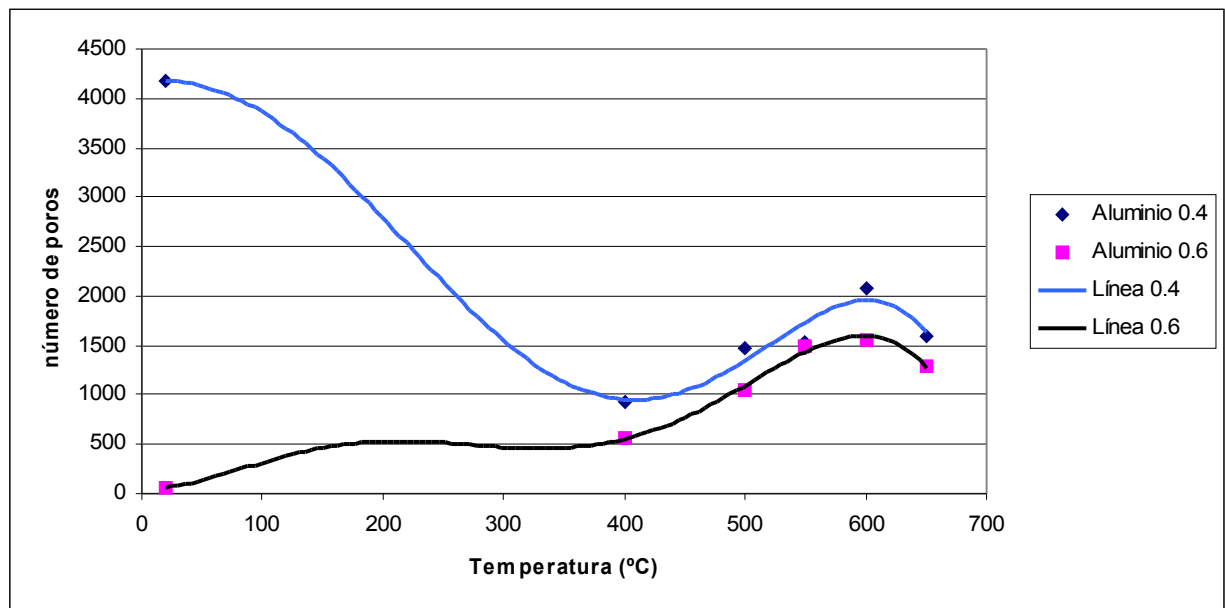


Figura 43: Evolución del número de poros en el aluminio, en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante el análisis de imagen.

Como ya se ha explicado antes, los puntos que indican el número de poros para el caso en que no existe sinterización, contienen un elevado error y no pueden ser tomados en consideración, su valor real debería ser muy cercano al valor de 400° C. La evolución hasta esta temperatura prácticamente debería ser una constante, o un aumento de poros apenas significativo. A partir de 400° C, la evolución del número de poros es prácticamente pareja en ambos casos, con incremento ligeramente superior en el aluminio 0.6.

Al final de la curva aparece un descenso del número de poros, comportamiento, que tal y como indica la teoría, sucede en el grado máximo de densificación, quedando solo porosidad residual. Este fenómeno no ocurrió en el caso del bronce porque todavía no había llegado a la zona de máxima densificación de la porosidad, aunque hubiera sucedido si el tiempo de sinterización hubiera sido mayor.

En este caso la aproximación lineal de la curva no es aconsejable, ya que en el último tramo se produce un descenso en la pendiente, por lo que una recta no definiría bien el comportamiento en la evolución del número de poros, por lo tanto se ha optado por tomar dos rectas, una que va de 400° C hasta 600° C y otra que va desde los 600° C hasta los 650° C, considerando constante la evolución hasta los 400° C. El ajuste está recogido en la Figura 44. No se ha representado el primer tramo, que se considera constante, debido a que los dos puntos que están a una temperatura de 20° C tienen muchísimos errores, y no sería nada aclaratorio del comportamiento real, luego se ha preferido suprimir este tramo.

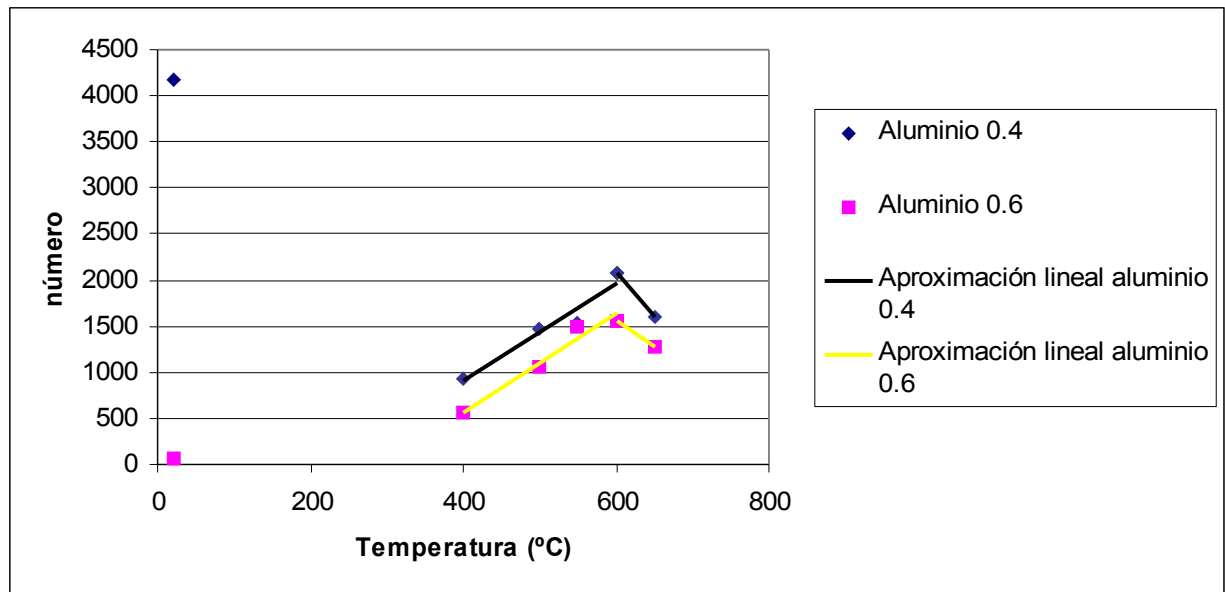


Figura 44: Aproximación lineal de la evolución del número de poros en el aluminio, obtenida mediante análisis de imagen.

La pendiente del tramo que va desde 400° C hasta 600° C tiene un valor de 5,3434 para el aluminio 0.4, y de 5,3314 para el aluminio 0.6. Los valores son prácticamente similares en ambos casos, luego la evolución del número de poros, en este caso, no depende de la porosidad de partida. De 600° C a 650° C, la pendiente tiene un valor de 9,72 para el caso del aluminio 0.4, y de 5,46 para el aluminio 0.6. En esta zona la pendiente si es un poco mayor para el caso de menor porosidad de partida, lo cual puede deberse a que hay menos poros residuales en este caso, por lo que hay más poros que se eliminan.

La evolución del número de poros, va acompañada con una evolución del tamaño de los mismos, al incrementarse la temperatura de sinterización. Los datos recogidos sobre este parámetro se recogen en la Figura 45 y la Tabla 13. A la hora de representar la evolución del tamaño de los poros se ha suprimido la zona que va desde 20° C hasta los 400° C, por los errores que aparecen debido a la imprecisión de los puntos en los que no hay sinterización.

El tamaño de los poros disminuye de manera más acusada para el caso del aluminio 0.6, que para el caso del aluminio 0.4, esta evolución debe ser así ya que parte de una porosidad mucho mayor. Además como la caída de la porosidad es mayor en el aluminio 0.6 y el número de poros incrementa casi de la misma forma en los dos casos, es necesario un descenso más acentuado del tamaño de los poros para reflejar la evolución de la porosidad. La tendencia de la disminución del tamaño de los poros, se va atenuando a medida que aumenta la temperatura de sinterización, en ambos casos, aunque es más acusada en el caso del aluminio 0.6.

Se observa que la dispersión de los resultados con respecto a la media es muy grande, lo que indica una baja representatividad de la media. La desviación va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura, lo que indica que el tamaño de los poros se va homogenizando cuanto mayor es la sinterización de la probeta. También se observa, que la desviación es mayor en el caso del aluminio 0.6 que en el de 0.4, esto puede ser debido a que al tener más porosidad el tiempo para homogenizar el tamaño de los poros ha sido menor que en el caso del aluminio que partía con menor porosidad de partida.

Tabla 13: Tamaño (μm) de los poros del aluminio y la desviación, obtenido mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Aluminio 0.4	Desviación	Aluminio 0.6	Desviación
20	229,91	1240,71	2172,42	3158,02
400	814,82	2059,18	2059,3	5136,32
500	393,27	840,3	986,35	3289,17
550	340,2	968,67	545,5	1701,18
600	173,57	423,88	321,85	882,61
650	70,7	192,01	169,9	593,58

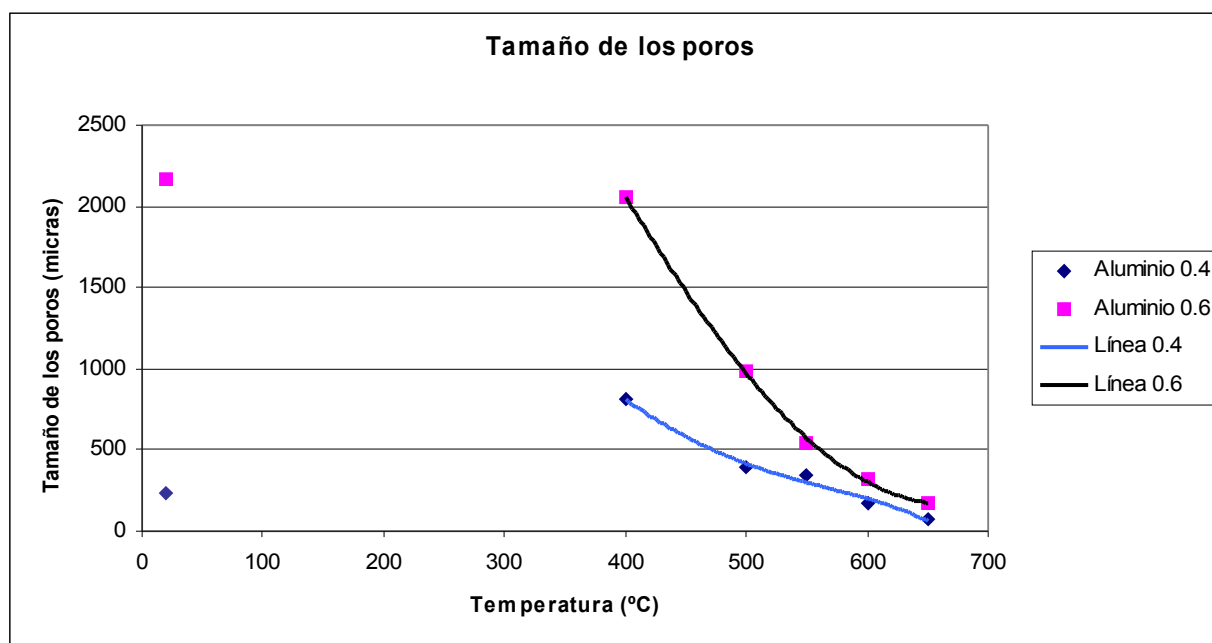


Figura 45: Evolución del tamaño de los poros en función de la temperatura de sinterización, para el aluminio, obtenida mediante análisis de imagen.

Suponiendo constante el tramo que va desde 20° C a 400° C, se puede realizar una linealización del fenómeno de disminución del tamaño de los poros, sin que el error sea muy notable. La simplificación del fenómeno, a una evolución lineal se representa en la Figura 46.

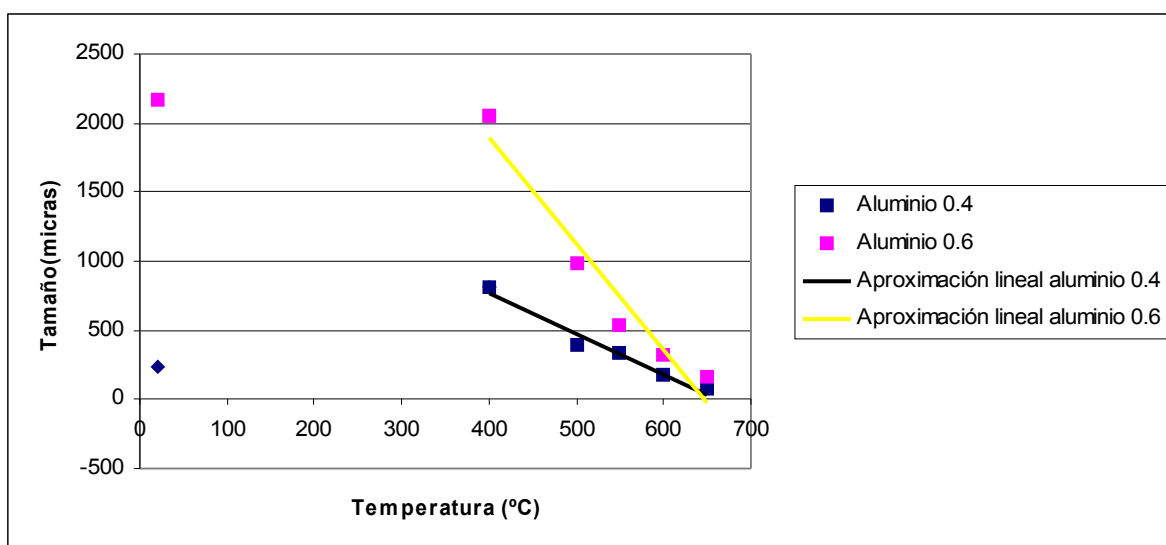


Figura 46: Aproximación lineal de la evolución del tamaño de los poros en el aluminio, obtenida mediante análisis de imagen.

La pendiente es más acusada en el caso del aluminio 0.6 que el del aluminio 0.4, tal y como se observaba en la Figura 45. Con vistas a un posible modelado del fenómeno se dan los valores de la pendiente, que el caso de porosidad de partida igual a 0.4 es de 2,9247, y el de 0.6 es de 7,6838.

Debido a la enorme desviación existente en el tamaño de los poros, se ha estudiado el comportamiento de esta propiedad. Para ello se ha hallado la distribución de los tamaños de los poros con respecto a la media, y a unos intervalos absolutos de tamaño, con el fin de poder determinar fehacientemente la evolución del tamaño de los poros.

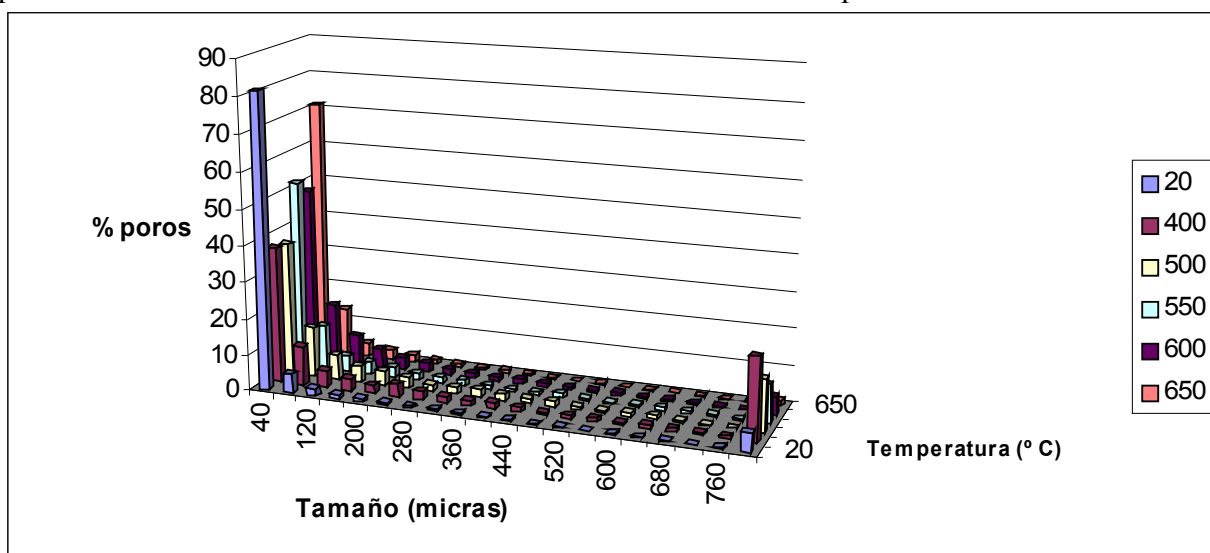


Figura 47: Distribución del tamaño de los poros en el aluminio 0.4, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

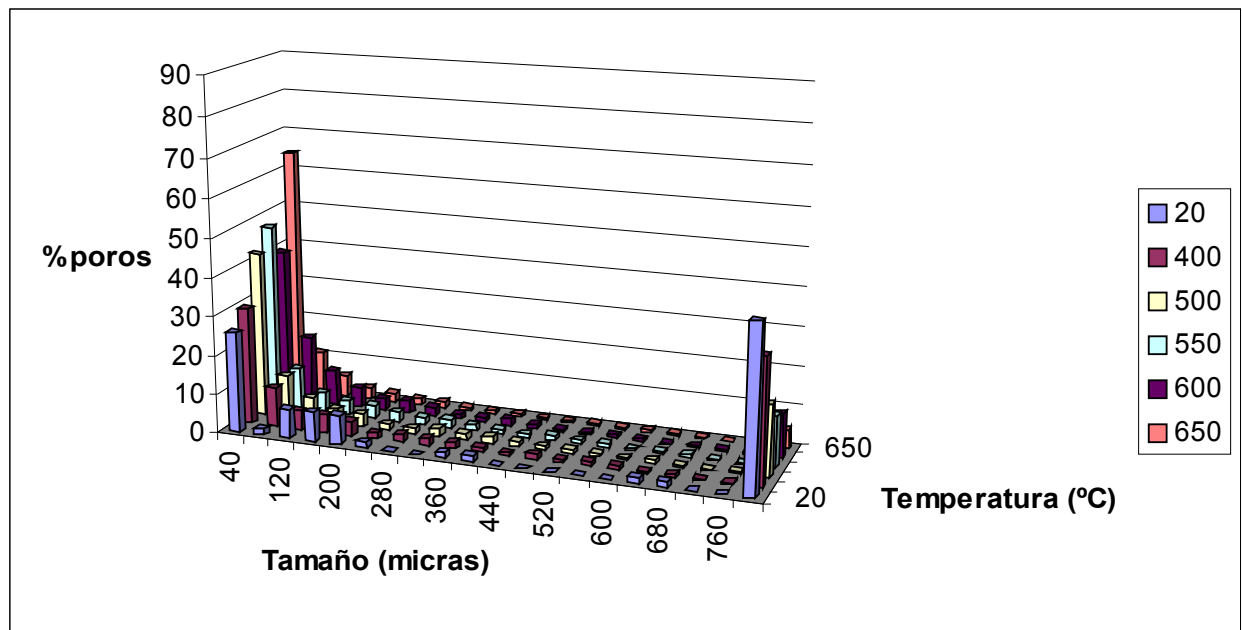


Figura 48: Distribución del tamaño de los poros en el aluminio 0.6, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

En la Figura 47 y la Figura 48 se recoge la distribución de tamaños absoluta, cuyo objeto es representar la evolución real del tamaño de los poros. En ambas figuras se aprecia una disminución global del tamaño de los poros. Los poros de menor tamaño (intervalo 0-40 μm) van aumentando a medida que aumenta la temperatura, mientras que los de mayor tamaño (intervalo $> 760 \mu\text{m}$) van disminuyendo. Esta tendencia a la disminución de tamaño de los poros mayores es más acusada en el aluminio 0.6, debido a que en este caso se parte de unos poros mayores. La tendencia al aumento de los poros de menor tamaño es bastante similar en ambos casos, y en los intervalos de tamaños medios, hay más riqueza de poros en el caso del aluminio 0.6 que en el de 0.4. Para la mayor temperatura de sinterización, la mayor parte de los poros se sitúan en el intervalo que va de 0 a 40 micras.

Tal como ocurrió en el caso del bronce, el tamaño de los poros está polarizado con respecto a la media en los intervalos más extremos con respecto a la misma, tal como se observa en la Figura 49 y la Figura 50. Conforme la temperatura de sinterización aumenta, el tamaño de los poros se va acumulando en el intervalo de menor tamaño, y disminuye notablemente la cantidad de poros que ocupan el intervalo de mayor tamaño. A su vez, y con la misma tendencia de la temperatura, va aumentando el número de poros que ocupan los intervalos más cercanos a la media, lo que es un claro síntoma de homogenización del tamaño de los poros. Este fenómeno es más acusado en el caso del aluminio 0.4, como se pudo observar por medio de la desviación con respecto de la media del tamaño de los poros, luego la Figura 49 y la Figura 50 corroboran esta tendencia antes observada.

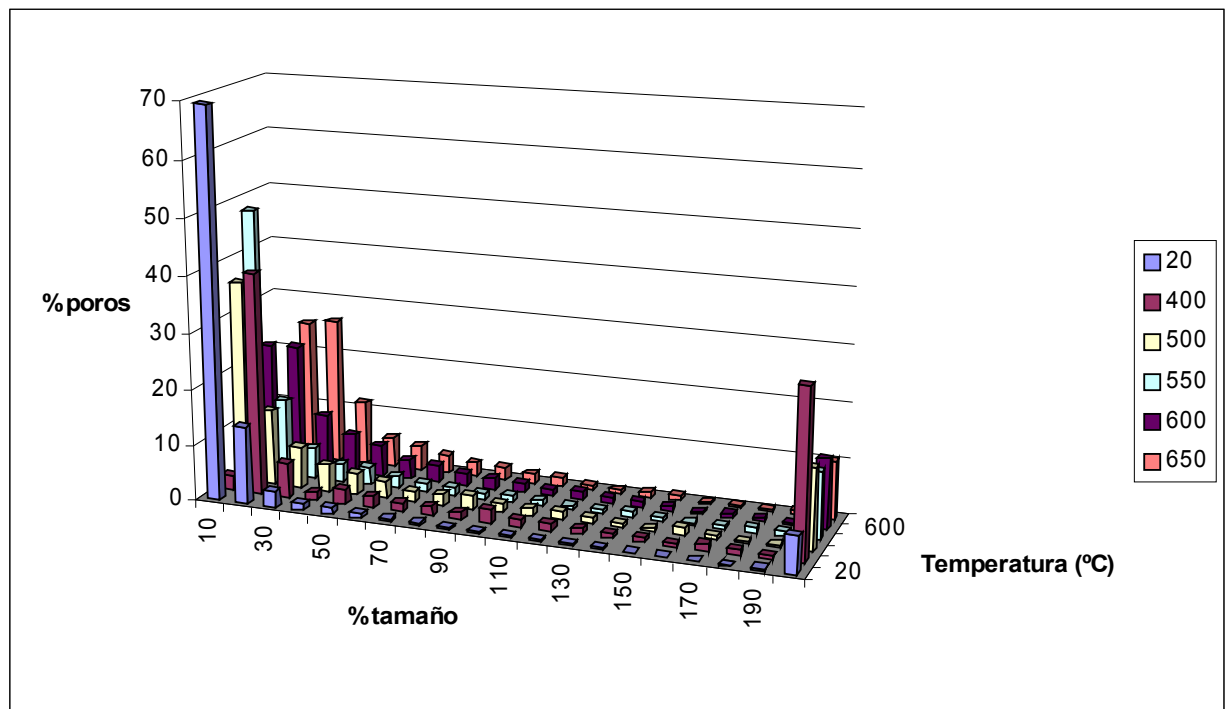


Figura 49: Dispersión del tamaño de los poros en el aluminio 0.4, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

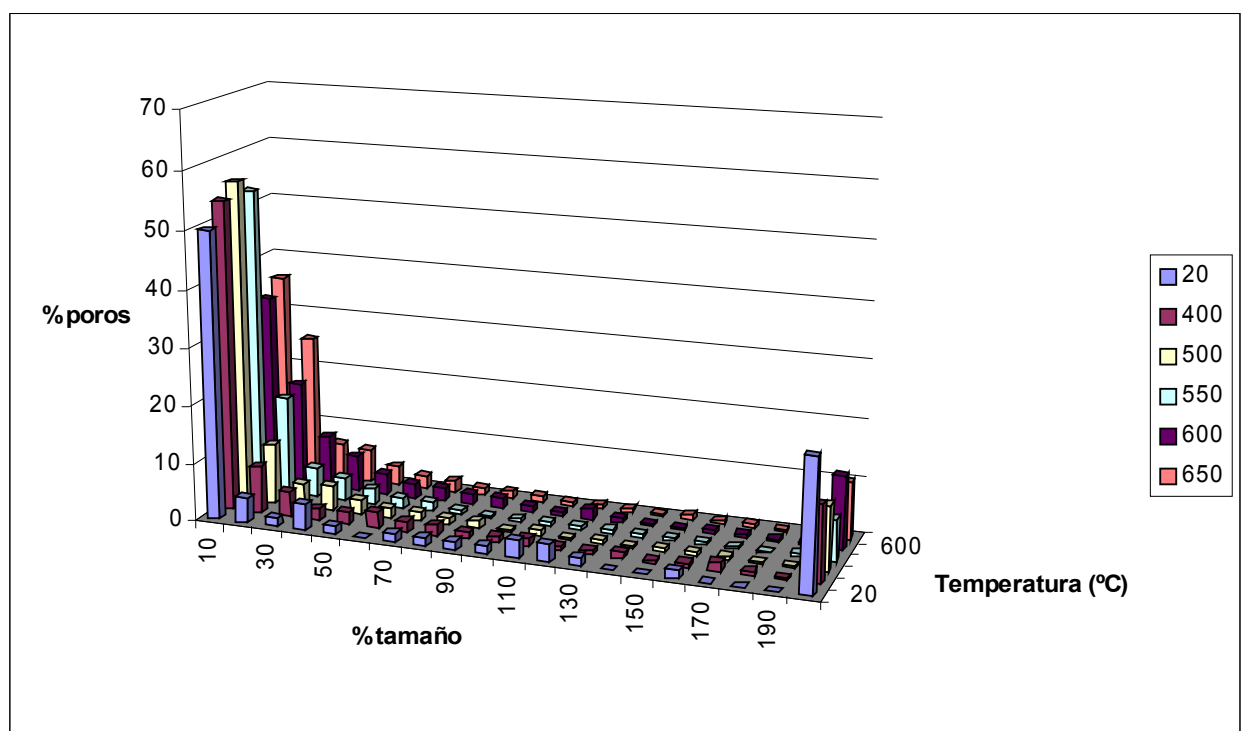


Figura 50: Dispersión del tamaño de los poros en el aluminio 0.6, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

Se han analizado las tres características principales de un material sinterizado de forma separada. En la Figura 51 y la Figura 52, se representan conjuntamente las tres

características, de forma que se observe la interrelación existente entre ellas. La porosidad sigue una tendencia similar a la del tamaño de los poros, disminuyendo las dos, mientras que el número de poros experimenta el fenómeno contrario, excepto en la zona final donde decrece, tal y como lo hacen la porosidad y el tamaño de los poros.

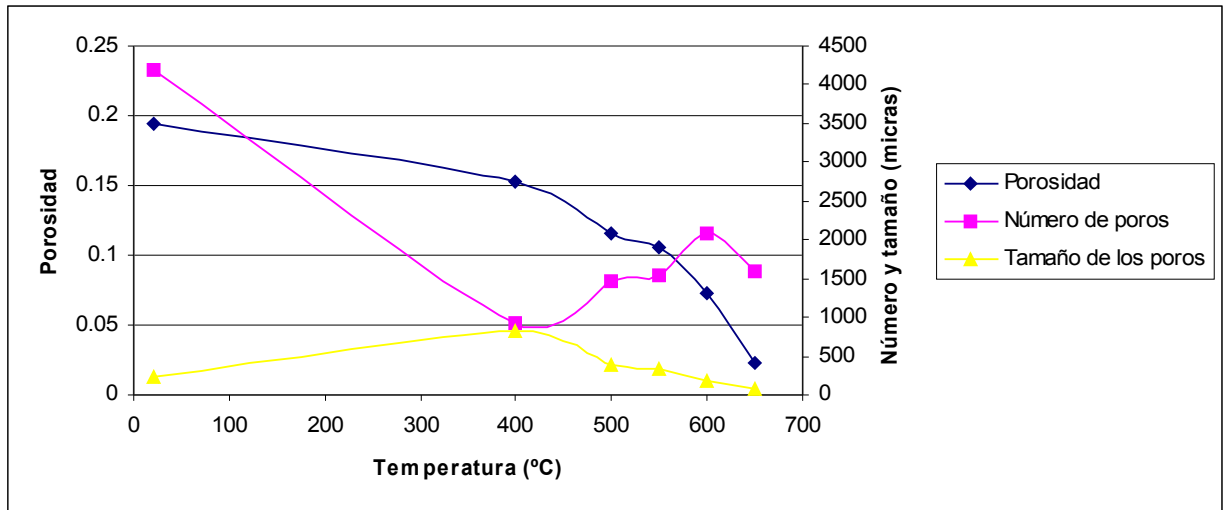


Figura 51: Comparación entre la porosidad, el número y el tamaño de los poros para el aluminio 0.4.

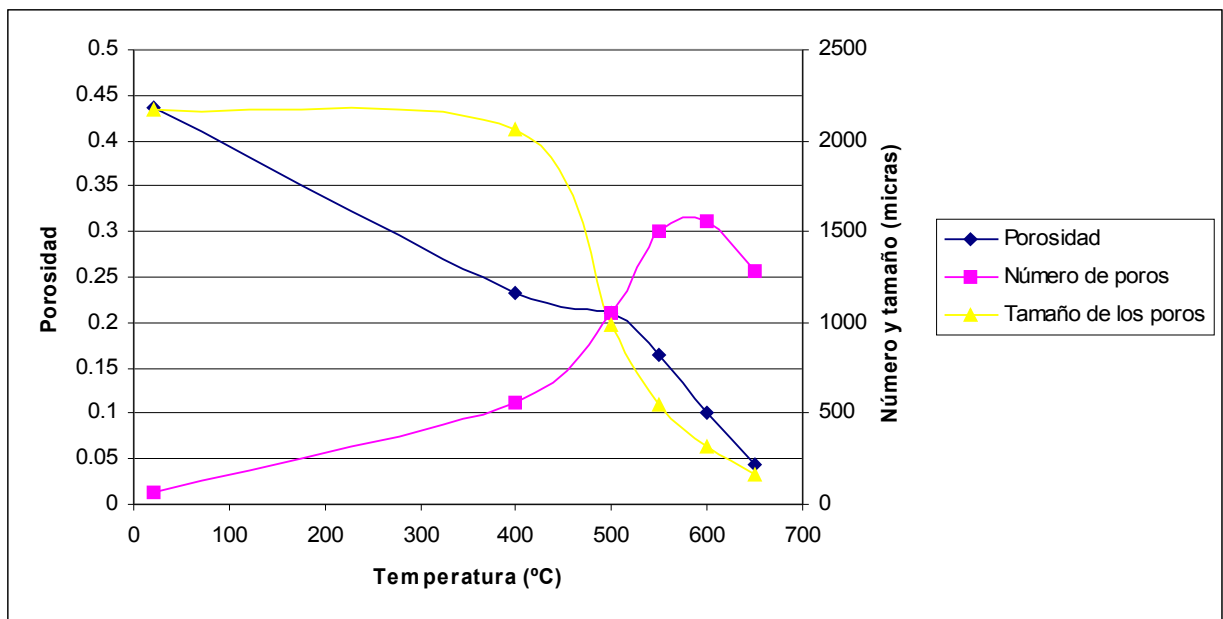


Figura 52: Comparación entre la porosidad, el número y el tamaño de los poros para el aluminio 0.6.

El número de poros aumenta fruto de la división de los de mayor tamaño, debido al crecimiento de los contactos entre las partículas. La tendencia de la porosidad y el tamaño de los poros es más pareja en el caso del aluminio 0.6 que en el de 0.4, aunque también se puede observar que en el caso de 0.6, el incremento del número de poros es mayor. Por lo tanto, el ligero descenso del tamaño de los poros del de 0.4, se ve compensado con un atenuado incremento en el número de poros.

Para completar el estudio de la sinterización en el aluminio, a continuación se analizan el coeficiente de circunferencialidad y el diámetro equivalente.

Tabla 14: Coeficiente de circunferencialidad (adimensional) y desviación del mismo, del aluminio, obtenido mediante análisis de imagen.

Temperatura	Aluminio 0.4	Desviación	Aluminio 0.6	Desviación
20	0,6444	0,2301	0,3249	0,3323
400	0,4268	0,2402	0,3576	0,2324
500	0,4446	0,2443	0,4047	0,2377
550	0,461	0,2389	0,4403	0,2503
600	0,4611	0,2238	0,4325	0,2392
650	0,592	0,2187	0,5095	0,2259

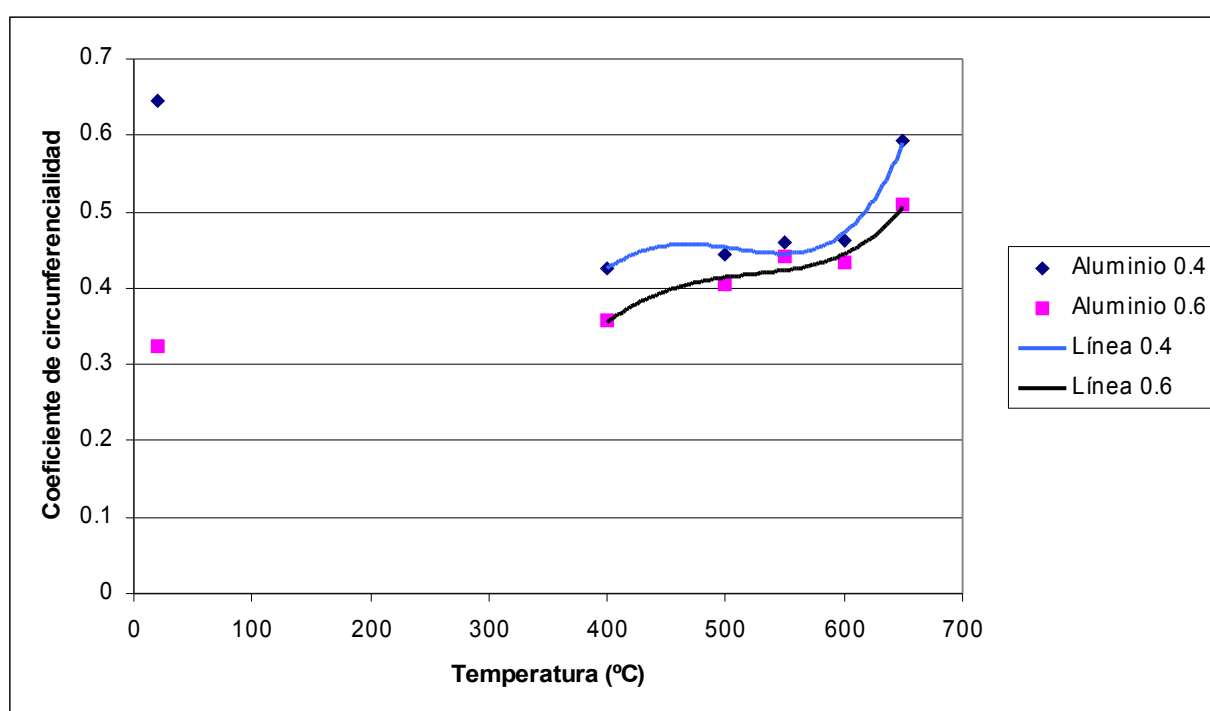


Figura 53: Evolución del coeficiente de circunferencialidad del aluminio en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

En la Figura 53 y la Tabla 14 se recogen los resultados obtenidos mediante el análisis de imagen, del coeficiente de circunferencialidad. Aunque se caiga en redundancia, se vuelve a indicar que los valores en el caso de no sinterización, no han sido incluidos en la línea de tendencia, por la poca fiabilidad de los mismos. En los resultados obtenidos se observa que la dispersión con respecto a la media es del mismo orden de magnitud que los valores obtenidos, lo que indica gran heterogeneidad en la forma de los poros, la cual disminuye a medida que aumenta la temperatura de sinterización. Este fenómeno es más acusado en el caso del aluminio 0.4. La forma de los poros del aluminio tiende a ser circular y es prácticamente similar en ambos casos, aunque los poros en el caso del aluminio 0.4 resulten tener un coeficiente de circunferencialidad mayor, lo que sucede debido a que parten de un coeficiente mayor.

Tabla 15: Diámetro equivalente y desviación del mismo, del aluminio, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Aluminio 0.4	Desviación	Aluminio 0.6	Desviación
20	8,7763	14,6886	36,9938	37,6693
400	21,3009	24,1735	32,0704	39,9541
500	16,1307	15,5141	20,6783	28,7932
550	13,5549	15,798	16,7986	20,7643
600	11,0781	9,916	14,2175	14,4149
650	7,3173	6,0411	9,711	11,0648

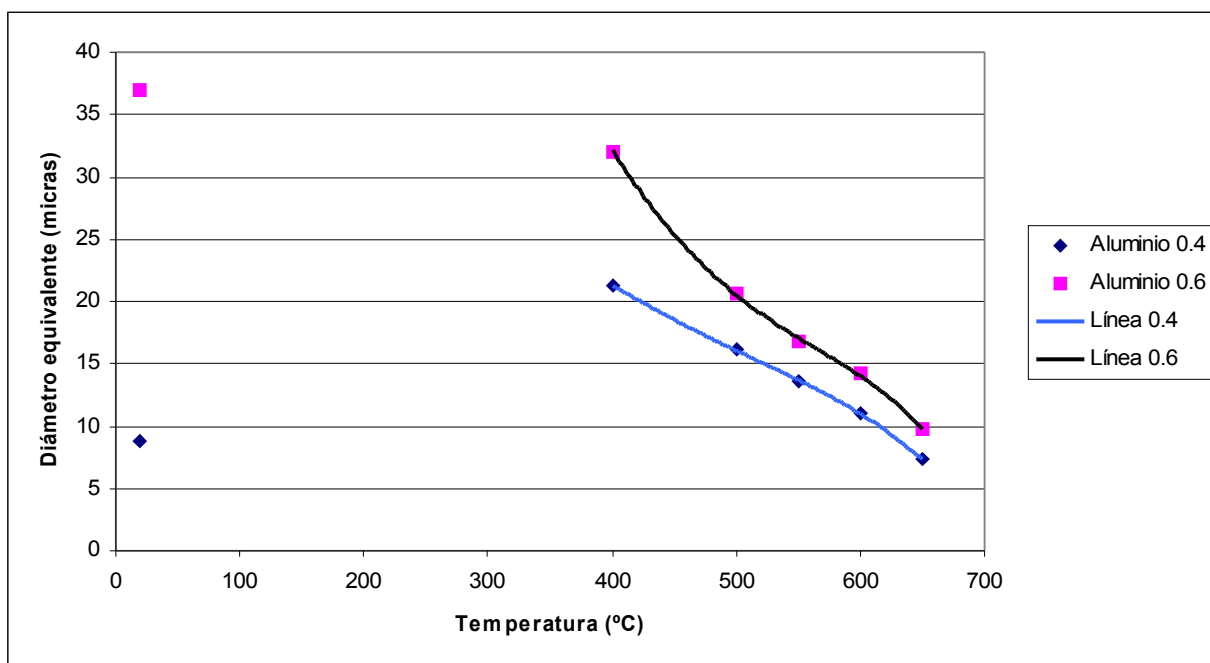


Figura 54: Evolución del diámetro equivalente del aluminio en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

En la Tabla 15 y la Figura 54 se encuentran recogidos los resultados del diámetro equivalente. La tendencia es claramente la disminución del mismo, es decir indica que el tamaño de los poros va haciéndose cada vez menor. La pendiente de disminución es ligeramente mayor en el caso del aluminio 0.6, sobre todo en la primera zona. La desviación con respecto a la media es bastante elevada, lo que indica una gran dispersión del tamaño de los poros, reforzando lo que indicaron otros parámetros. La dispersión disminuye a medida que aumenta la temperatura, es decir se homogeniza la porosidad, tanto en forma como en tamaño de los poros.

Para terminar con el análisis del aluminio se comentan las micrografías, tomadas mediante el programa de análisis de imagen, de las distintas probetas, a distintas temperaturas de sinterización.

- **Aluminio 0.4 a 20° C**

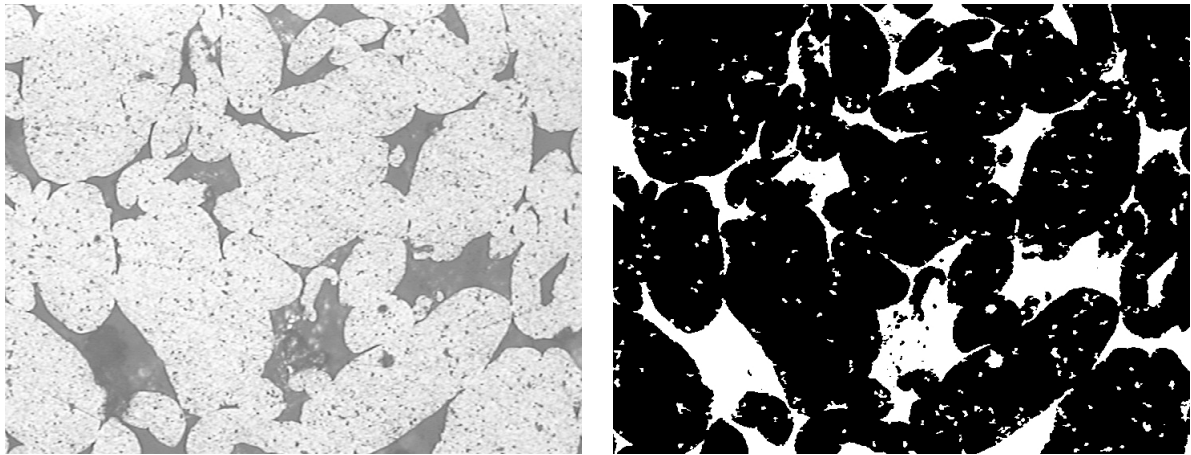


Figura 55: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sin sinterizar.

En primer lugar se observa con gran claridad que no se ha realizado doble segmentado, al contrario del caso del bronce. En la imagen sin segmentar de la Figura 55, se ve claramente que no es posible observar, en la porosidad, zonas de partículas arrancadas. Por medio de una minuciosa observación, en la pantalla se podían distinguir, aunque el contraste era tan pequeño que no se pudo segmentar. Analizando las imágenes de Figura 55, se puede observar que las partículas se diferencian claramente unas de otras, con uniones muy poco claras aunque existentes, la porosidad tiene unas grandes diferencias de tamaños, con poros muy pequeños y otros enormes. Las formas de los mismos son muy irregulares en el caso de los de mayor tamaño y cercanas a la circunferencia en el caso de los de menor tamaño.

- **Aluminio 0.4 a 400° C**

En la Figura 56, se observa que las partículas todavía se pueden distinguir unas de las otras de forma clara, aunque se comienzan a apreciar algunas uniones entre las mismas. Los poros son bastante grandes, y no se observa tanta dispersión en el tamaño como en el caso de la probeta sin sinterizar. La forma de los poros es claramente irregular, y se encuentran bastante cercanos unos de otros, con pocos de ellos claramente aislados. En conclusión se aprecia un ligero comienzo de la formación en las uniones de las partículas, aunque no lo suficiente como para que la misma repercuta en la porosidad, en cuanto a forma y tamaño, de forma notoria.

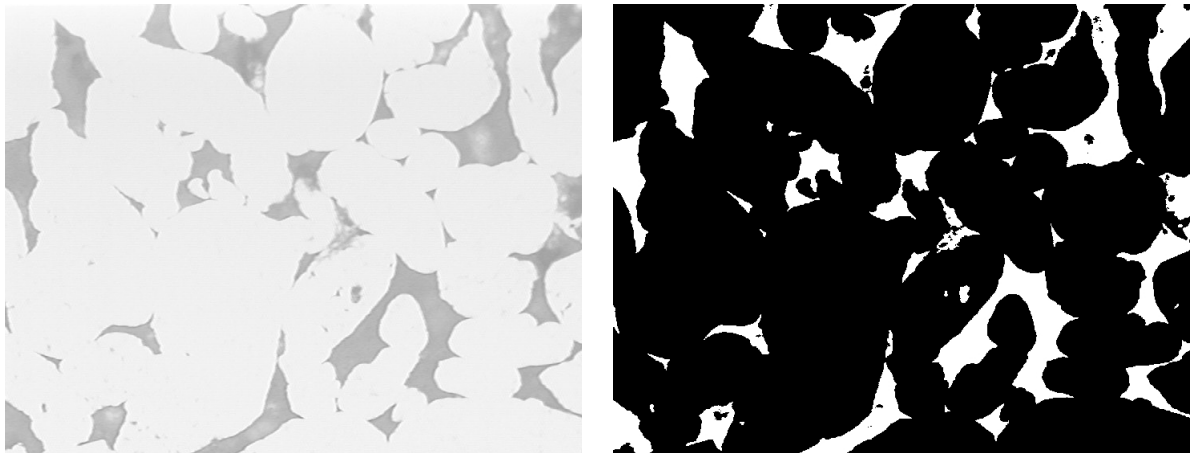


Figura 56: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sinterizado a 400° C.

- **Aluminio 0.4 a 500° C**

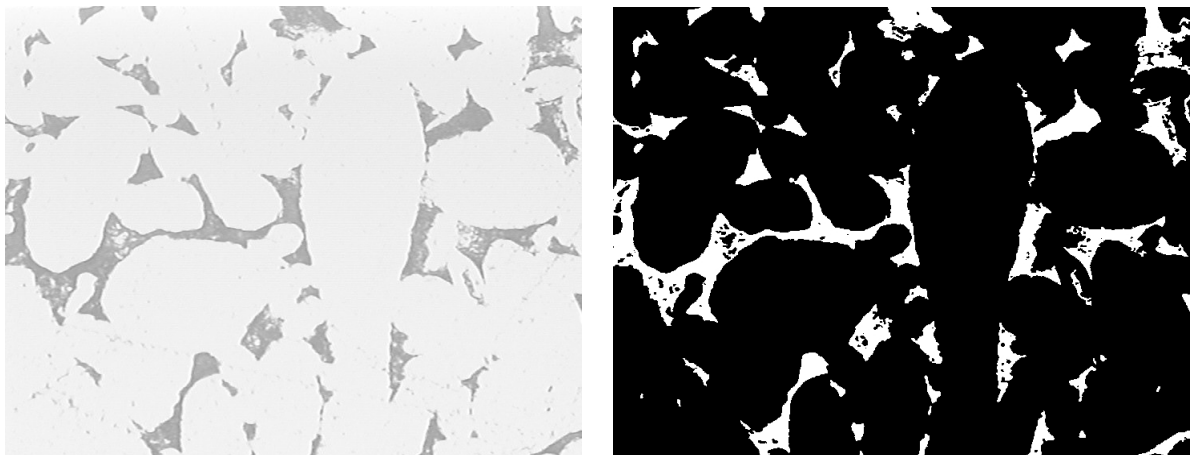


Figura 57: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sinterizado a 500° C.

En la Figura 57 se aprecian, de un modo más claro que en el caso anterior, las uniones de las partículas, aunque todavía no son suficientes para confundir unas partículas con otras. La porosidad ha disminuido de tamaño, aunque todavía es de un valor grande y en su forma todavía se observa una clara tendencia a la irregularidad, además se hayan poco aislados unos poros de otros. En conclusión todavía la sinterización no ha conseguido confundir unas partículas con otras, y afecta a la porosidad de forma ligera.

- **Aluminio 0.4 a 550° C**

En la Figura 58, se ve una ligera disminución de la porosidad. Se aprecian las partículas de forma clara, y las uniones han incrementado muy poco, la irregularidad en la forma de los poros todavía es manifiesta y la conexión entre ellos es bastante notable. El tamaño de los poros ha disminuido, es el efecto más claro de evolución que se aprecia entre la Figura 57 y la Figura 58. En resumen, el aumento en la temperatura de sinterización no ha tenido una gran influencia en la probeta, aparte de la ligera disminución de la porosidad.

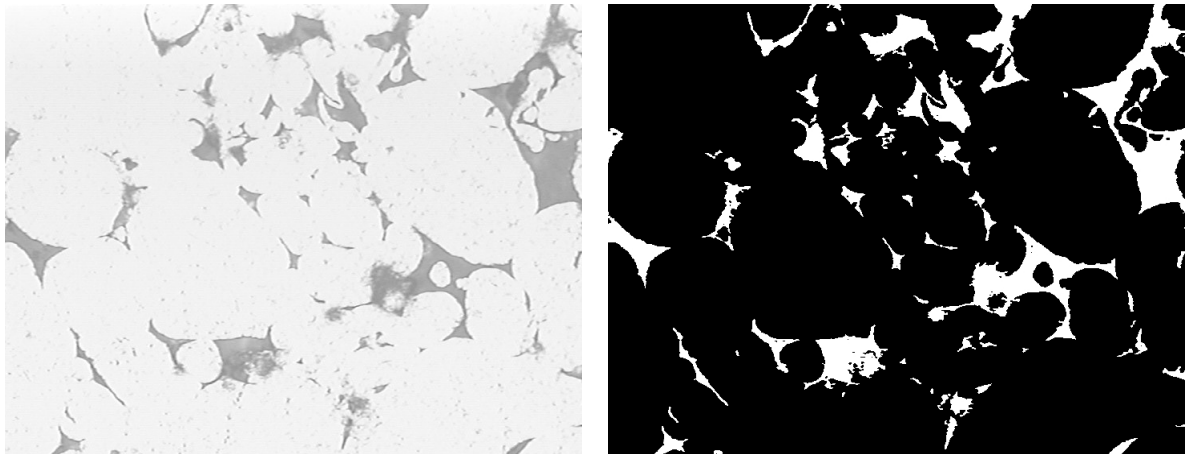


Figura 58: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sinterizado a 550° C.

- **Aluminio 0.4 a 600° C**

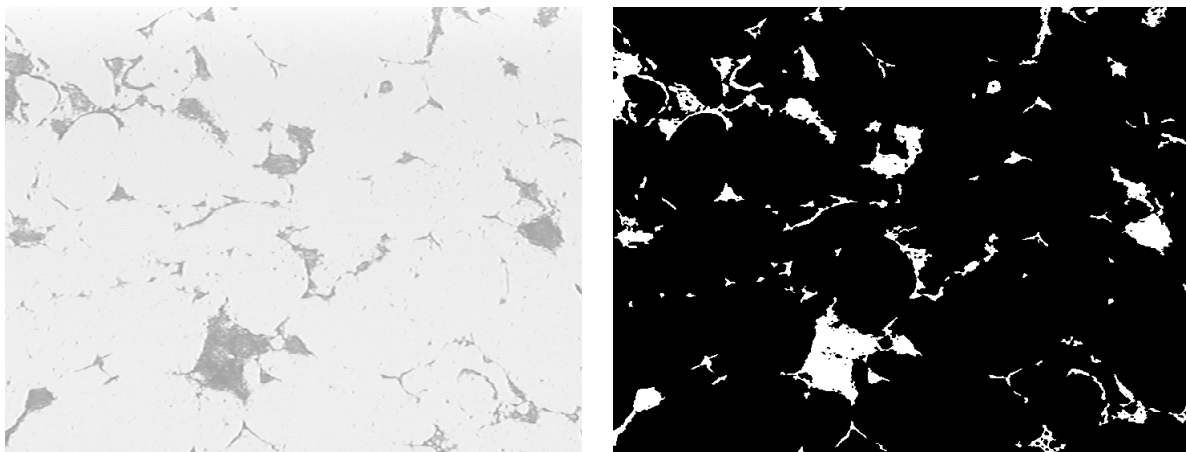


Figura 59: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sinterizado a 600° C.

En la Figura 59, se confunden las partículas unas con otras, no pudiéndolas diferenciar. Las uniones tampoco se distinguen apenas, mientras que la porosidad ha disminuido de tamaño, adoptando una forma más circular. Aparece una tendencia a aislar unos poros de otros, aunque todavía no de forma clara. En resumen, la sinterización confunde las partículas unas con otras, las uniones no se aprecian y la porosidad esta fuertemente influida tanto en tamaño como en forma.

- **Aluminio 0.4 a 650° C**

La Figura 60 presenta a un material con una porosidad residual de pequeño tamaño, que prácticamente presenta una densidad total. La porosidad se concentra en distintas zonas, unas aisladas de otras, su tamaño es en general muy pequeño, y con forma bastante cercana a la circunferencia, debido a la gran cantidad de poros pequeños. La cantidad del número de poros también presenta un acusado descenso.

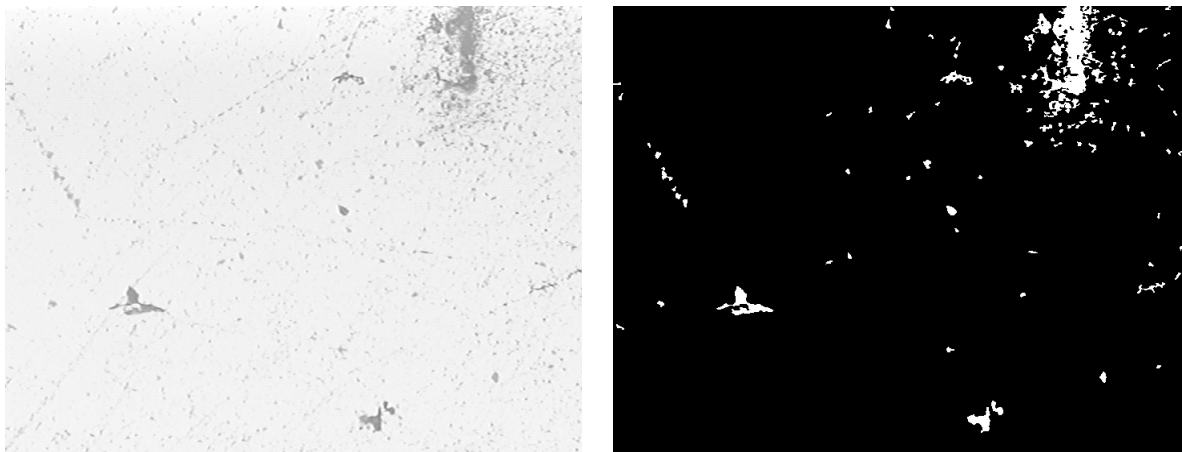


Figura 60: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.4, sinterizado a 650° C.

- **Aluminio 0.6 a 20° C**

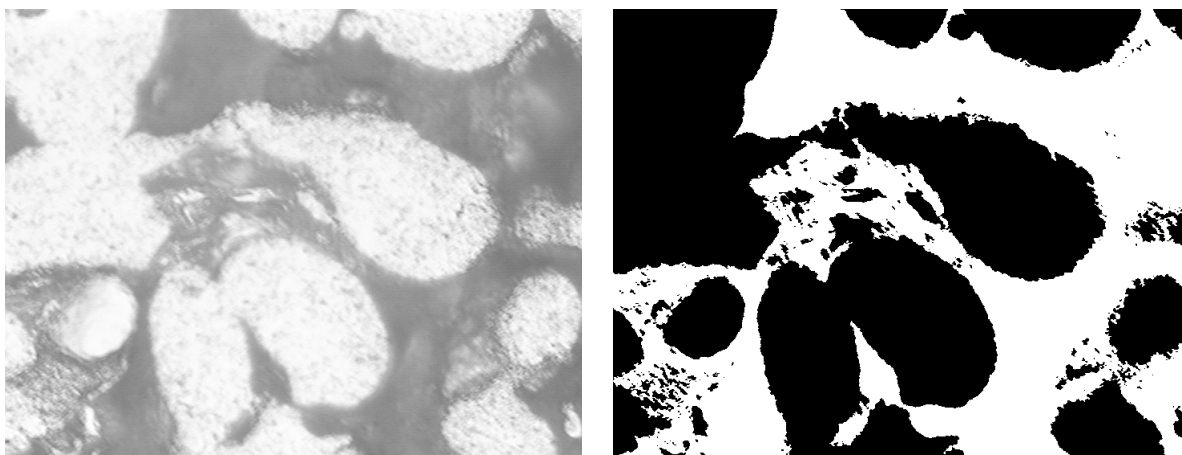


Figura 61: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sin sinterizar.

La Figura 61, muestra la probeta de aluminio 0.6 sin sinterizar. En la imagen sin segmentar se aprecian algunas zonas donde se han producido desprendimientos de partículas, pero debido al poco contraste entre estas zonas y los poros reales, no se ha podido realizar un doble segmentado para corregir estos errores. obviando los errores producidos por el desprendimiento de las partículas, se observa que la porosidad es muy elevada, con pocos poros, de gran tamaño y con formas muy irregulares. Prácticamente las uniones entre partículas no existen, causa por la cual se ha producido un desprendimiento tan grande de partículas.

- **Aluminio 0.6 a 400° C**

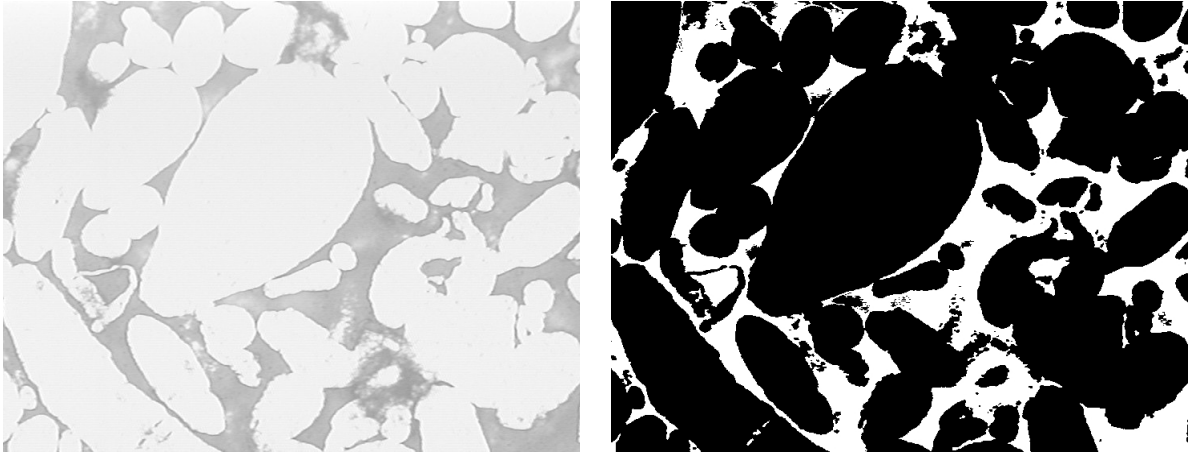


Figura 62: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sinterizado a 400° C.

En la Figura 62, se aprecia que no ha habido desprendimientos de partículas, a pesar de que las uniones entre las partículas son muy leves, siendo prácticamente independientes unas de otras. Los poros son de gran tamaño, y están prácticamente conectados unos con otros, con formas muy irregulares. La sinterización, en este caso, solo ha producido un leve incremento de la conexión entre las partículas, permaneciendo el resto de las propiedades de la probeta aproximadamente iguales al caso en el que todavía no se había producido. Con respecto al mismo caso pero en la probeta de aluminio 0.4, esta probeta muestra unos poros de mayor tamaño, y una conexión entre partículas muchísimo más leve, con unos cuellos de uniones entre partículas mucho menos conformados.

- **Aluminio 0.6 a 500° C**

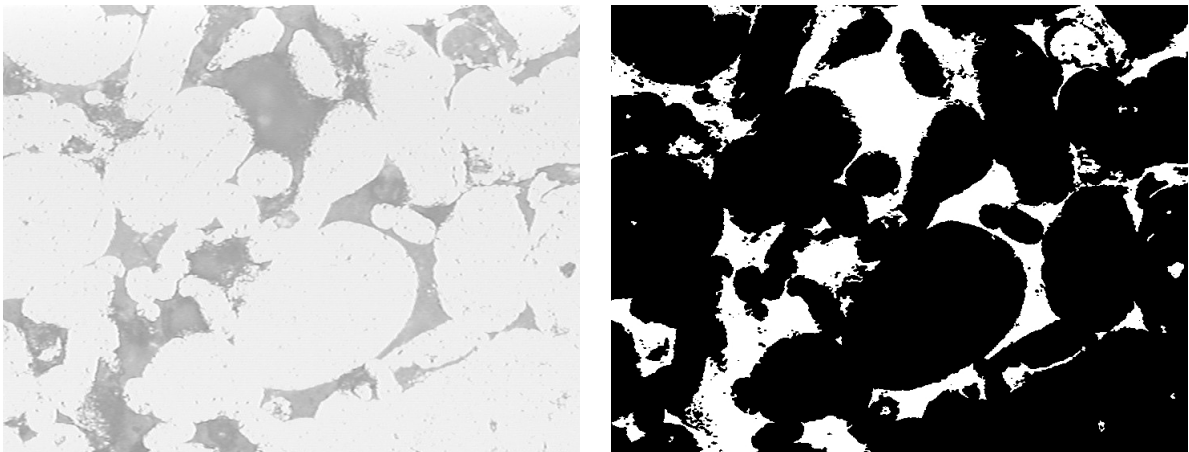


Figura 63: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sinterizado a 500° C.

La Figura 63 muestra, que han aparecido más uniones entre las partículas, aunque no se ha producido apenas descenso de la porosidad. Los poros presentan formas muy

irregulares y son de gran tamaño, con muchas conexiones entre ellos. Si lo comparamos con el caso del aluminio 0.4, la situación es muy similar en ambos casos, la diferencia fundamental son los poros de mayor tamaño que presenta el aluminio 0.6

- **Aluminio 0.6 a 550° C**

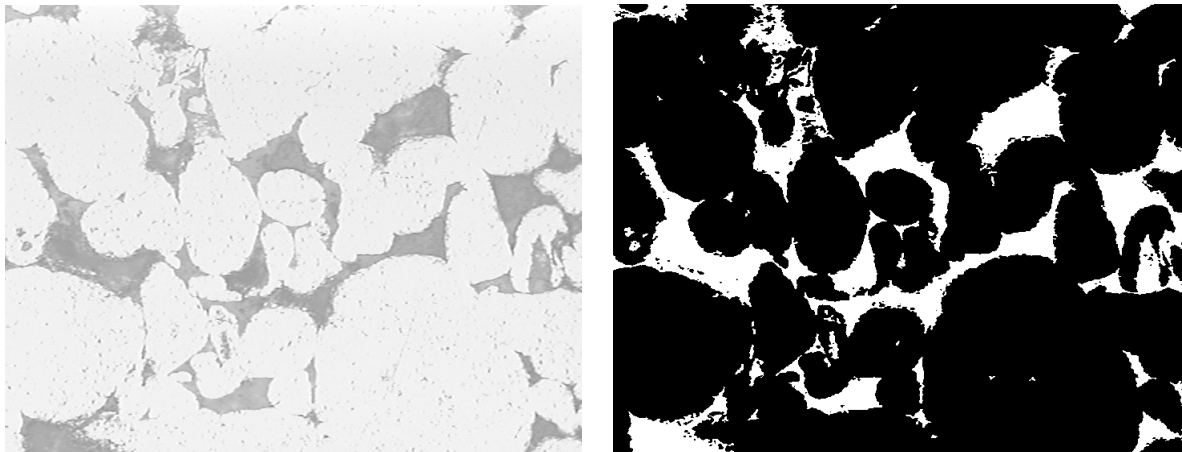


Figura 64: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sinterizado a 550° C.

En la Figura 64, se aprecia un crecimiento en las uniones entre las partículas, los poros disminuyen de tamaño ligeramente, aunque siguen manteniendo bastantes cercanía entre ellos y una forma notablemente irregular, la evolución es prácticamente similar a la del caso del aluminio 0.4, solamente que con una porosidad mayor. También se puede apreciar un crecimiento en el número de poros.

- **Aluminio 0.6 a 600° C**

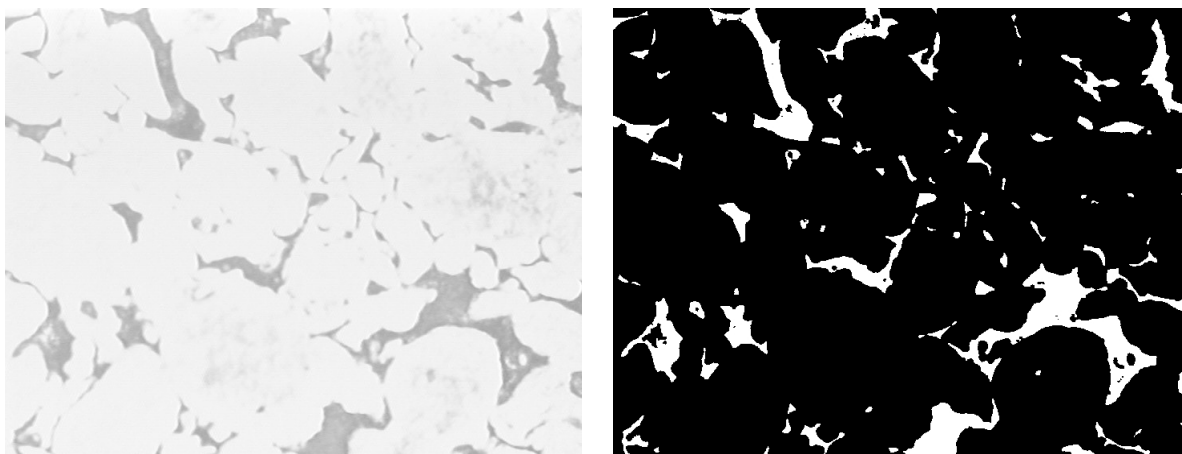


Figura 65: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sinterizado a 600° C.

La Figura 65 muestra unas uniones bastante desarrolladas, que difuminan las formas de las partículas, a pesar de que todavía se pueden apreciar. La porosidad ha disminuido, aumentando los poros de menor tamaño y disminuido los de mayor, que todavía presentan

formas muy irregulares, y están bastante próximos unos de otros. Comparando con el caso del aluminio 0.4, esta vez la diferencia si es bastante notable ya que en ese caso, las partículas ya no se diferenciaban unas de otras y la porosidad era menor y más dispersa. Es decir, la evolución debida a la porosidad en el caso del aluminio 0.6 ha sido menor para esta temperatura de sinterización.

- **Aluminio 0.6 a 650° C**

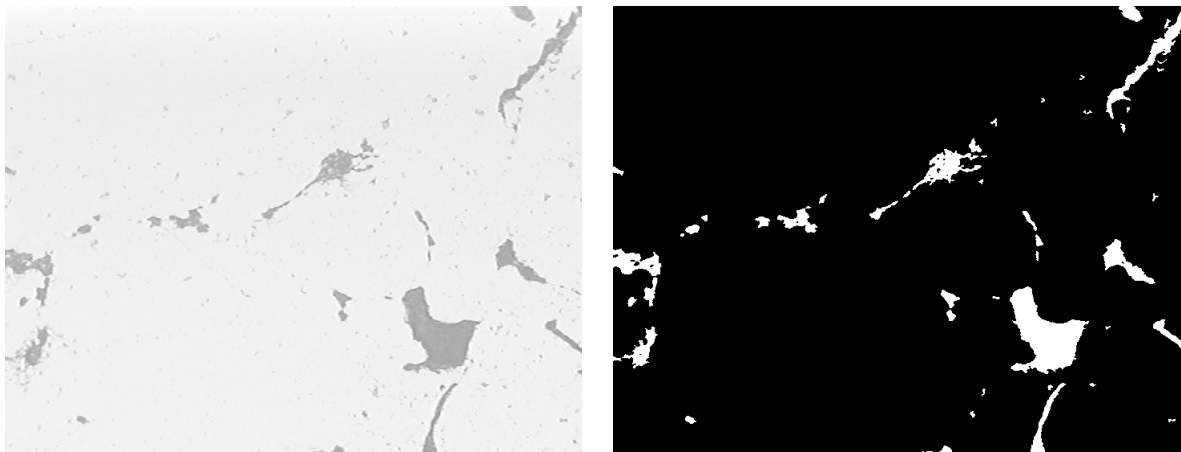


Figura 66: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del aluminio 0.6, sinterizado a 650° C.

En la Figura 66 se recogen las imágenes de la probeta de aluminio 0.6 sinterizada a 650° C, en ella se aprecia que no existe ninguna distinción entre las partículas, la porosidad es muy reducida tanto en tamaño como en número de poros, no se observa mucha homogeneidad en la forma de la misma a pesar de que esta debería redondearse. Si se compara con la situación de la probeta de aluminio 0.4 sinterizada a la misma temperatura, se observa que la situación es prácticamente similar, solo que esta probeta tiene es un poco menos densa, y también que los poros son más irregulares, lo cual corrobora los resultados obtenidos por medio del análisis cuantitativo de los parámetros.

5.2.3 ACERO INOXIDABLE

En la Figura 67 y la Tabla 16 se exponen los resultados obtenidos mediante el análisis de imagen, referido al análisis cuantitativo de la porosidad. La tendencia de la misma es a la disminución, en una primera zona, hasta los 850° C, se mantiene prácticamente constante, para a partir de este valor caer de forma casi lineal. La desviación de los valores con respecto a la media es siempre de un orden menor que la misma, por lo tanto esta es bastante representativa.

El comportamiento recogido, en cuanto a la evolución de la porosidad, se ajusta, con un pequeño margen de error mediante dos rectas. Una es casi constante y comprende el intervalo que se extiende desde 20 a 850° C. La otra presenta una pendiente elevada y comprende el intervalo que se extiende desde los 850° C hasta los 1050° C. Los valores de las pendientes son de $8 \cdot 10^{-6}$ en el primer tramo y de 0.0011 en el segundo, lo que confirma la enorme diferencia de pendientes existente. En un modelado posterior, puede considerarse

constante el primer tramo. La representación gráfica de la primera linealización se recoge en la Figura 68.

Tabla 16: Porosidades del acero inoxidable 0.4, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Análisis de imagen	Desviación
20	0,2879	0,0289
750	0,2839	0,0429
850	0,2804	0,0355
900	0,2249	0,0195
950	0,187	0,0211
1000	0,1192	0,0209
1050	0,046	0,0288

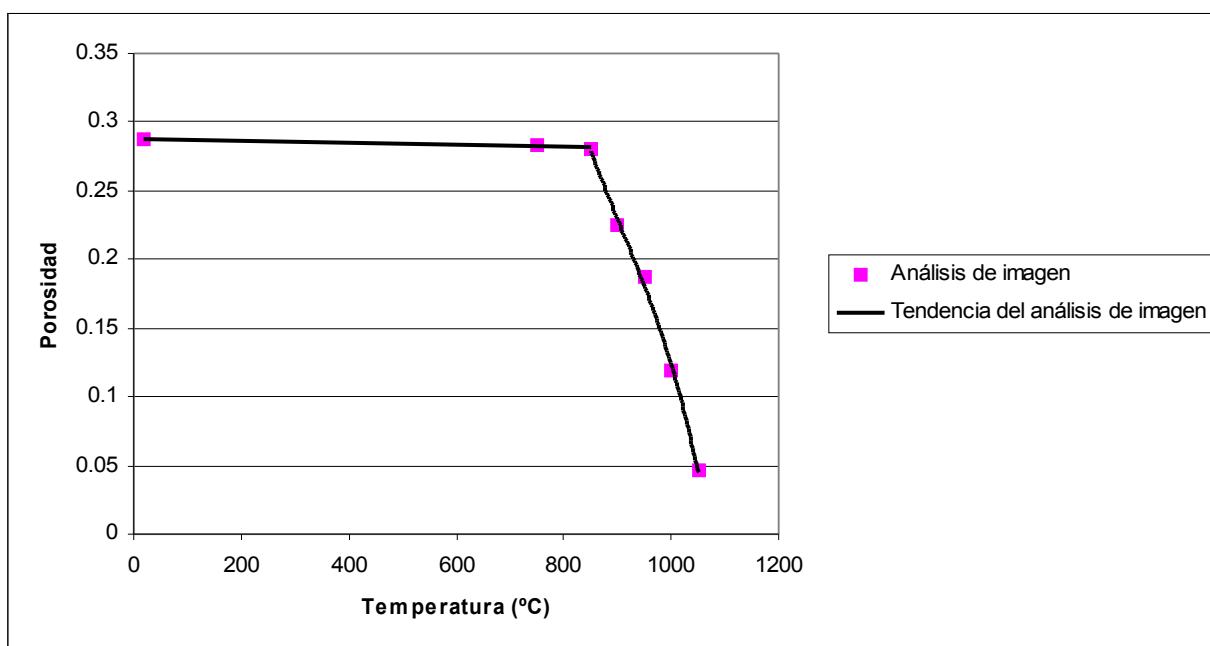


Figura 67: Evolución de la porosidad del acero inoxidable 0.4 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

En el caso del acero inoxidable 0.6, los resultados cuantitativos sobre la porosidad se recogen en la Figura 69 y la Tabla 17. La dispersión de los resultados es mayor, incluso en un caso es del orden de magnitud de los mismos, luego la porosidad debe ser menos homogénea en este caso. La evolución de la porosidad presenta un primer tramo con algunas oscilaciones, aunque se mantiene prácticamente constante, para después con una curva suave afrontar un descenso que una vez pasado el primer tramo de variación, donde la misma es menos acusada, adquiere un aspecto casi lineal.

Los puntos obtenidos, con excepción del de máxima temperatura de sinterización, presentan una estructura escalonada, en el que van emparejándose de dos en dos, con valores muy próximos, por ello se ha mantenido en la representación gráfica las distintas desviaciones de cada punto, de forma que se aprecie que teniendo en cuenta las mismas, los distintos puntos se ajustan perfectamente a la línea de tendencia.

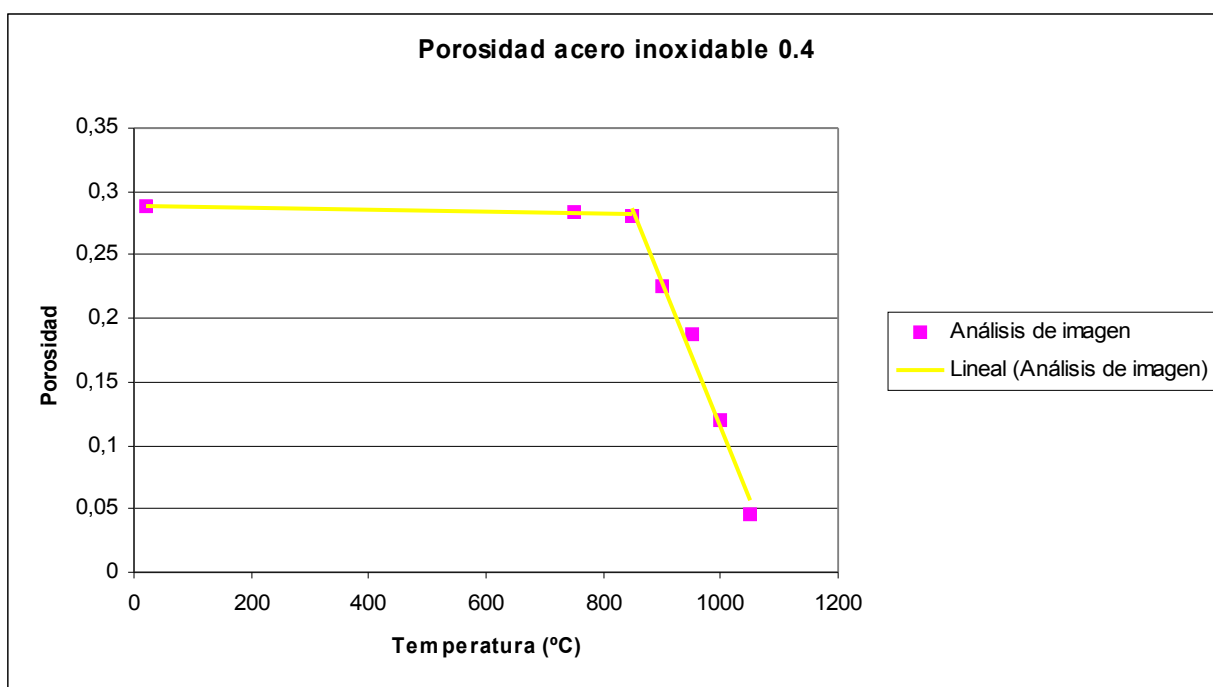


Figura 68: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del acero inoxidable 0.4, mediante el análisis de imagen.

Tabla 17: Porosidades del acero inoxidable 0.6, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidas mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Análisis de imagen	Desviación
20	0,3878	0,1004
750	0,4077	0,0343
850	0,3796	0,0283
900	0,3736	0,0291
950	0,2353	0,0426
1000	0,2362	0,0409
1050	0,0649	0,0487

El modelado mediante dos rectas también es muy aconsejable en este caso, ya que a pesar de las oscilaciones, la evolución puede ajustarse de manera bastante fidedigna.

En la Figura 70 se representa la aproximación lineal de la evolución de la porosidad del acero inoxidable. Se aprecia claramente como hay dos rectas, una prácticamente constante y otra de pendiente muy elevada. Numéricamente las pendientes tienen los valores de $6 \cdot 10^{-6}$ y de 0.0019, luego efectivamente los ordenes de magnitud de las mismas son muy distantes, pudiéndose considerar a la primera constante, en pos de una fácil modelización del fenómeno. Es importante indicar que donde se produce el cambio significativo en el descenso de la porosidad es en la temperatura de sinterización de 850° C, a diferencia de lo que ocurrió en el acero inoxidable 0.4, presentando un comportamiento diferente.

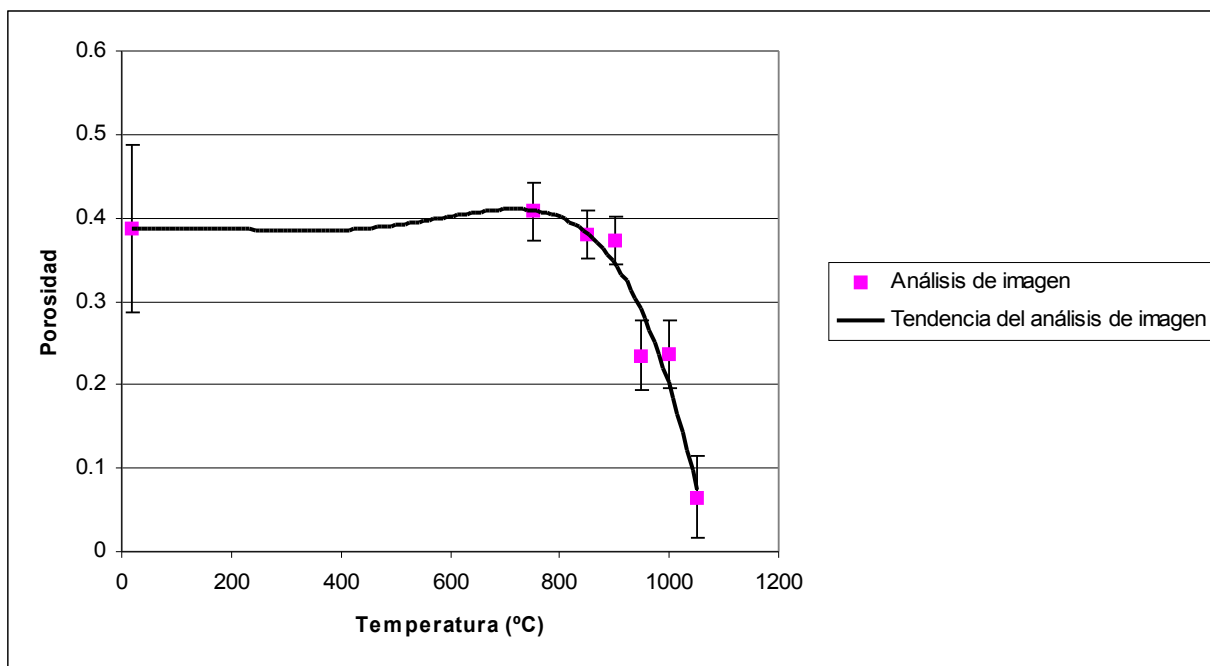


Figura 69: Evolución de la porosidad del acero inoxidable 0.6 en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

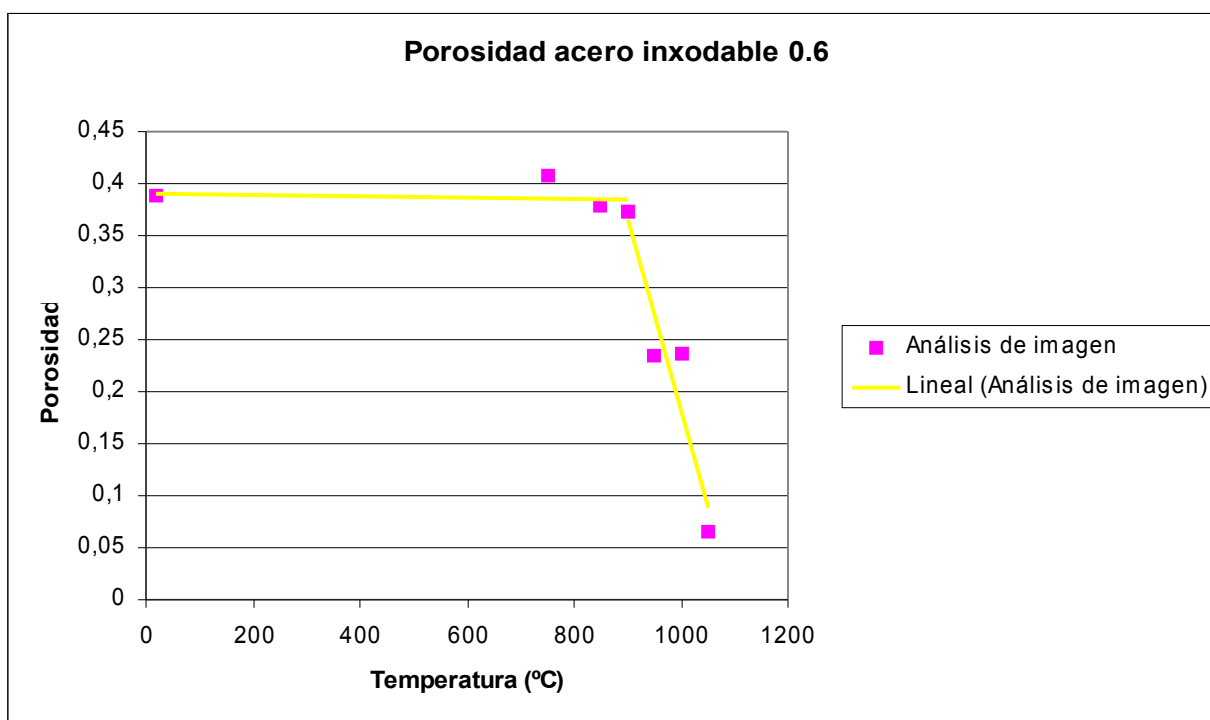


Figura 70: Aproximación lineal de la evolución de la porosidad del acero inoxidable 0.6, mediante el análisis de imagen.

En pos de una mejor comparación de la evolución de ambos aceros, se representa la evolución conjunta de los mismos con respecto a la temperatura de sinterización, en la Figura 71. En la misma se aprecia como la densificación que se produce en el acero

inoxidable 0.6 es más acusada. El comportamiento del acero inoxidable 0.4 se ajusta mucho mejor a las linealizaciones realizadas a ambos, además los resultados de las medias se ajustan de manera más pulcra a la línea de tendencia. Esto indica que los resultados obtenidos sobre la porosidad son mucho más homogéneos que el otro caso, que se tuvo que tener en cuenta la desviación de los mismos para corroborar la validez del ajuste de los valores mediante la línea de tendencia. En la primera zona de ajuste, es decir hasta la temperatura de 850° C, los valores del acero inoxidable 0.4 apenas sufren variaciones apreciables, mientras que el otro experimenta muchas más oscilaciones.

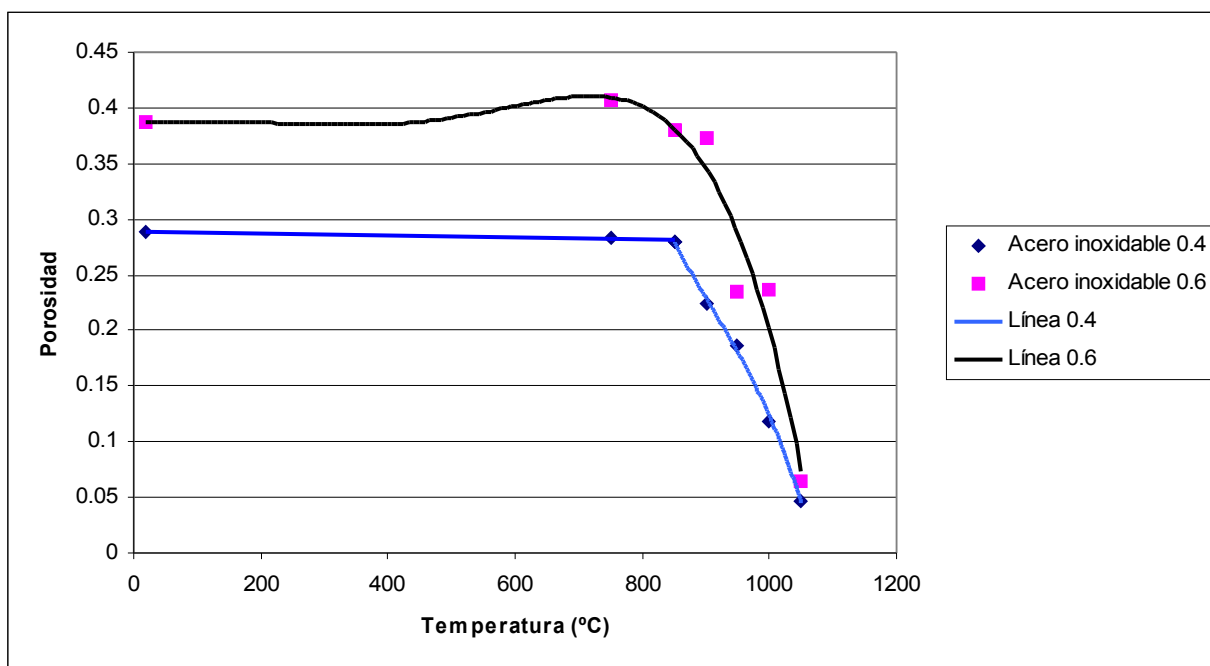


Figura 71: Comparación de la evolución de la porosidad del acero inoxidable 0.4 con respecto a la del acero inoxidable 0.6.

Una vez estudiada la porosidad del acero, se analizan las propiedades de los poros, tanto el número, como el tamaño.

Los resultados recogidos en la Figura 72 y la Tabla 18, se refieren a la evolución del número de poros con respecto a la temperatura de sinterización. En ellos se aprecia como en principio el número es menor en el acero inoxidable 0.6, lo cual es totalmente lógico ya que los poros deben ser de gran tamaño. El número de uniones debe ser menor, esto se intentará corroborar posteriormente mediante el análisis visual de las imágenes tomadas en esas condiciones. El comportamiento es similar en ambos casos, primeramente una zona casi constante seguida de otra de incremento acusado muy cercana a la linealidad. Lo que diferencia el comportamiento de ambos casos es que para el de mayor porosidad de partida el crecimiento es muchísimo más acusado, y que este crecimiento empieza a mayor temperatura. Esto muestra que en los primeros tramos de temperaturas de sinterización, la energía principalmente se ocupa de la creación de uniones entre partículas, y que hasta que no hay suficiente número de las mismas no comienza a producirse un incremento notable del número de poros, es decir una importante división de los poros de gran tamaño en otros menores.

Tabla 18: Número de poros del acero inoxidable, para las distintas temperaturas de sinterización, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Acero inoxidable 0.4	Acero inoxidable 0.6
20	2653	1239
750	2236	1611
850	4259	1397
900	3109	3085
950	4781	4210
1000	6499	6686
1050	6635	8408

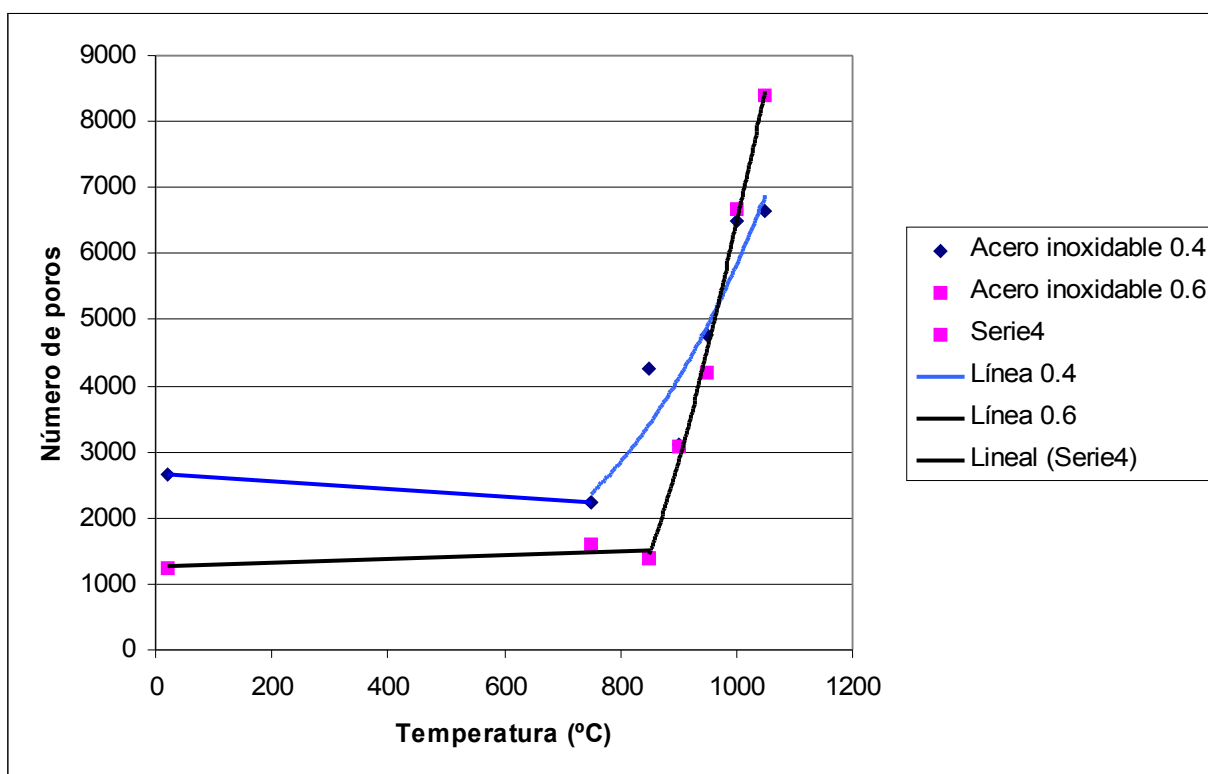


Figura 72: Evolución del número de poros en el acero inoxidable, en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante el análisis de imagen.

En la Figura 73 se realiza la aproximación lineal del comportamiento observado, para el caso del acero inoxidable 0.4, a partir de 750° C, se produce el incremento de la pendiente que el caso de la aproximación lineal tiene un valor de 15.038, mientras que para el caso del acero inoxidable 0.6 el cambio se produce a partir de 850° C, con una pendiente de 35.246.

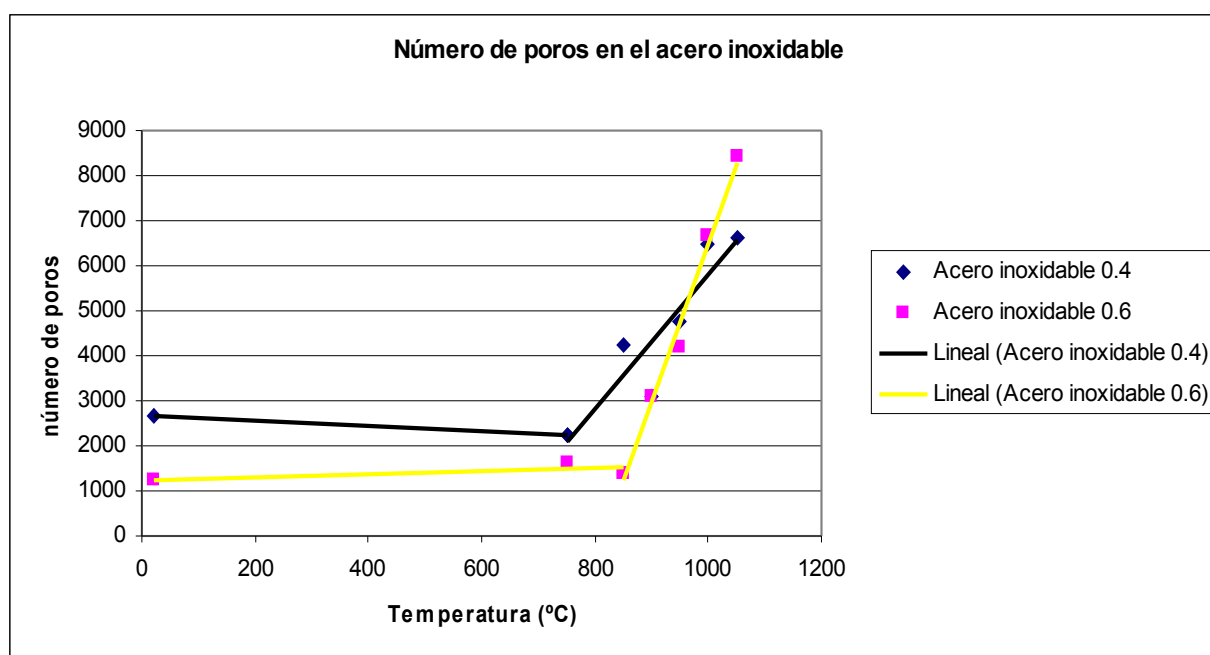


Figura 73: Aproximación lineal de la evolución del número de poros en el acero inoxidable, obtenida mediante análisis de imagen.

El incremento del número de poros va acompañado de una disminución en el tamaño de los mismos. Esto se corrobora por medio de los resultados obtenidos respecto a esta característica. Para ello se han recogido los mismos en la Tabla 19 y la Figura 74, donde se aprecia que efectivamente, se cumple esta afirmación. La caída en el tamaño de los poros es mucho más acusada en el acero inoxidable 0.6, como era de prever, ya que parte de una porosidad muchísimo mayor. Las curvas de descenso del tamaño, se asemejan de manera notable a las rectas, teniendo una primera zona donde la variación es poco importante. El descenso del tamaño afecta en primer lugar al caso de porosidad inicial menor, donde los cambios de tamaño son reseñables desde 750° C, mientras que en el otro caso es a partir de 850° C. Pero la evolución de la media tiene poca fiabilidad en este caso, ya que la desviación con respecto a ella de los datos obtenidos es enorme, a pesar de que va descendiendo de manera notable con la temperatura de sinterización, es decir el rango de tamaños en el que se encuentran las dimensiones de los poros va disminuyendo, luego la porosidad se estandariza.

Tabla 19: Tamaño (μm) de los poros del acero inoxidable y la desviación, obtenido mediante el análisis de imagen.

Temperatura	Acero inoxidable 0.4	Desviación	Acero inoxidable 0.6	Desviación
20	538,36	2622,94	1552,51	11468,82
750	629,86	2371,66	1255,37	8358,85
850	326,01	1391,79	1347,96	8463,12
900	358,64	1060,13	600,72	4716,73
950	194	478,71	277,25	1025,59
1000	90,99	191,45	175,27	590,69
1050	37,11	88,9073	38,3	109,04

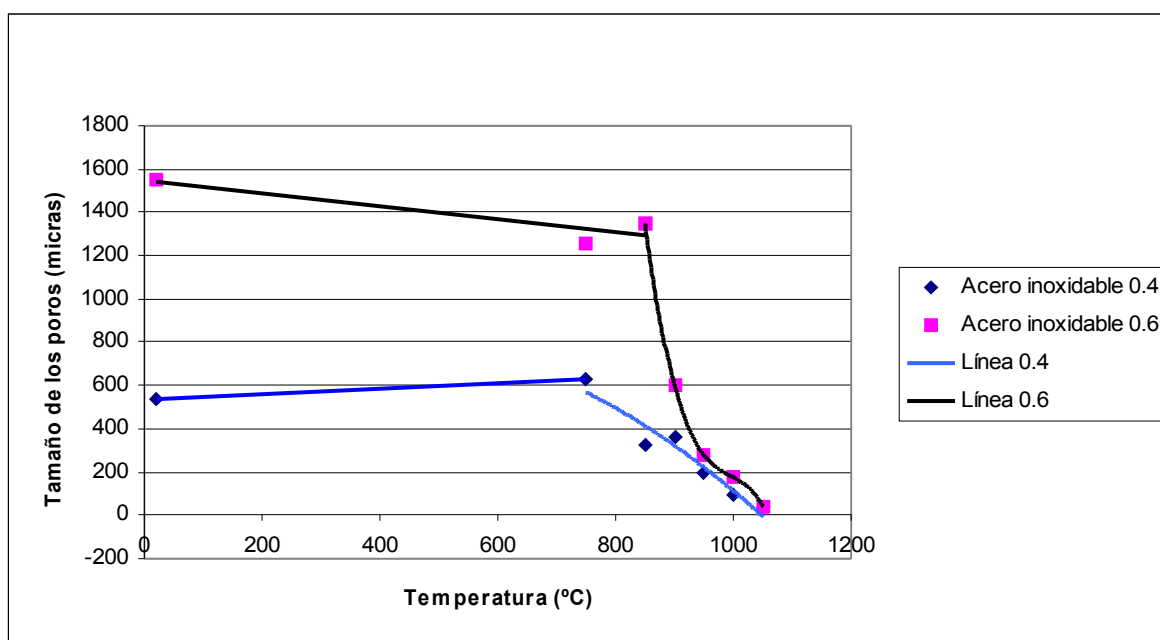


Figura 74: Evolución del tamaño de los poros en función de la temperatura de sinterización, para el acero inoxidable, obtenida mediante análisis de imagen.

Como la evolución con respecto a la temperatura del tamaño, se puede recoger mediante una representación lineal de dos rectas sin que el error sea excesivo, esta se realiza en la Figura 75.

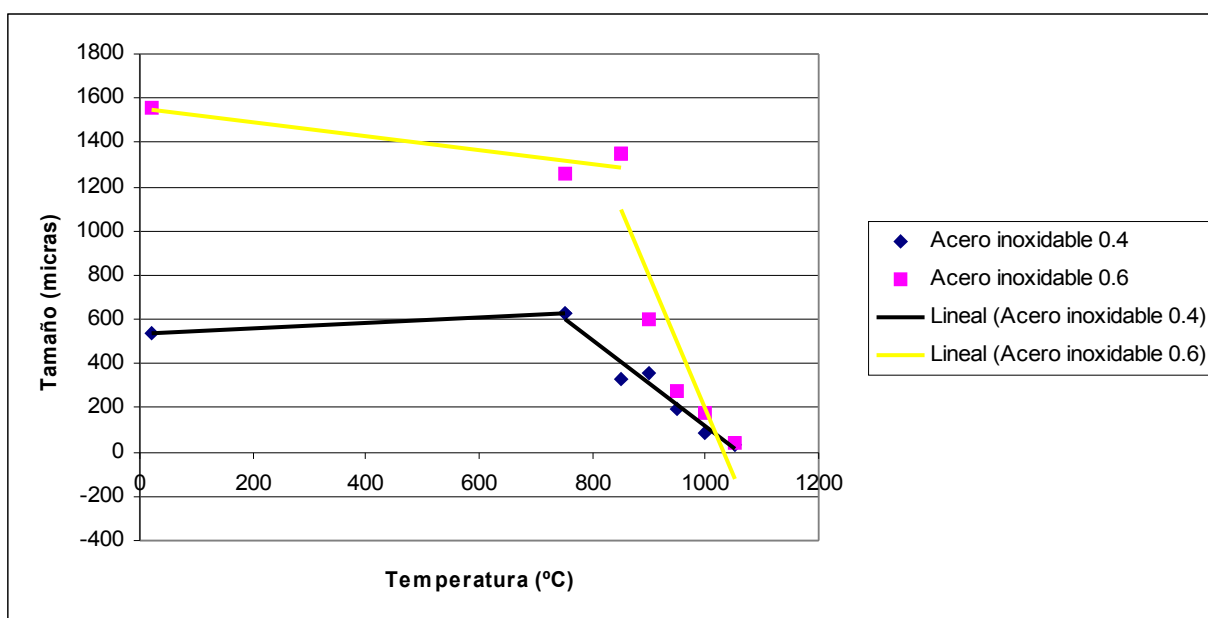


Figura 75: Aproximación lineal de la evolución del tamaño de los poros en el acero inoxidable, obtenida mediante análisis de imagen.

Debido a la enorme desviación del tamaño, se debe estudiar esta propiedad de manera más exhaustiva, para ello se ha analizado la distribución de los tamaños con respecto

a la media puntual en cada temperatura de sinterización, y con respecto a un intervalo de tamaños absoluto, común para todas las temperaturas.

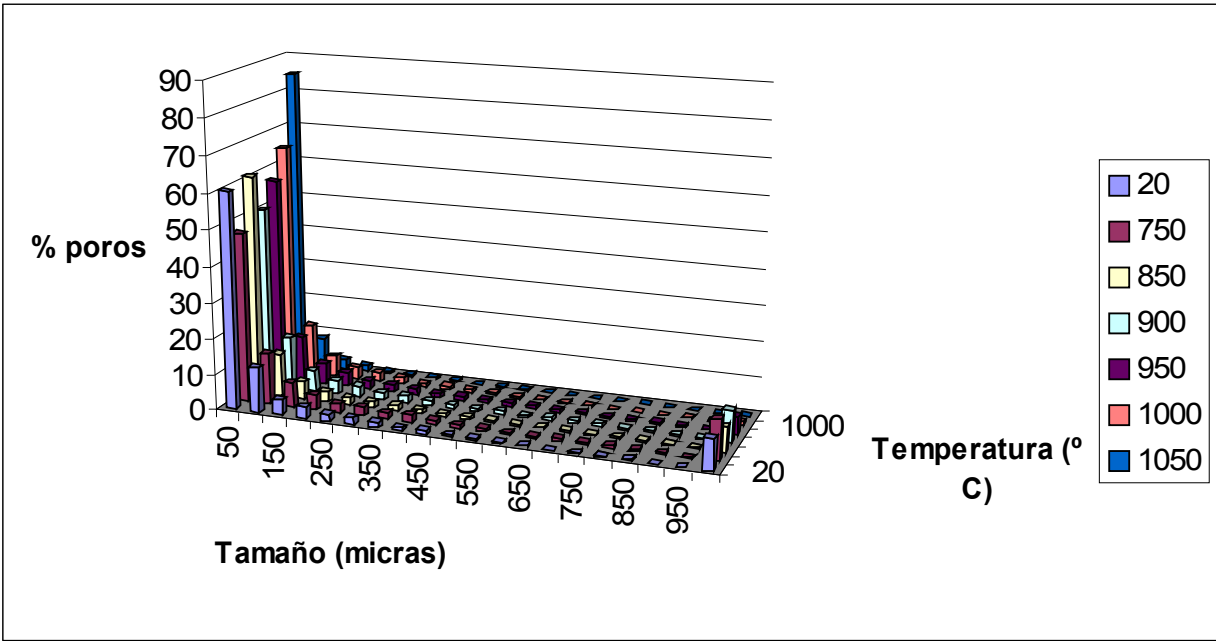


Figura 76: Distribución del tamaño de los poros en el acero inoxidable 0.4, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

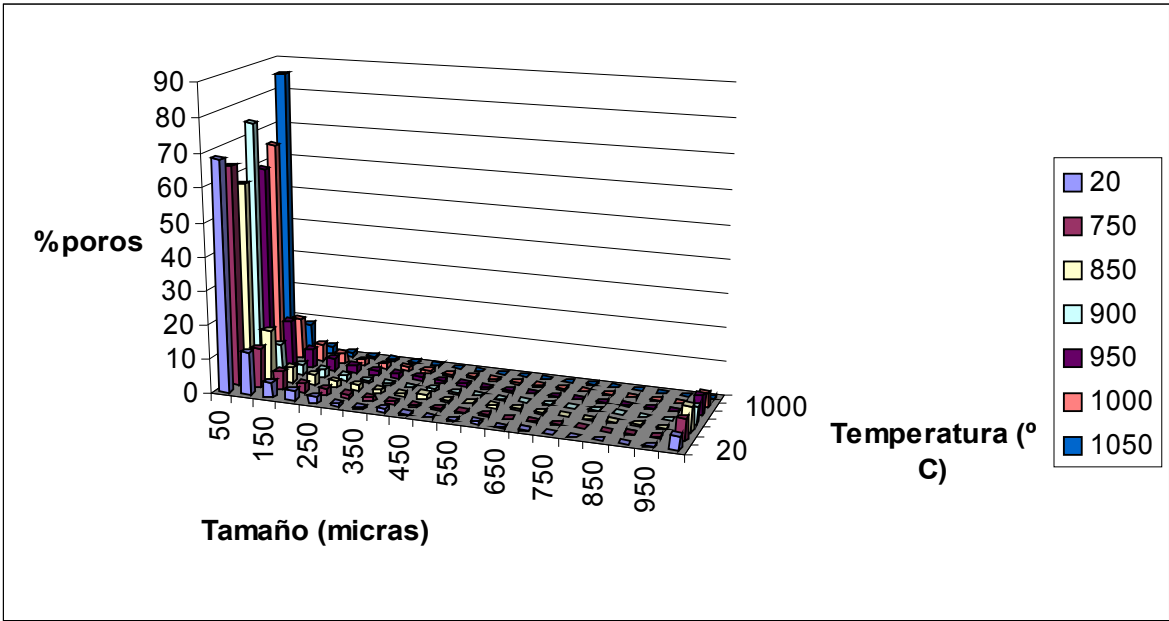


Figura 77: Distribución del tamaño de los poros en el acero inoxidable 0.6, expresada en función del tamaño y de la temperatura de sinterización.

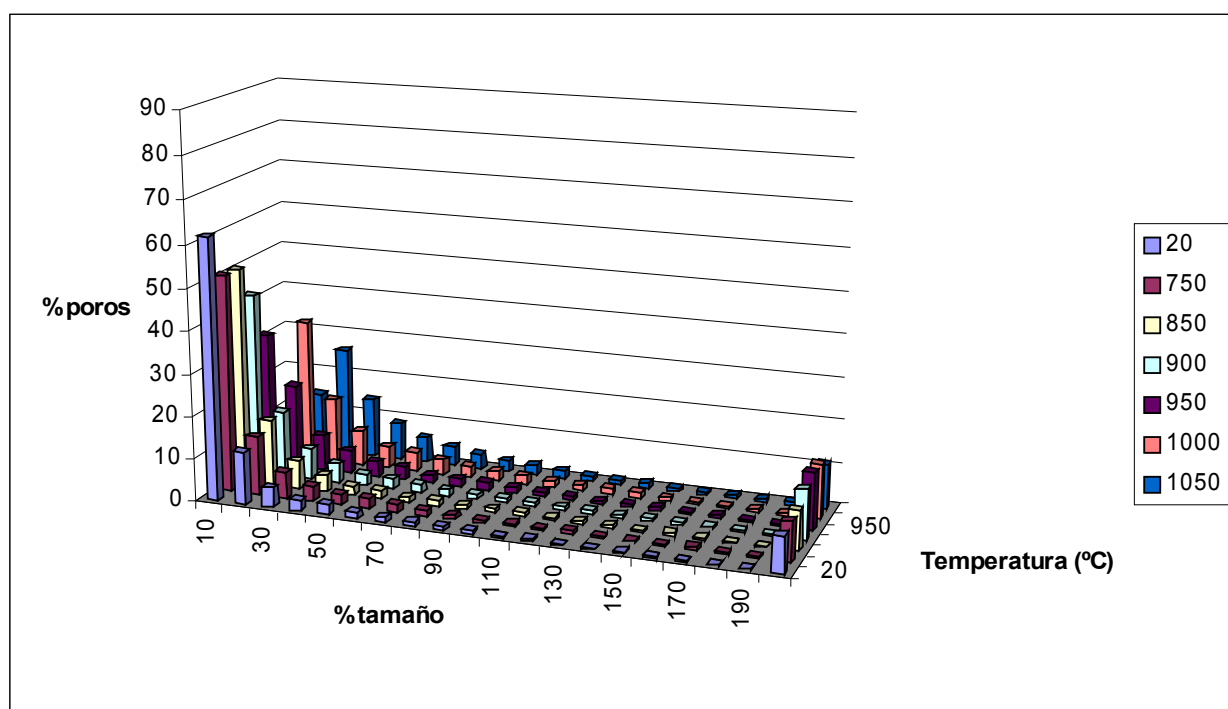


Figura 78: Dispersión del tamaño de los poros en el acero inoxidable 0.4, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

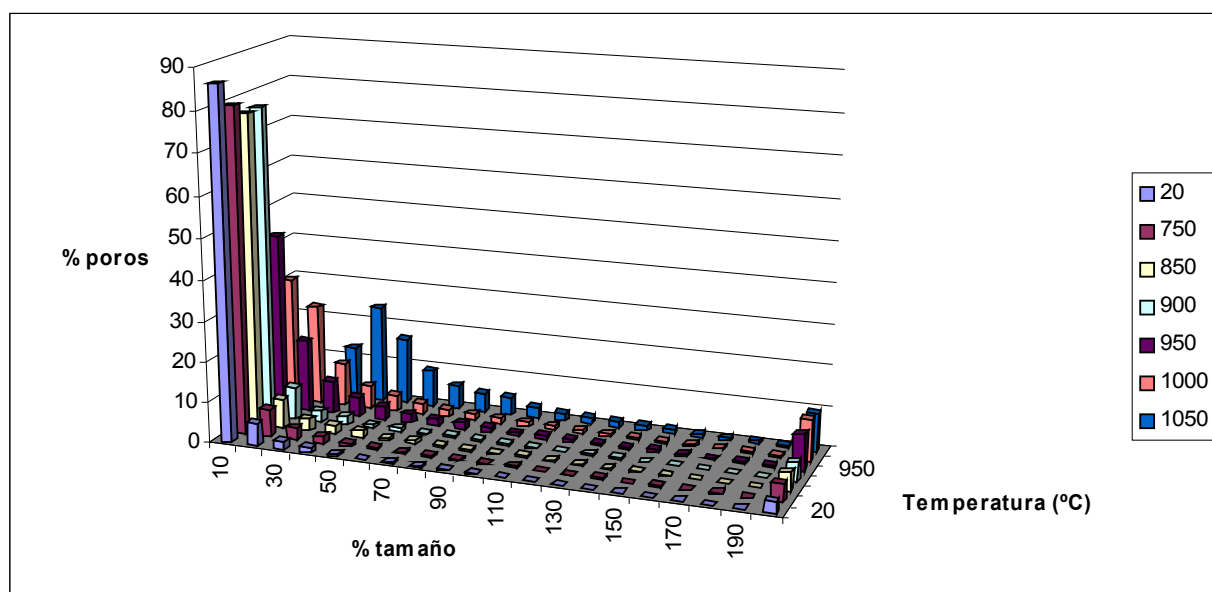


Figura 79: Dispersión del tamaño de los poros en el acero inoxidable 0.6, expresada en % del tamaño con respecto a la media, en función de la temperatura de sinterización.

En la Figura 76 y la Figura 77 se recoge la distribución de los valores de los poros para el acero inoxidable. La distribución indica que hay una enorme acumulación de poros en el intervalo de menor tamaño (intervalo 0-10 μm), no hay prácticamente poros en la zona intermedia, y hay un número pequeño, aunque con bastante importancia de poros de gran tamaño (intervalo $> 190 \mu\text{m}$), que disminuyen con la temperatura de sinterización. Lo

opuesto a lo que ocurre con los poros de menor tamaño. La dispersión de tamaños es enorme, muy polarizada, pero con una clara tendencia a la acumulación en las zonas de los intervalos mínimos. La evolución en los dos casos es prácticamente similar, y se muestra a las claras que el tamaño de los poros va disminuyendo conforme aumenta la temperatura de sinterización, tal y como mostraba la evolución de la media, a pesar de su enorme dispersión.

En la Figura 78 y la Figura 79, se recoge la dispersión de tamaños con respecto a la media, que es completamente polar, para todos los casos. A medida que incrementa la temperatura de sinterización aumenta la fracción de poros pertenecientes al intervalo mayor y disminuye la perteneciente al menor. Los intervalos intermedios se enriquecen conforme aumenta la temperatura, lo que indica que la dispersión en el tamaño disminuye, quedando menos polar que los casos de mayor temperatura de sinterización.

Las tres variables más importantes, con las cuales se ha estudiado la evolución de la sinterización, están interrelacionadas. Mediante la Figura 80 y la Figura 81 se puede observar la evolución que tienen las mismas de manera conjunta, en función de la temperatura de sinterización.

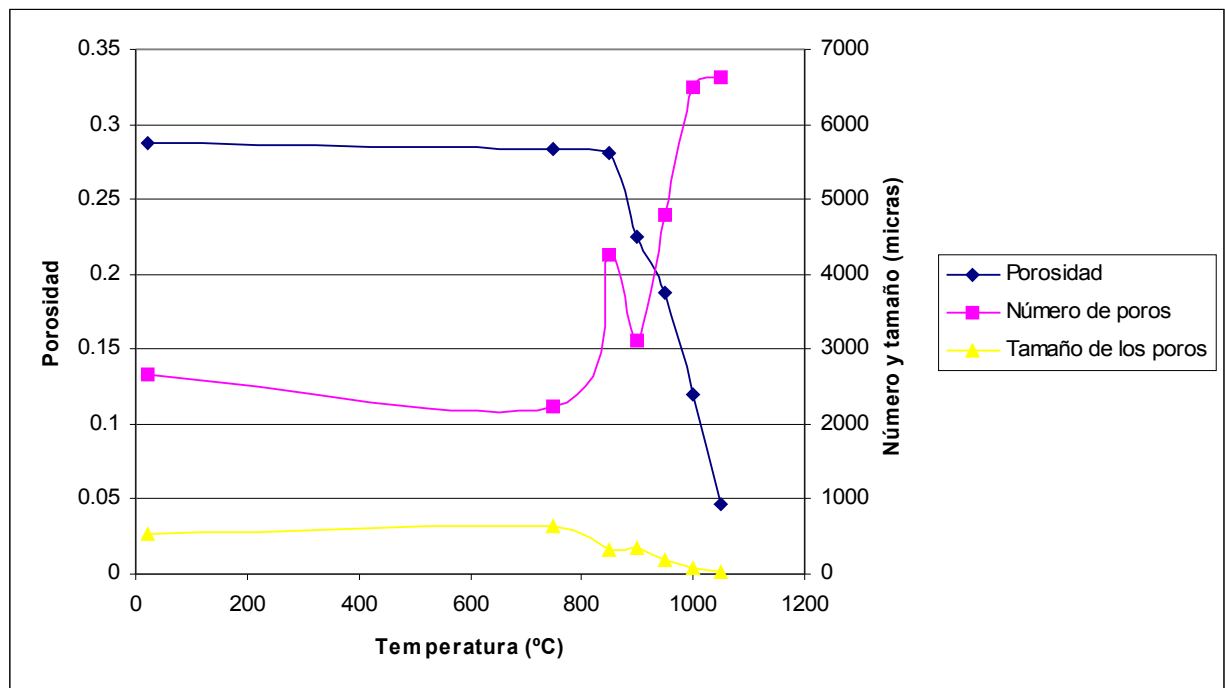


Figura 80: Comparativa entre la porosidad, el número y el tamaño de los poros para el acero inoxidable 0.4.

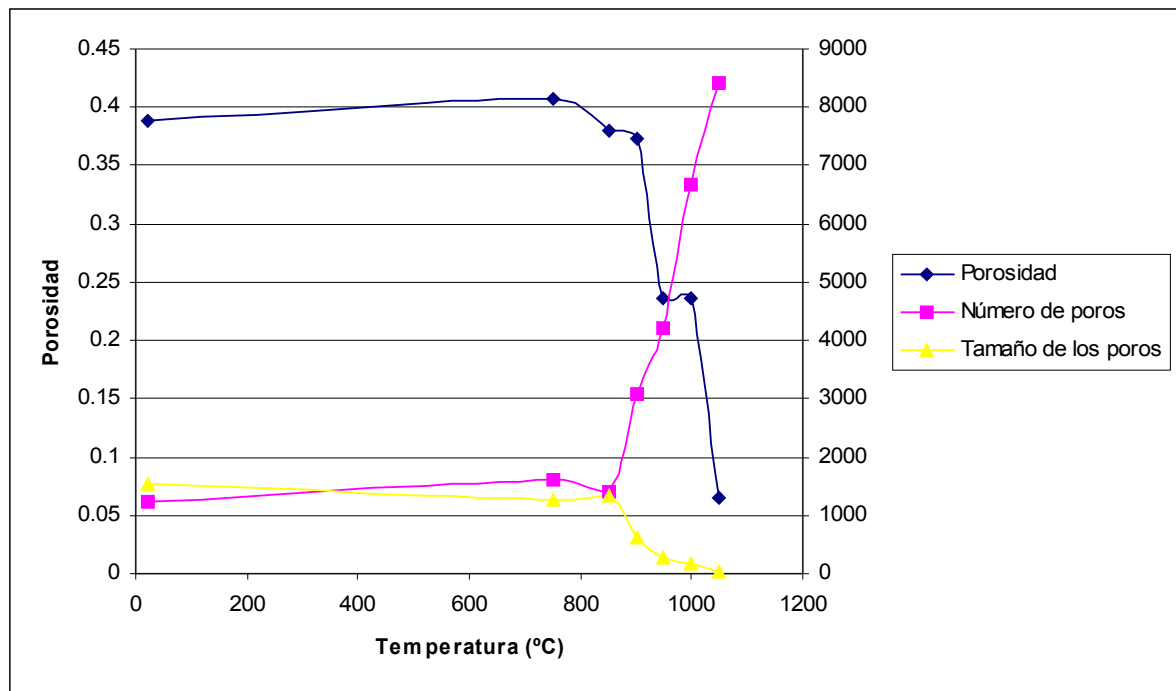


Figura 81: Comparativa entre la porosidad, el número y el tamaño de los poros para el acero inoxidable 0.6.

Existen dos tendencias, una incrementar, que ocurre en el número de poros, y otra a disminuir que sucede en la porosidad y en el tamaño de los poros. El descenso del tamaño de los poros debe tener más peso que el aumento del número de los mismos, para que de esa manera disminuya la porosidad. Esto ocurre, ya que como se ha visto anteriormente, el incremento de poros siempre es de muy pequeño tamaño, y aumentan siempre los de pequeño tamaño, con lo cual la porosidad bajará, tal y como sucede. Los tres parámetros evolucionan de manera pareja, produciéndose los cambios más bruscos para las mismas temperaturas de sinterización, que en el caso de menor porosidad de partida será más pronto, 750° C, que el de mayor, que será a partir de los 850° C.

Se ha estudiado la evolución cuantitativa de la porosidad, pero en cuanto a la forma de la misma todavía no se sabe nada. Para solucionar este problema se ha estudiado el coeficiente de circunferencialidad, que indica la cercanía de la forma del poro con respecto a la de una circunferencia, tal como se explicó en apartados anteriores.

Los resultados recogidos en referencia al coeficiente de circunferencialidad se exponen en la Figura 82 y la Tabla 20. Se observa que la evolución de los mismos no es suave, sino que tiene muchas variaciones, aunque la tendencia es a incrementar la circunferencialidad. La desviación con respecto a la media, es bastante elevada y no evoluciona claramente con la temperatura de sinterización, como ocurría en los otros casos. La variación de valores es más acusada para el acero de menor porosidad de partida, en cambio en el otro caso la tendencia al incremento es muchísimo más clara, a pesar de la variabilidad de los resultados. Esto no debería ser así, ya que a menor porosidad de partida más se deberían redondear los poros, tal y como ocurrió en casos anteriores, aunque esto se compensa con un repunte final del parámetro que indica que para la temperatura máxima de sinterización los poros con mayor coeficiente de circunferencialidad son los del acero inoxidable 0.4, fenómeno que si está en consonancia con lo observado anteriormente.

Tabla 20: Coeficiente de circunferencialidad (adimensional) y desviación del mismo, del acero inoxidable, obtenido mediante análisis de imagen.

Temperatura	Acero inoxidable 0.4	Desviación	Acero inoxidable 0.6	Desviación
20	0,4913	0,2329	0,4163	0,2418
750	0,5284	0,2563	0,5948	0,2447
850	0,6065	0,256	0,5471	0,2456
900	0,5247	0,2491	0,6228	0,2365
950	0,5625	0,2452	0,5495	0,2446
1000	0,5301	0,2174	0,5975	0,255
1050	0,7417	0,2408	0,6518	0,2043

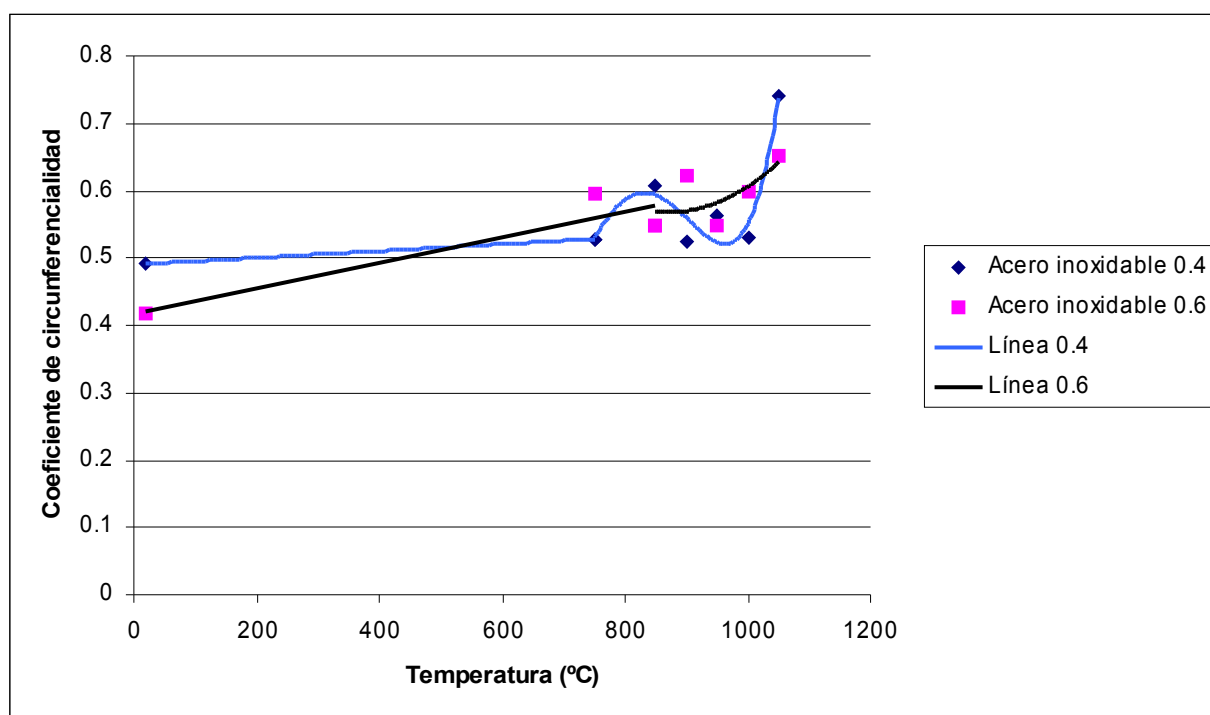


Figura 82: Evolución del coeficiente de circunferencialidad (adimensional) del acero inoxidable en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

Hay un último parámetro a analizar, que es el diámetro equivalente, con el también se puede corroborar la disminución que experimenta el tamaño de los poros a medida que aumenta la temperatura de sinterización. Los resultados obtenidos respecto a este parámetro se encuentran recogidos en la Tabla 21 y la Figura 83, que muestran una clara tendencia a la disminución. Los cambios notables de ambas evoluciones se producen a las temperaturas antes mencionadas, siendo un factor más que confirma los puntos donde comienza a producirse una influencia importante de la sinterización. La desviación con respecto a la media es muy elevada, lo que apoya la ya observada dispersión con respecto a la media del tamaño de los poros.

Tabla 21: Diámetro equivalente (μm) y desviación del mismo, del acero inoxidable, obtenidos mediante análisis de imagen.

Temperatura	Acero inoxidable 0.4	Desviación	Acero inoxidable 0.6	Desviación
20	13,806	22,2494	14,2525	42,131
750	16,7785	22,8182	15,0848	37,0362
850	12,22	16,3042	16,5096	38,0098
900	14,1424	16,0222	11,1525	25,312
950	11,2841	10,9406	11,7716	14,6452
1000	8,5282	6,5674	10,0519	11,0516
1050	5,6196	4,1294	5,9852	3,5969

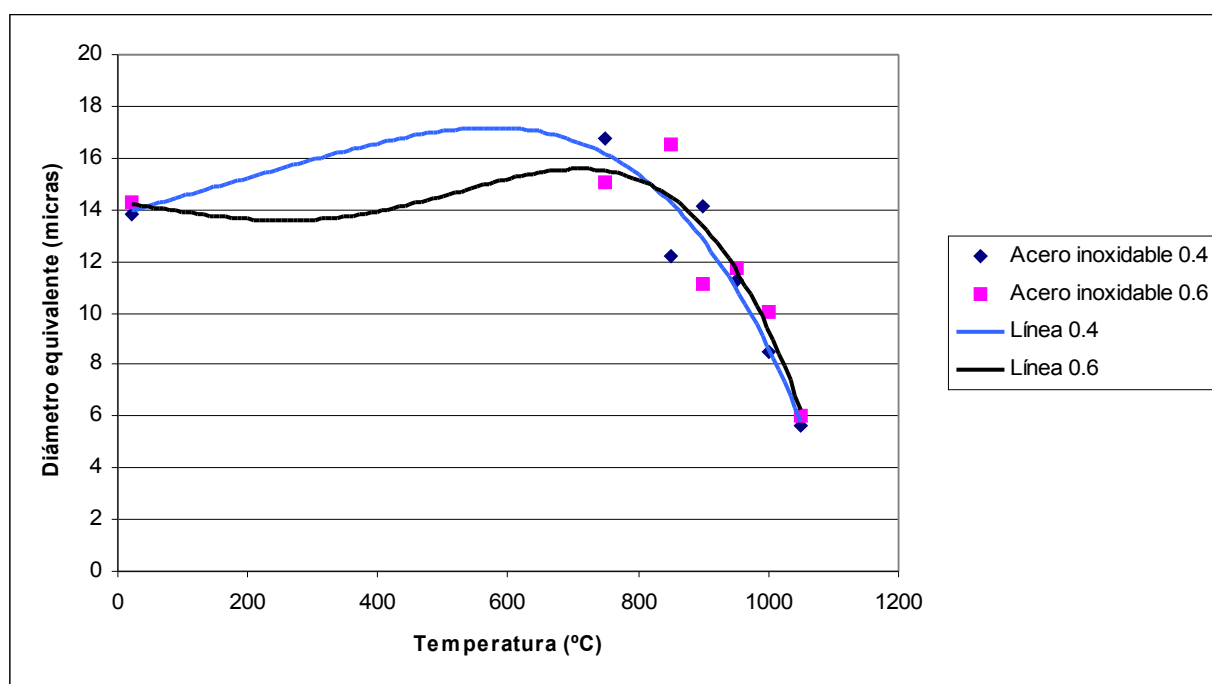


Figura 83: Evolución del diámetro equivalente del acero inoxidable en función de la temperatura de sinterización, obtenida mediante análisis de imagen.

Para tener una visión completa, se analizan a continuación una serie de micrografías, pertenecientes a las distintas probetas, sinterizadas a distintas temperaturas. El objetivo es poder percibir de manera visual como afecta la sinterización a las probetas, y ver su evolución con respecto a la temperatura de sinterización paso a paso.

- **Acero inoxidable 0.4 a 20° C**

En la Figura 84 se observa una porosidad bastante elevada, aunque los poros no son de las enormes proporciones que se podía observar en los anteriores materiales. Hay más porosidad de pequeño tamaño, fenómeno que no ocurría de manera tan acusada en los casos anteriores. Las partículas están claramente diferenciadas las unas de las otras, con uniones entre ellas muy poco definidas, mientras que los poros se extienden a lo largo de toda la probeta, existiendo mucha proximidad entre los mismos. Se observa que no hay ningún tipo de sinterización y que la poca compactación de la probeta es exclusivamente debida al prensado, ya que no aparece ningún cuello ni elemento que determine que ha existido un

proceso de sinterización. No se ha aplicado doble segmentación porque no se apreció ningún indicio de desprendimiento de partículas, a pesar de que la porosidad de partida es mayor en este caso que en el de los otros materiales, lo cual demuestra que el anclaje de las partículas producido por el prensado es muy efectivo en el acero inoxidable.

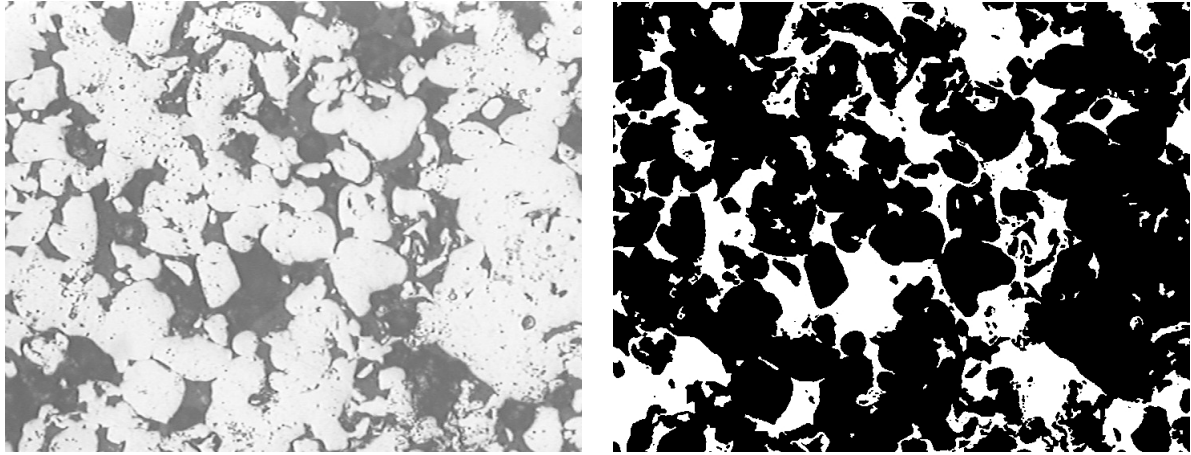


Figura 84: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sin sinterizar.

- **Acero inoxidable 0.4 a 750° C**

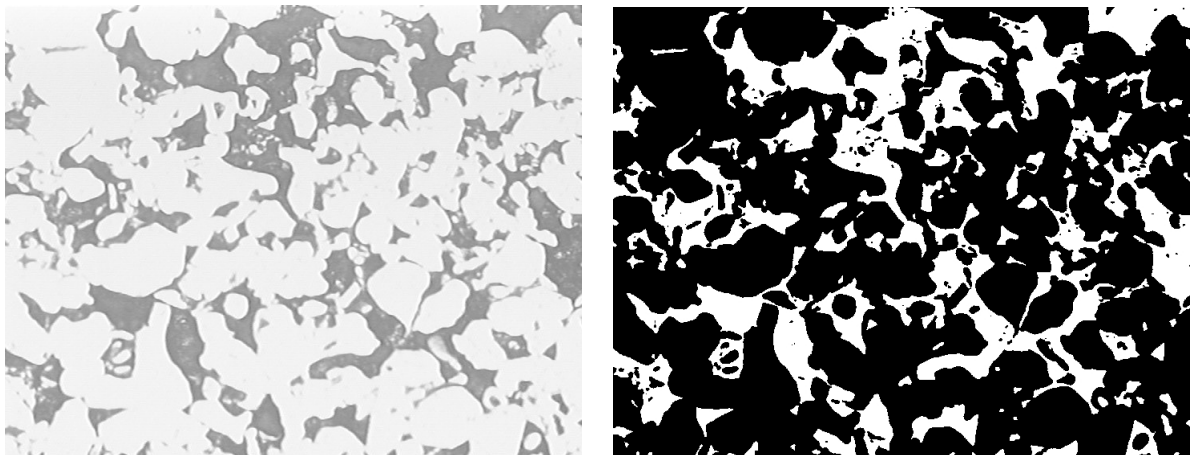


Figura 85: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 750° C.

La evolución con la temperatura apenas es perceptible, entre la Figura 84 y la Figura 85, quizás se aprecia un poco menos de porosidad y una mayor proximidad de unas partículas con otras, aunque sigue sin apreciarse ningún tipo de efecto producido por la sinterización. Persiste la enorme irregularidad en la forma de los poros, siguen existiendo poros de gran tamaño, partículas perfectamente definidas y uniones muy poco claras, más achacables a la acción del prensado que a un efecto producido debido al calentamiento, no se puede apreciar tampoco un cambio notable en el número de poros.

- **Acero inoxidable 0.4 a 850 ° C**

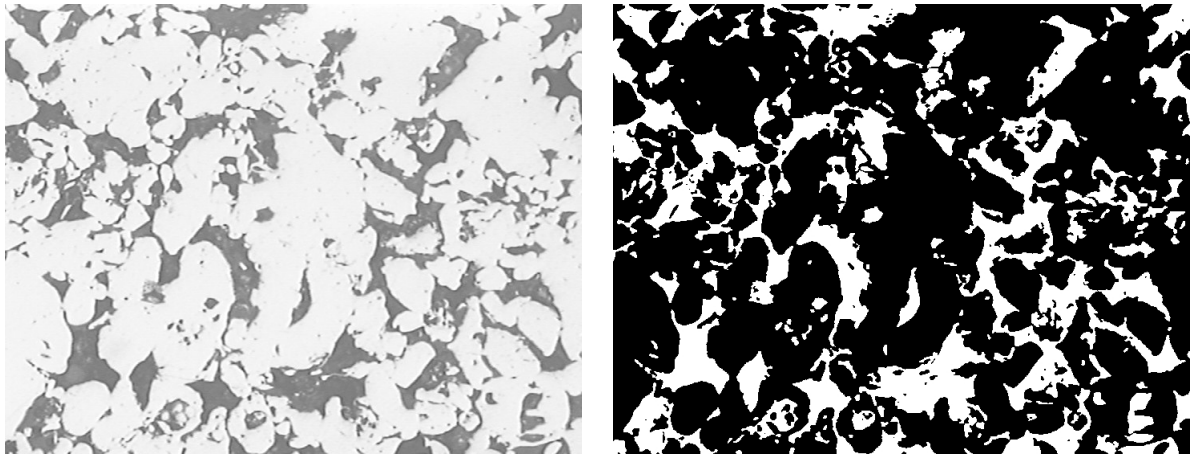


Figura 86: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 850° C.

En Figura 86 la evolución nuevamente es prácticamente imperceptible, se observa la formación de algún pequeño cuello entre partículas, pero comportando el hecho en si, un fenómeno no generalizado, es decir la influencia de la temperatura ha comenzado a notarse pero de una manera muy leve. Las propiedades de la porosidad son totalmente similares a las de los casos anteriores, no apreciándose ni el más ligero atisbo de modificación en las mismas.

- **Acero inoxidable 0.4 a 900° C**

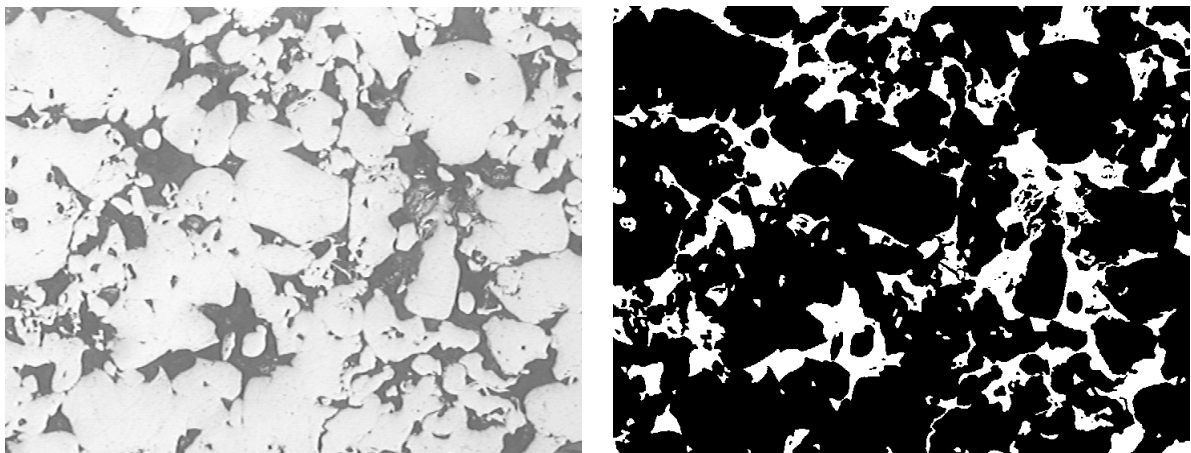


Figura 87: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 900° C.

El fenómeno más perceptible en la Figura 87, de que ya está afectando de manera perceptible la sinterización en la probeta, es el descenso de la porosidad. Los poros de gran tamaño han disminuido. Comienzan a verse más uniones entre partículas, aunque debido a la forma de las mismas la apreciación de este fenómeno se hace bastante complicada. Todavía se aprecian claramente las unas de las otras. Se mantiene la enorme irregularidad en la forma de los poros, y la cercanía entre los mismos. La sinterización ha comenzado a hacer su efecto, pero todavía tiene un carácter dominante en la porosidad la influencia del prensado.

- **Acero inoxidable 0.4 a 950° C**

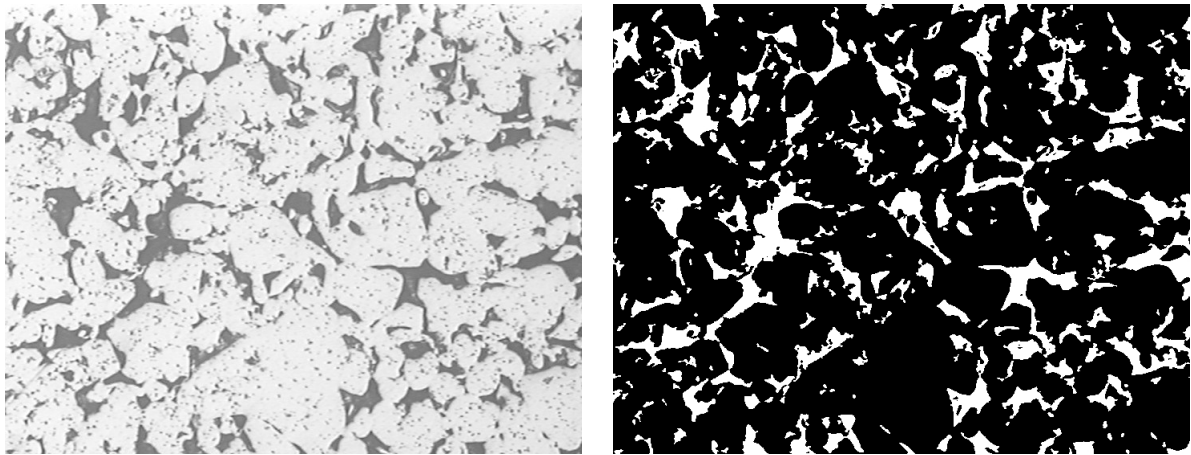


Figura 88: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 950° C.

Ya si son completamente perceptibles una gran cantidad de uniones entre las distintas partículas, las cuales todavía pueden distinguirse las unas de las otras en la Figura 88. La cantidad de porosidad ha disminuido de manera notable, y ya apenas se perciben poros de gran tamaño. El número de poros ha aumentado de forma clara, la forma de los mismos todavía es irregular, y comienzan a alejarse los unos de los otros. El efecto de la sinterización ya se ha hecho notar en la porosidad, que empieza a adquirir las características que resultan de la acción de la misma.

- **Acero inoxidable 0.4 a 1000° C**

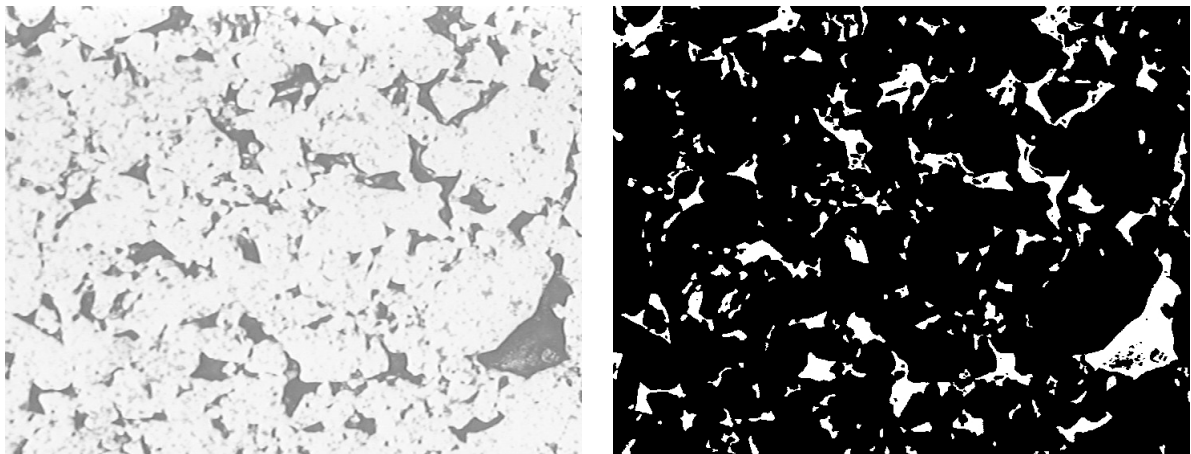


Figura 89: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 1000° C.

En la Figura 89, la porosidad se encuentra mucho más disminuida que en la Figura 88. Las uniones están más formadas aunque se atisba todavía la forma de algunas partículas. Los poros han disminuido más de tamaño y han aumentado en su número, comenzando a separarse de forma apreciable los unos de los otros. La forma todavía es bastante irregular, aunque comienza a apreciarse una tendencia a la forma circular en la mayor parte de ellos. La sinterización tiene un peso específico muy importante en la estructura de la probeta, para esta temperatura, siendo ya imperceptible la formación que tenía la porosidad en el momento en que fue prensada.

- **Acero inoxidable 0.4 a 1050° C**

En la Figura 90, las partículas ya no se diferencian las unas de las otras, ni siquiera se distinguen las uniones entre ellas. Forman una masa compacta en la que no se diferencian las partes, existe una gran cantidad de poros de pequeño tamaño distribuidos en distintas zonas, separadas las unas de las otras, a lo largo de la probeta. Ya no existen poros de gran tamaño, todos tienen una forma bastante redondeada, lo cual se ve incentivado por el pequeño tamaño de los mismos, ya que a menor tamaño la forma es más redondeada, como se puede apreciar tanto en las imágenes del acero inoxidable, como en las de los otros materiales, y corroborarlo numéricamente mediante el análisis del coeficiente de circunferencialidad, que se ha realizado a cada poro. El fenómeno de la sinterización, es fundamental para esta temperatura, ha creado una estructura compacta, con porosidad residual, y no existe ningún tipo de atisbo de la existencia de otro fenómeno de compactación de las partículas del acero inoxidable. La serie de imágenes que se han recogido con respecto a la sinterización de este material, son un perfecto ejemplo de cómo va actuando progresivamente el efecto de la sinterización en la probeta.

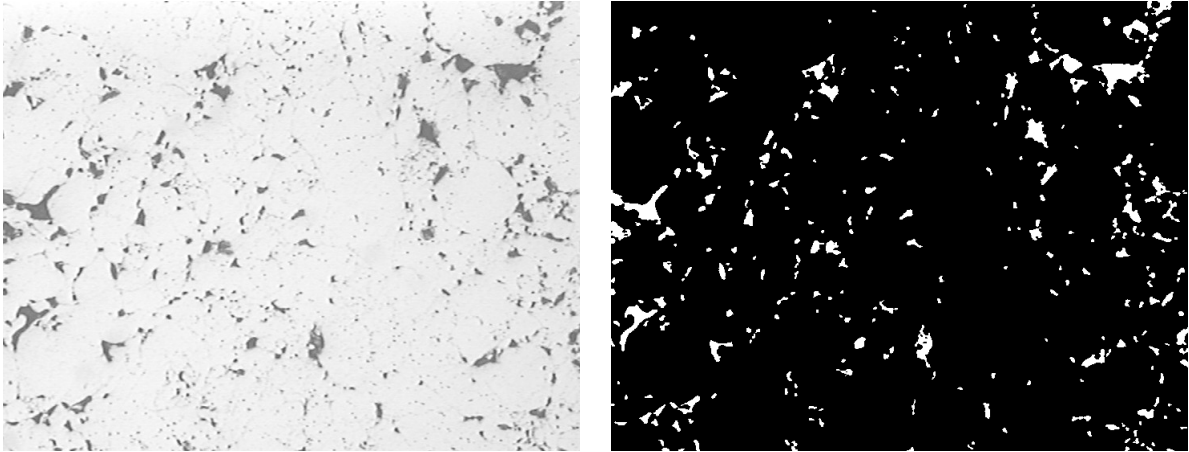


Figura 90: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.4, sinterizado a 1050° C.

- **Acero inoxidable 0.6 a 20° C**

En la Figura 91, hay una grandísima cantidad de porosidad, las partículas de acero están prácticamente separadas las unas de las otras, sin apreciarse ningún tipo de unión entre ellas. Los poros son de gran tamaño, y están prácticamente interconectados unos con otros formando un gran poro único. Las pocas uniones existentes entre las partículas son exclusivamente fruto del prensado, la forma de los poros es enormemente irregular fruto de sus grandes dimensiones. La situación comparada con la de la probeta de acero inoxidable 0.4 sin sinterizar, es de una mayor porosidad, con los poros de muchísimo mayor tamaño y una conexión entre partículas mucho menor, con una cantidad de poros notablemente menor.

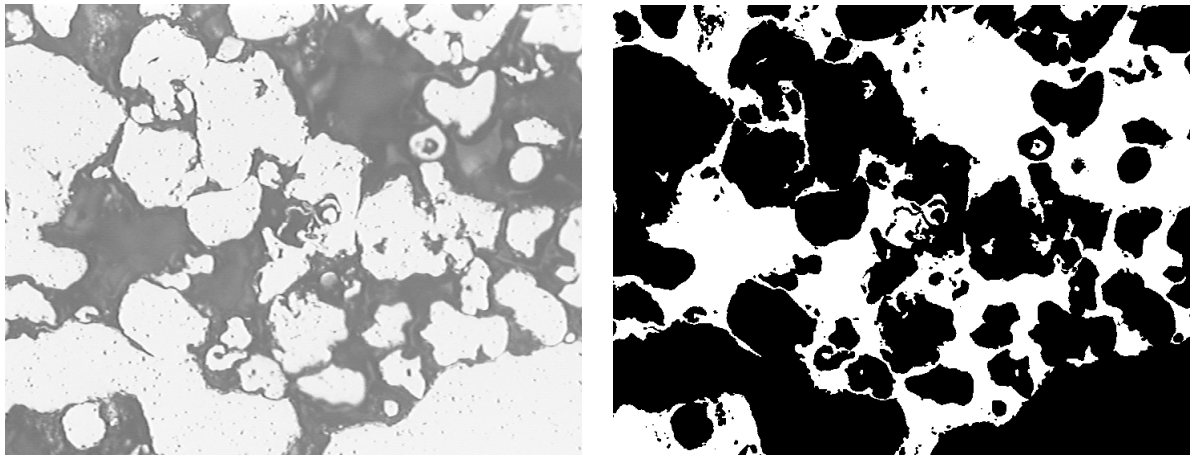


Figura 91: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sin sinterizar.

Acero inoxidable 0.6 a 750° C

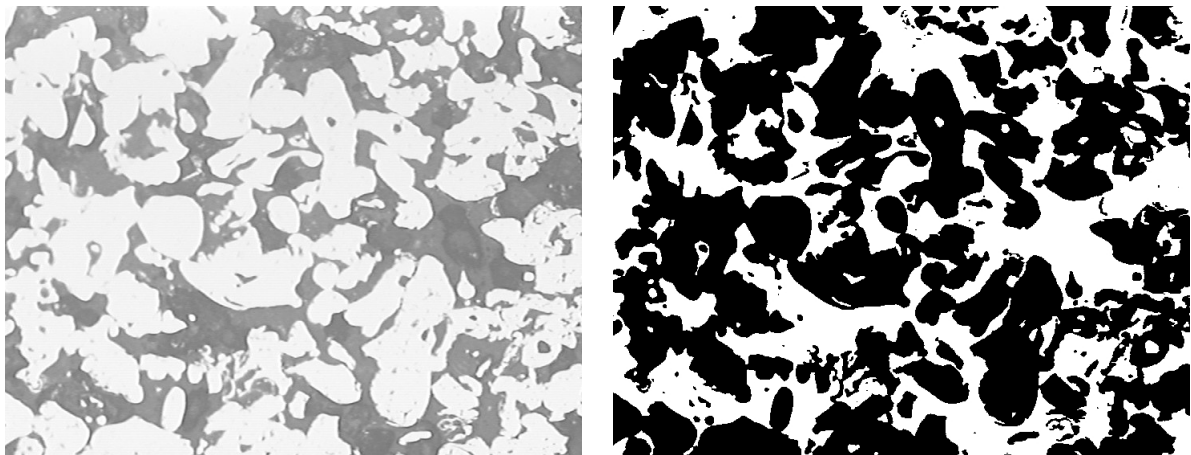


Figura 92: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 750° C.

En la Figura 92 se aprecia que la situación se mantiene prácticamente sin evolución, la temperatura de sinterización no ha tenido casi ningún efecto práctico, no se aprecia ningún tipo de unión debida a la misma, las partículas se encuentran fuertemente diferenciadas las unas de las otras. Los poros son enormemente irregulares, aunque parece que el tamaño es ligeramente menor que en el caso anterior, pero el número de poros ha aumentado como efecto contrario. La porosidad parece ser similar en ambos casos. La ligera unión entre partículas es exclusivamente debida al fenómeno de formación de la probeta. Si se compara con el caso de la probeta de menor porosidad de partida, con esta a similar temperatura de sinterización, se concluye que la influencia de la temperatura de sinterización en ambos casos ha sido prácticamente la misma, es decir, prácticamente nula, y las diferencias morfológicas entre ambas son debidas a la diferencia de compactado entre ellas.

- **Acero inoxidable 0.6 a 850° C**

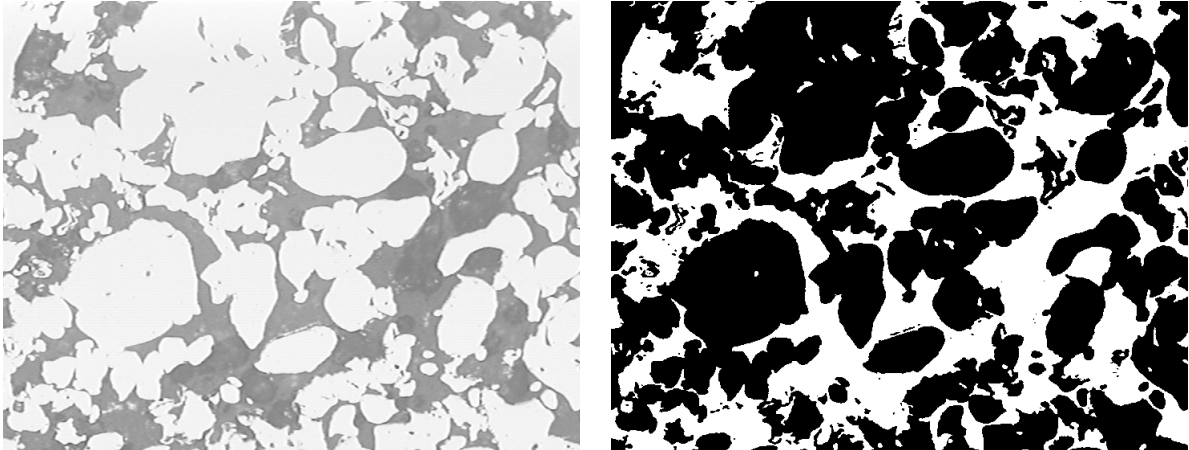


Figura 93: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 850° C.

En la Figura 93, el efecto de la temperatura sigue siendo prácticamente imperceptible, la situación en cuanto a las características de la probeta no se ha visto modificada. Comparando esta evolución, con respecto a la que ha ocurrido con la probeta de menor porosidad de partida, se concluye que prácticamente es similar con la ligera diferencia de que en el caso que nos ocupa, el efecto de la sinterización es completamente imperceptible, mientras en el otro, para esta temperatura de sinterización comienza a apreciarse algún efecto debido al fenómeno de sinterización.

- **Acero inoxidable 0.6 a 900° C**

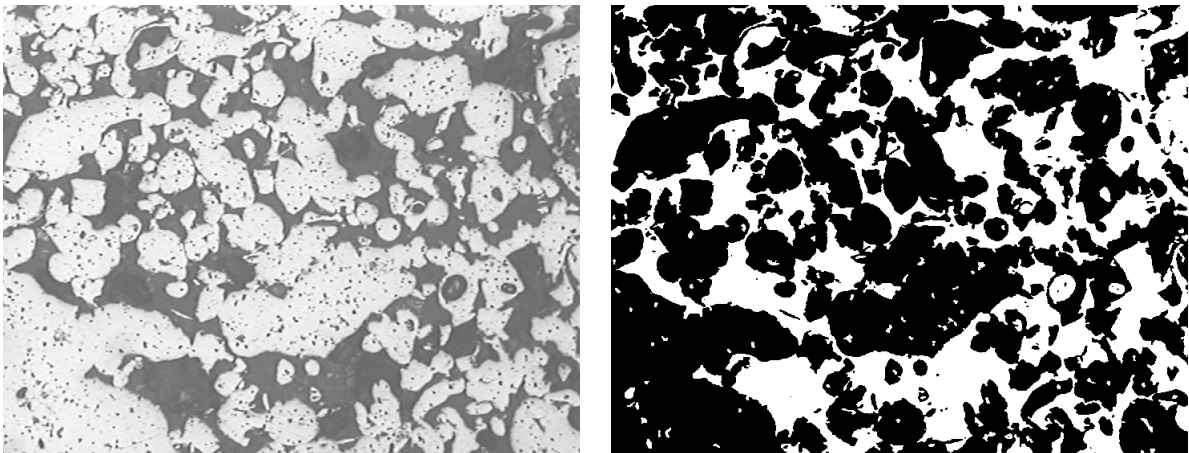


Figura 94: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 900° C.

Se aprecia un ligero efecto debido a la sinterización, con algunas uniones entre partículas que parecen ser fruto de la misma. Persiste una alta cantidad de porosidad, y una forma de poros muy irregular. Todavía el fenómeno de sinterización no es un efecto prioritario en la morfología resultante en la probeta. Se observa un crecimiento del número de poros en el conjunto global, muchos de ellos de pequeño tamaño. El desarrollo observado en la probeta es similar al caso de la probeta de acero inoxidable 0.4 sinterizada a 850° C, es

decir la temperatura necesaria para causar el mismo efecto en ambos casos es ligeramente menor para el caso en el cual la porosidad es menor. Para temperaturas similares, se observa que en el caso de menor porosidad de partida el efecto de la sinterización ya es bastante notable, mientras que en el caso que se trata en este momento, el efecto es muy ligero, tal y como se ha especificado anteriormente.

- **Acero inoxidable 0.6 a 950° C**

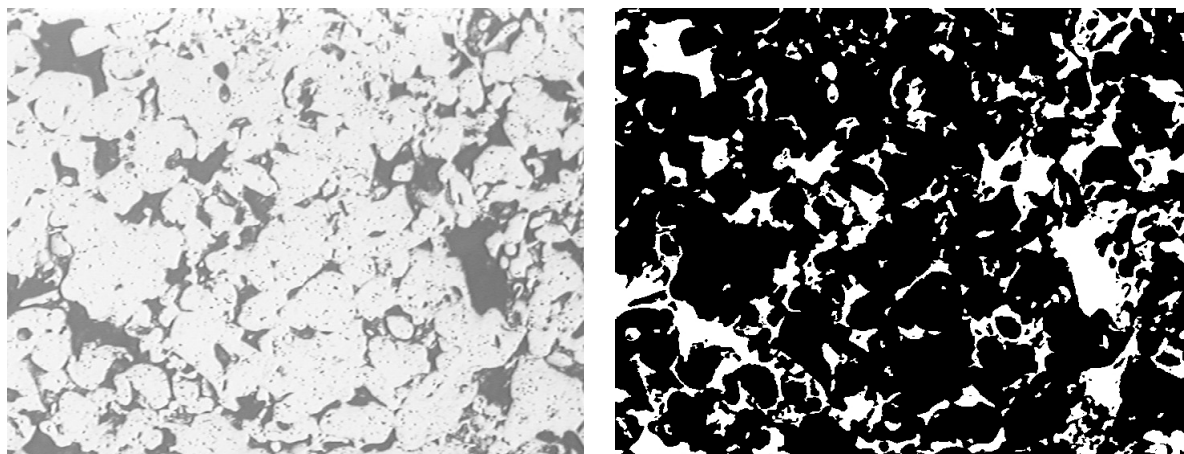


Figura 95: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 950° C.

Para esta temperatura de sinterización, el efecto debido a la misma ya es claramente perceptible en la morfología de la probeta, las partículas comienzan a confundirse las unas con las otras, tal como se aprecia en la Figura 95. El tamaño de los poros ha disminuido notablemente, aumentando también de forma notoria su número, aunque la forma de los mismos aún es enormemente irregular. A pesar de que la porosidad es mayor en este caso que en aquel de menor porosidad de partida, el efecto de la sinterización, en cuanto al resultado morfológico de la estructura del material, se ha equiparado para ambos casos.

- **Acero inoxidable 0.6 a 1000° C**

En la Figura 96, se observa la morfología de una probeta de acero inoxidable, resultante de la sinterización de la misma a una temperatura de 1000° C. En ella se aprecia una situación muy similar al caso en que la probeta fue sinterizada a 950° C. La diferencia fundamental entre ambas, es la disminución de tamaño de los poros que se ha producido en este caso, aunque este efecto tampoco es excesivamente acusado, luego se corrobora la influencia notable que tiene la sinterización con respecto a la morfología de la probeta, aunque todavía este efecto puede ser más acusado, cosa que ocurre para el mismo caso pero con una porosidad de partida menor, donde la diferencia entre partículas es completamente imperceptible, lo cual no ocurre en el caso que se está estudiando en este momento.

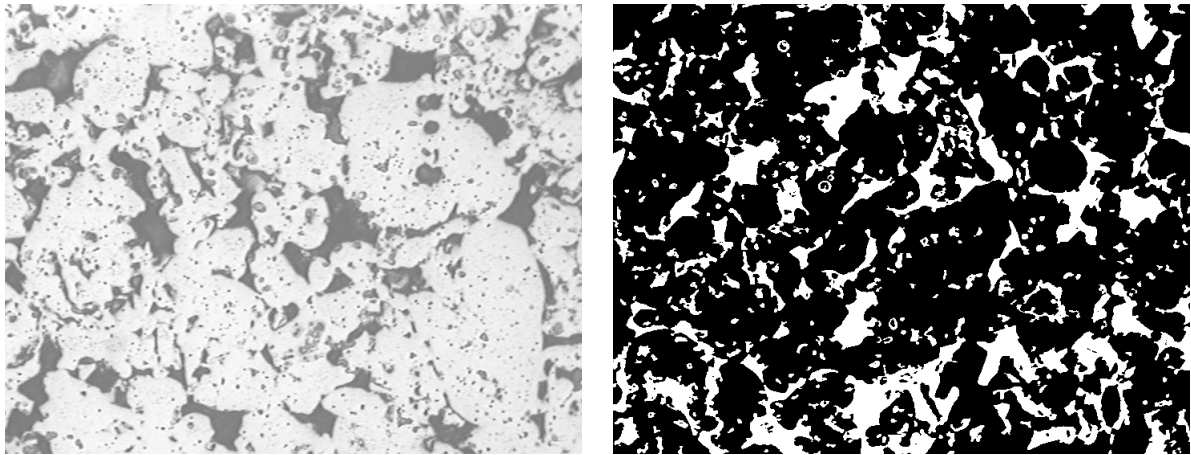


Figura 96: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 1000° C.

- **Acero inoxidable 0.6 a 1050° C**

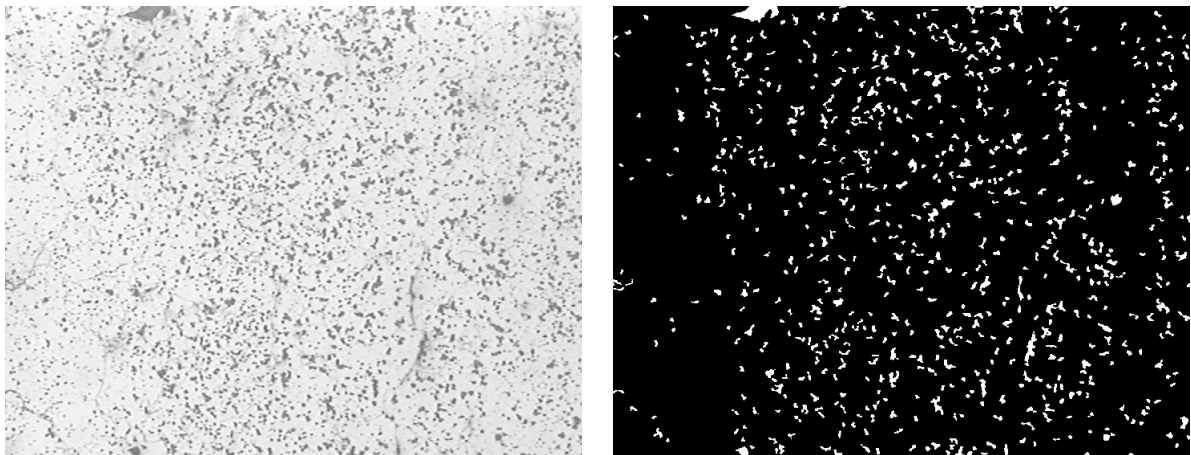


Figura 97: Micrografía (izquierda) e imagen segmentada (derecha) del acero inoxidable 0.6, sinterizado a 1050° C.

El efecto de la sinterización ya es prácticamente total, las partículas no se diferencian unas de las otras, formando una masa compacta, en la que hay una gran cantidad de pequeños poros de muy pequeño tamaño y de forma redondeada, que crean una porosidad residual que con una mayor temperatura o tiempo de sinterización se eliminará en parte. El efecto es, en todo punto, similar al caso en el cual se partió de una porosidad menor, con la diferencia básica de que la porosidad residual es mucho mayor en el caso actual que en el otro. Al igual que ocurrió con la evolución de la porosidad en el caso del acero inoxidable 0.4, la evolución del acero inoxidable 0.6 recogida muestra perfectamente como la sinterización va modificando la estructura de la probeta hasta transformarla en un material completamente denso a excepción de una pequeña porosidad residual.

5.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DE LOS TRES MATERIALES

En este apartado se estudian las evoluciones de los distintos materiales con el objetivo de obtener algunas propiedades comunes a los tres materiales, teniendo en cuenta solo el análisis dimensional.

En primer lugar se presenta una evolución de la porosidad normalizada frente a la temperatura normalizada de sinterización de los tres materiales en la Figura 98 y la Figura 99, para una porosidad inicial de 0.6 y 0.4, respectivamente.

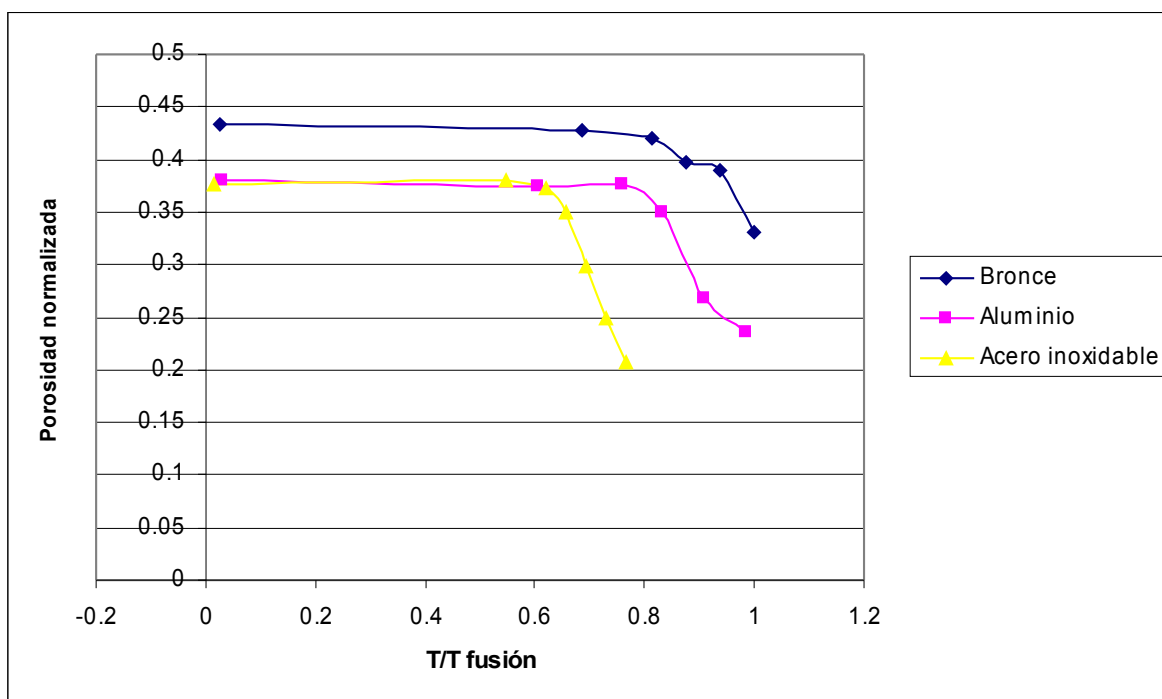


Figura 98: Comparación de la porosidad normalizada en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.4.

Teniendo en cuenta los resultados de las porosidades de cada uno de los materiales, se observa que tanto para el acero inoxidable como para el bronce, la curva de decremento de porosidad tiene una pendiente mayor en el caso en que la porosidad de partida es mayor, en cambio en el aluminio el comportamiento es inverso, lo que se puede considerar como una anomalía. Continuando la comparación de los resultados de la porosidad, se puede observar que en el acero inoxidable es el material donde se produce un mayor efecto de compactación, mientras que el aluminio y el bronce alternan posiciones en función de la porosidad de partida.

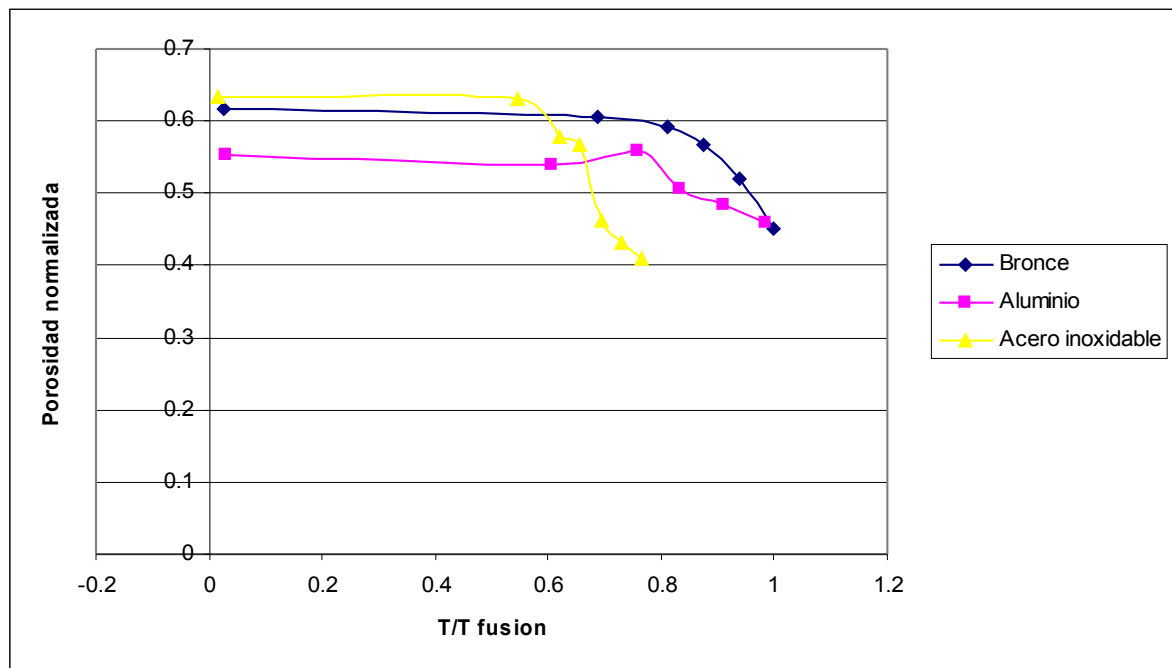


Figura 99: Comparación de la porosidad normalizada en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.6.

A pesar de partir de una porosidad normalizada similar, las porosidades de partida son diferentes en cada uno de los materiales, ya que dependen de la porosidad de golpeo de cada uno de ellos que es diferente en los tres casos. En el material en el que se parte de una mayor porosidad, es en el que se produce un mayor decremento de la misma, siguiendo una tendencia tal que, a mayor porosidad de partida mayor decremento de la porosidad, efecto que se ve alterado exclusivamente en el aluminio 0.6, que como ya se ha especificado en varias ocasiones presenta un comportamiento anómalo.

Por otro lado, en cuanto al análisis de la evolución del diámetro y de la altura, se puede llegar a una conclusión general según la cual siempre se produce un mayor disminución de la altura que del diámetro, esto puede ser debido a que a la hora del prensado, la porosidad sea más homogénea en función del diámetro que en función de la altura.

5.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE IMAGEN DE LOS TRES MATERIALES

En este apartado se estudian las evoluciones de los distintos materiales con el objetivo de obtener algunas propiedades comunes a los tres materiales, de forma que indiquen un comportamiento general en cuanto a la sinterización.

En primer lugar se presenta una evolución de la porosidad normalizada frente a la temperatura normalizada de sinterización de los tres materiales en la Figura 100 y la Figura 101, para una porosidad inicial de 0.6 y 0.4, respectivamente. En ambas gráficas, se observa que los compactos en verde parten de diferente porosidad normalizada. Asimismo, al aumentar la temperatura normalizada de sinterización, la tendencia a la disminución de la porosidad, es más elevada conforme es mayor el valor de la porosidad de golpeo, aunque la tendencia es bastante similar en el caso del bronce y del aluminio, siendo la diferencia mucho más notable para el acero inoxidable.

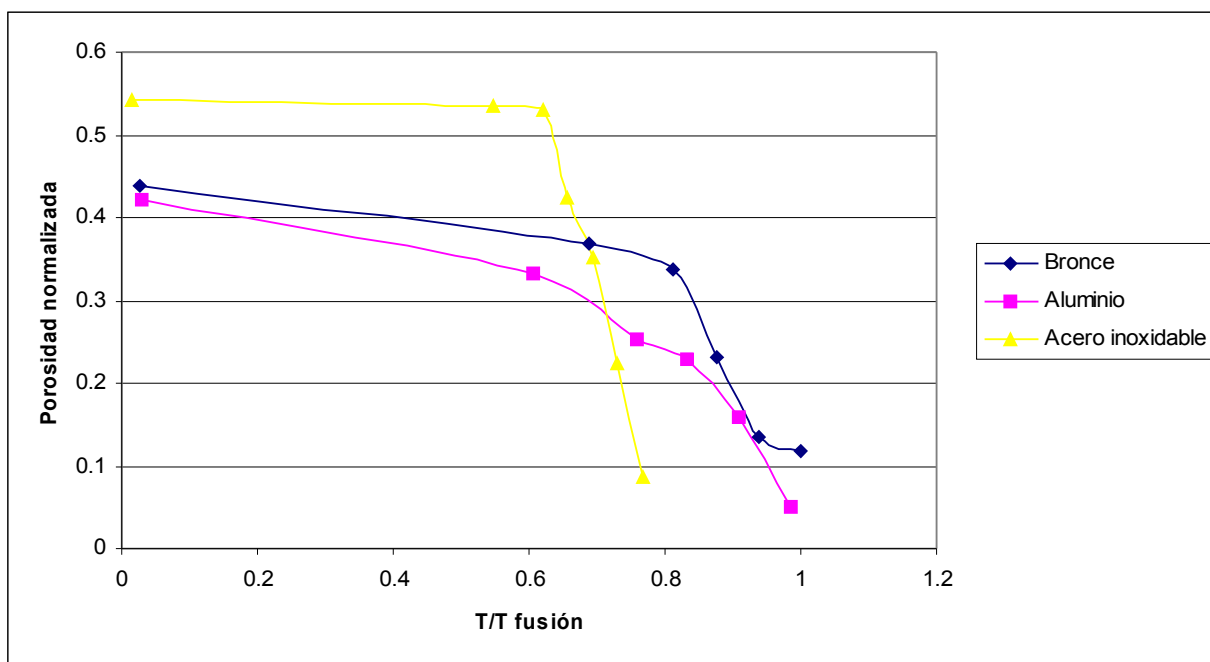


Figura 100: Comparación de la porosidad normalizada en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.4.

La tendencia observada en cuanto a la porosidad normalizada también se produce en cuanto al número de poros, que va aumentando cada vez más conforme aumenta la porosidad de golpeo, lo cual tiene bastante sentido, ya que si se parte de mayor porosidad, esta se dividirá mucho más luego cuando se vaya eliminando la misma se dividirán los poros en muchos más.

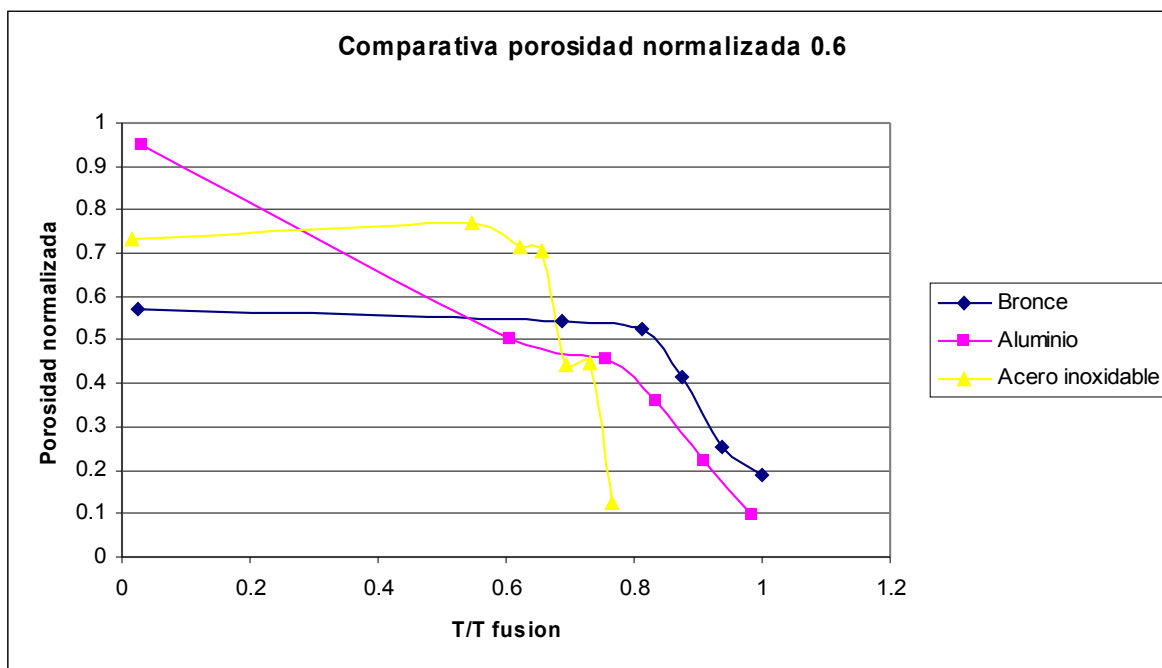


Figura 101: Comparación de la porosidad normalizada en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.6.

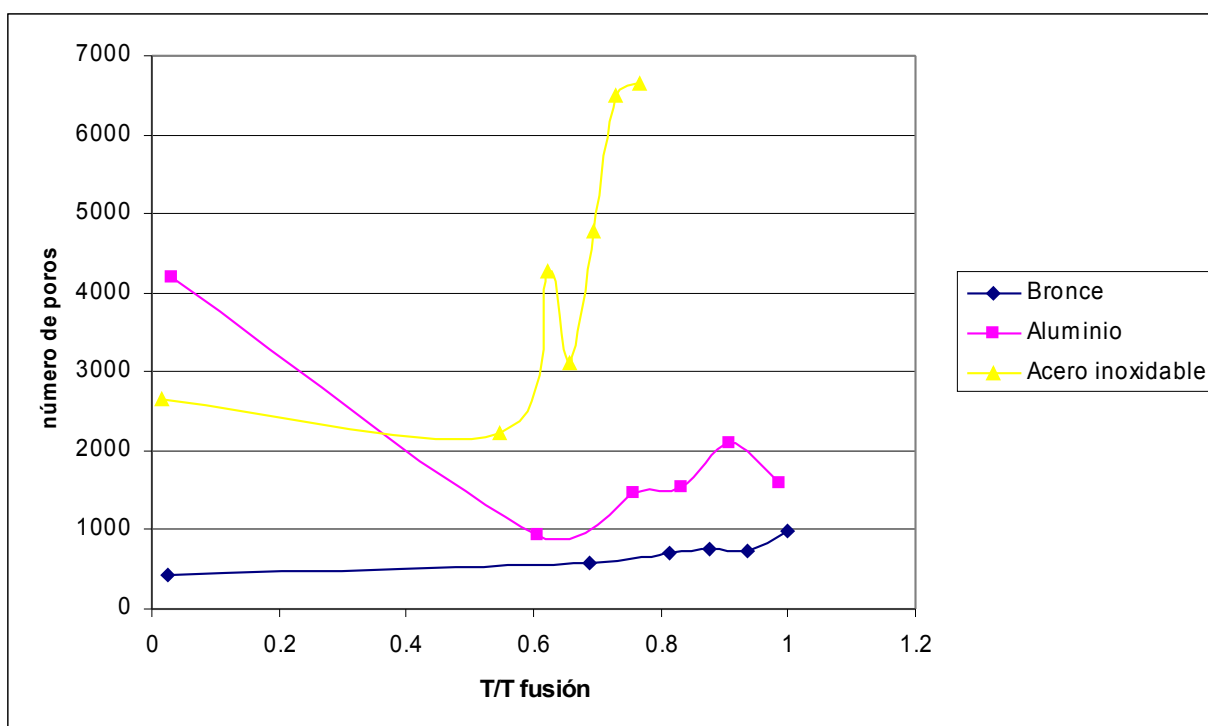


Figura 102: Comparación del número de poros en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.4.

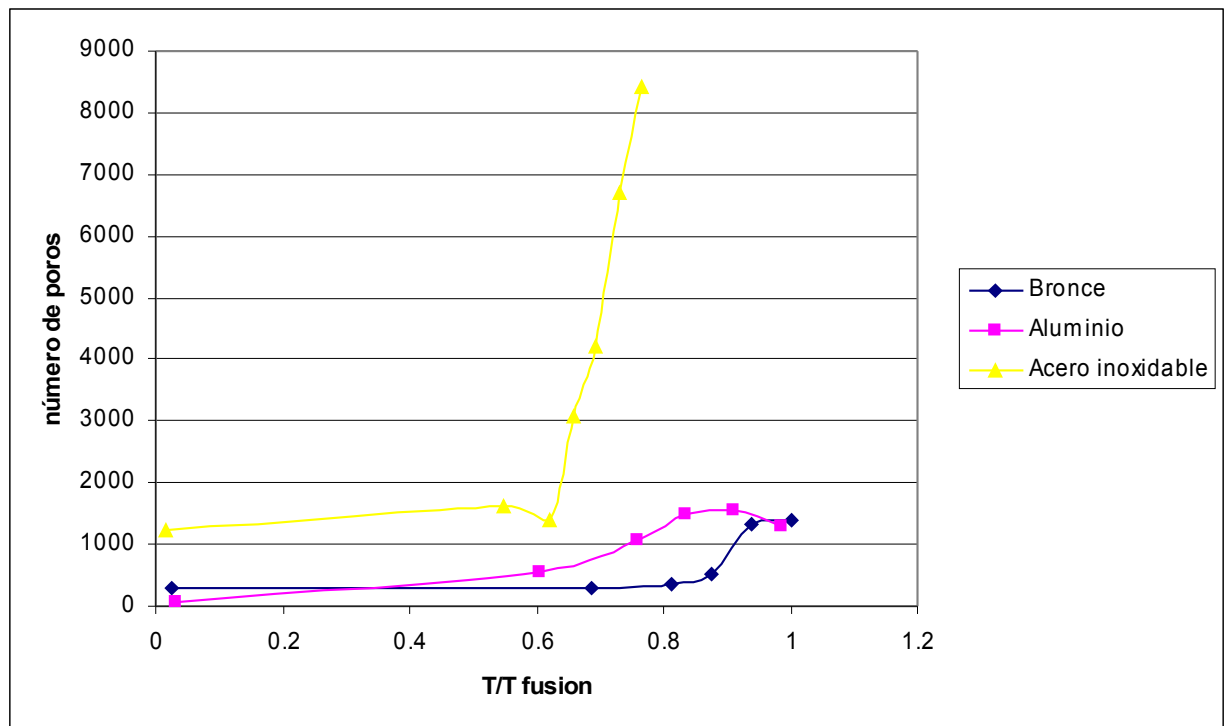


Figura 103: Comparación del número de poros en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.6.

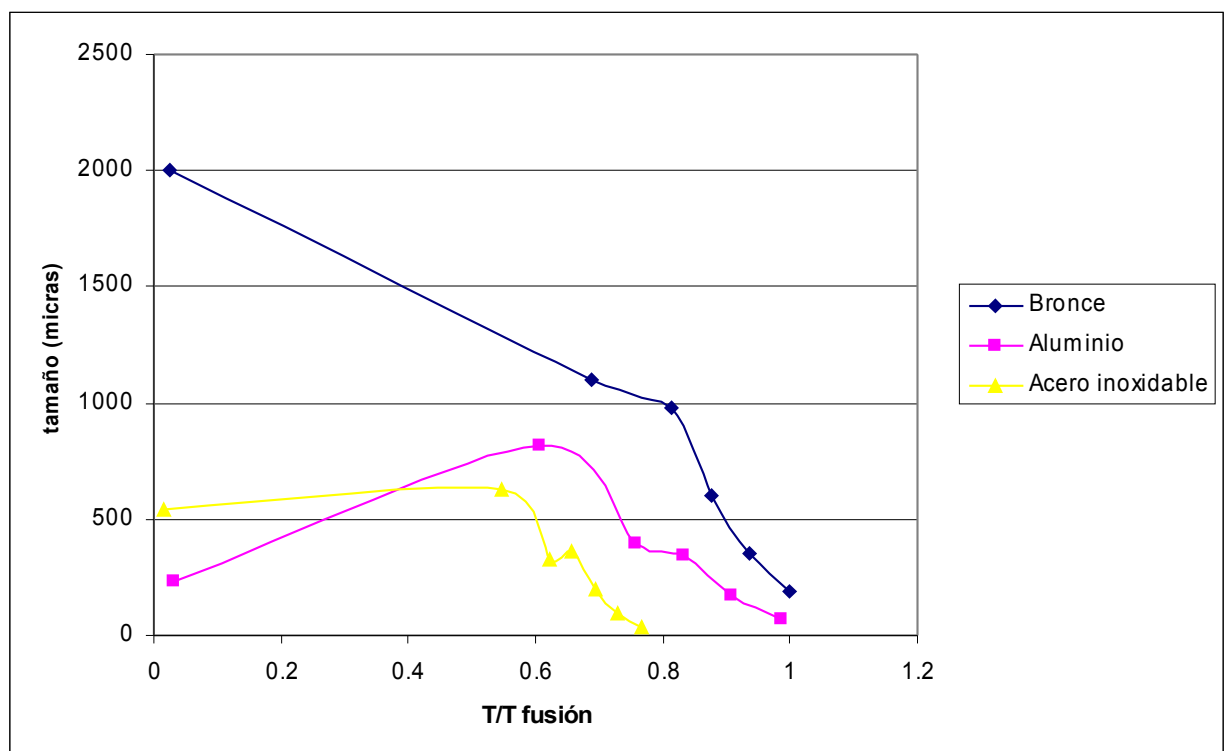


Figura 104: Comparación del tamaño de poros en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.4.

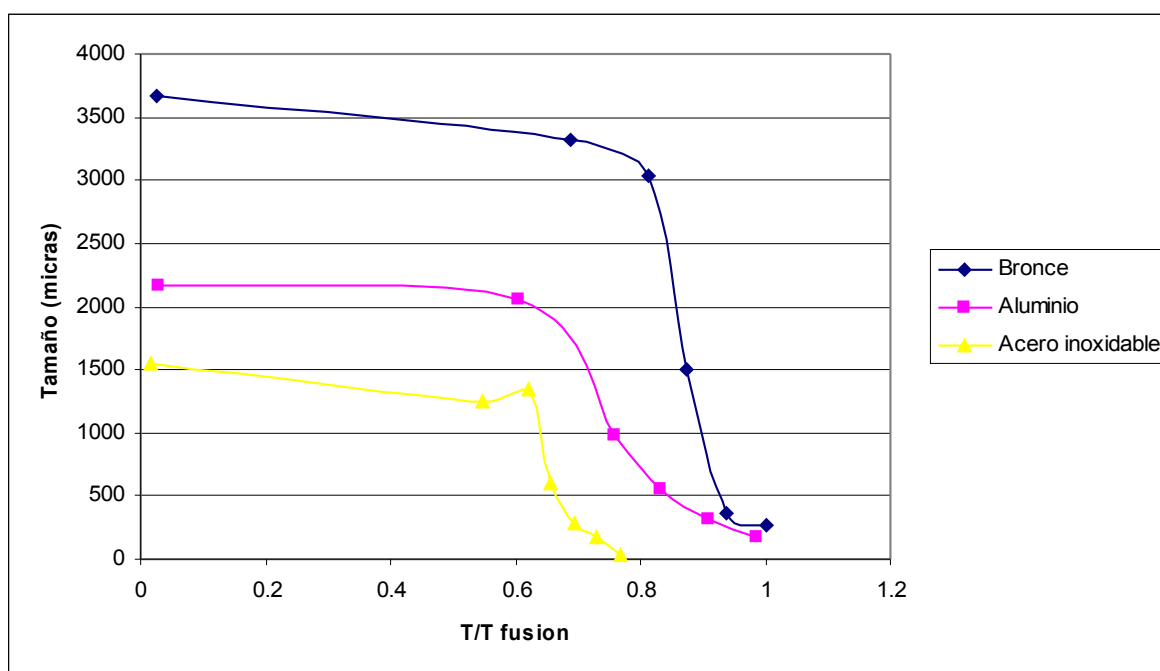


Figura 105: Comparación del tamaño de poros en función de la temperatura normalizada de sinterización para los tres materiales, partiendo de una porosidad normalizada inicial de 0.6.

Desde la Figura 102 hasta la Figura 105 se realizan comparaciones entre los materiales con respecto al número de poros y a su tamaño. En ellas se observa que el tamaño de los poros experimenta un efecto contrario al de la porosidad, es decir los poros de mayor tamaño son los del bronce, seguidos de los del aluminio, para finalizar con los más pequeños que son los del acero inoxidable. Es decir, a mayor número de poros, y mayor porosidad, más pequeños van a ser los poros, mientras que si ocurre lo contrario aumentará el tamaño de los mismos. Se puede observar que esta tendencia no depende de la temperatura de fusión, ya que en el caso de los materiales tratados, el aluminio es el que funde antes, en cambio, la evolución de las características siempre se encuentra entre las de los otros dos.

En cuanto a la densidad ocurre exactamente lo mismo que con la temperatura de fusión, luego el parámetro fundamental, en cuanto a la evolución de las distintas propiedades de la porosidad y de esta misma, es la porosidad de partida.

En cuanto la forma de los poros, el coeficiente de circunferencialidad parte de un valor menor, cuanto mayor es tamaño de los poros, aumentando en todos los casos, pero al contrario de lo que ocurre con todas las propiedades, los poros del bronce adquieren una mayor circunferencialidad que los del aluminio, para las temperaturas de sinterización más altas, esto se puede achacar a la mayor regularidad de las partículas de bronce, que se acaban adaptando de mejor forma a la sinterización, que las del aluminio que son más irregulares. La forma de los poros del acero inoxidable tiene un coeficiente de circunferencialidad todavía mayor que la de los otros materiales, a pesar de ser de partículas de superficie bastante irregular, pero el tamaño de los poros de los poros del acero inoxidable es muchísimo menor que el de los otros dos materiales, que tienen un tamaño de poros mucho más cercano entre ellos.

5.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES MEDIANTE MASA Y DIMENSIONES Y DEL ANÁLISIS DE IMAGEN

Con el fin de comparar los resultados de la porosidad, medida por el método de análisis de imagen o por el de la masa y dimensiones, se exponen estos desde la , hasta la Figura 111.

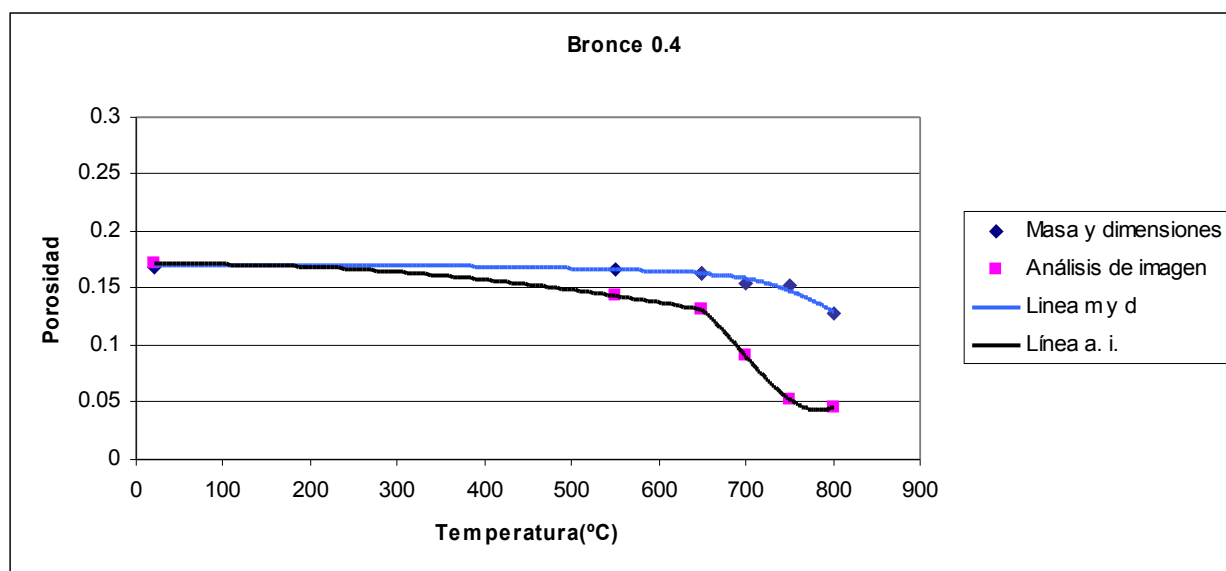


Figura 106: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del bronce 0.4.

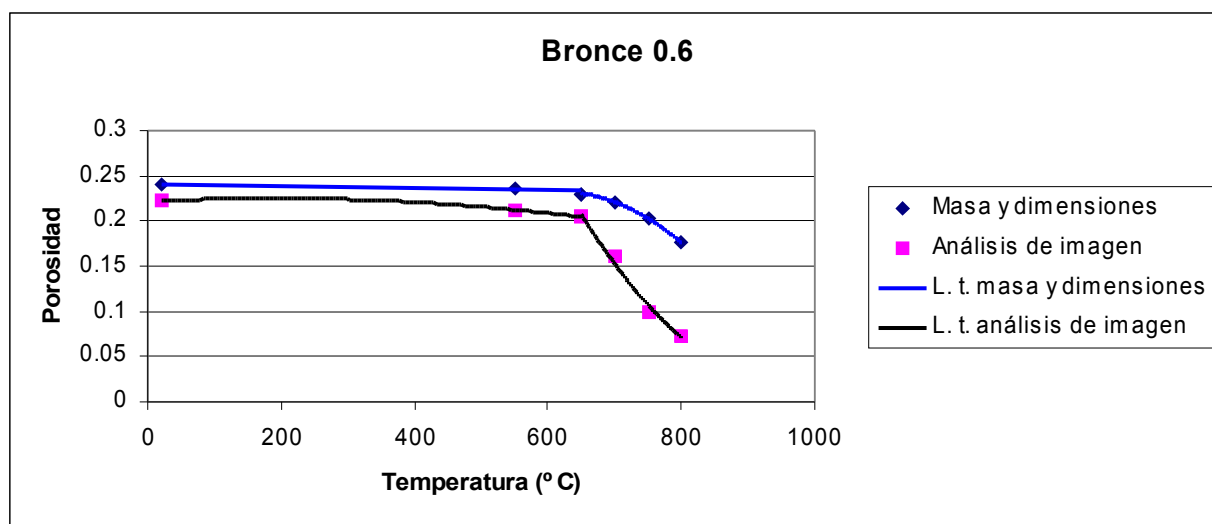


Figura 107: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del bronce 0.6.

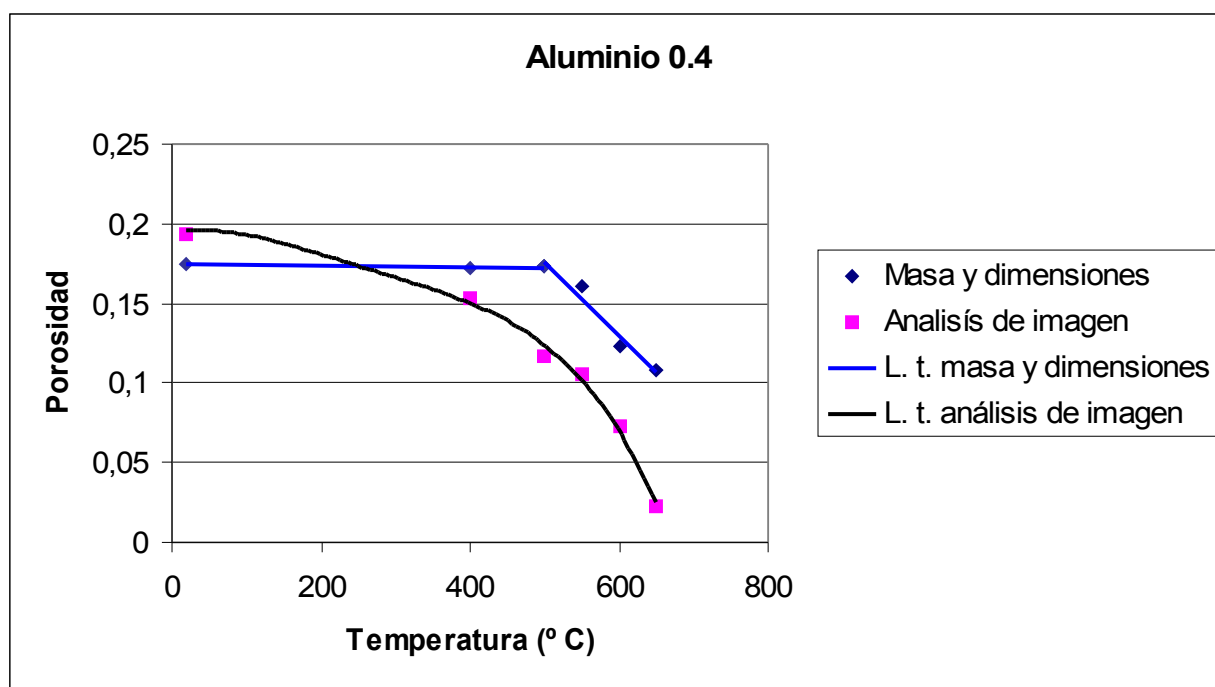


Figura 108: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del aluminio 0.4.

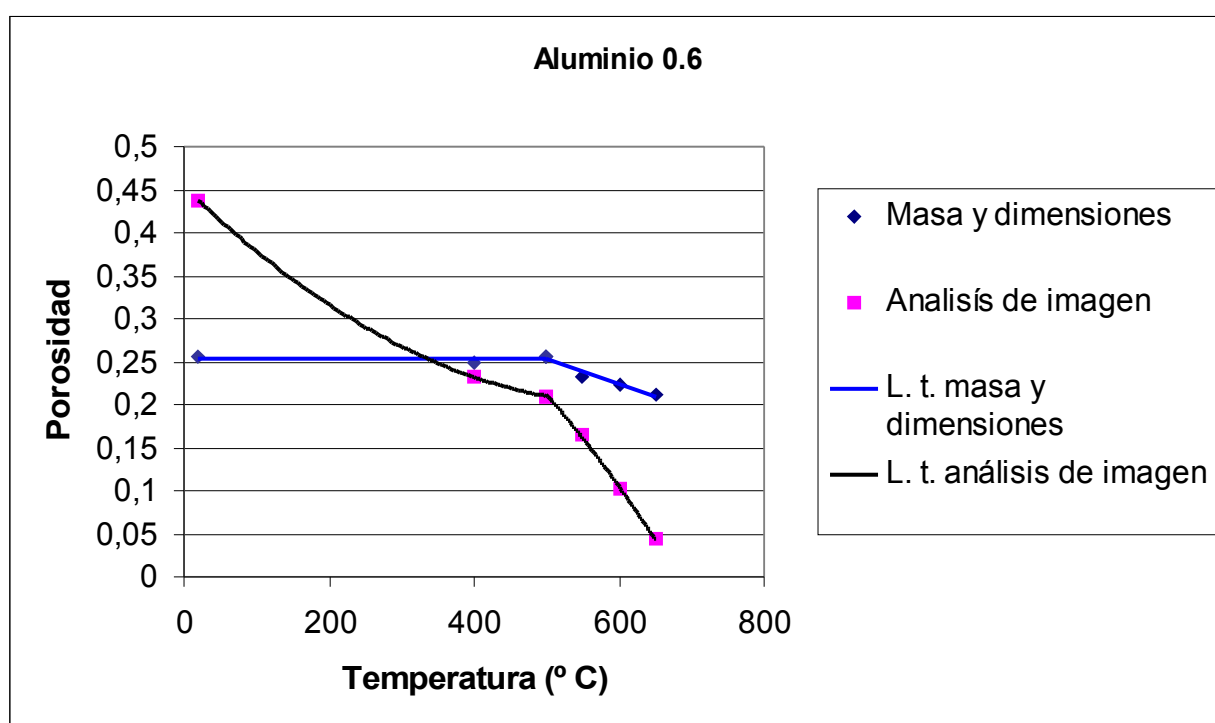


Figura 109: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del aluminio 0.6.

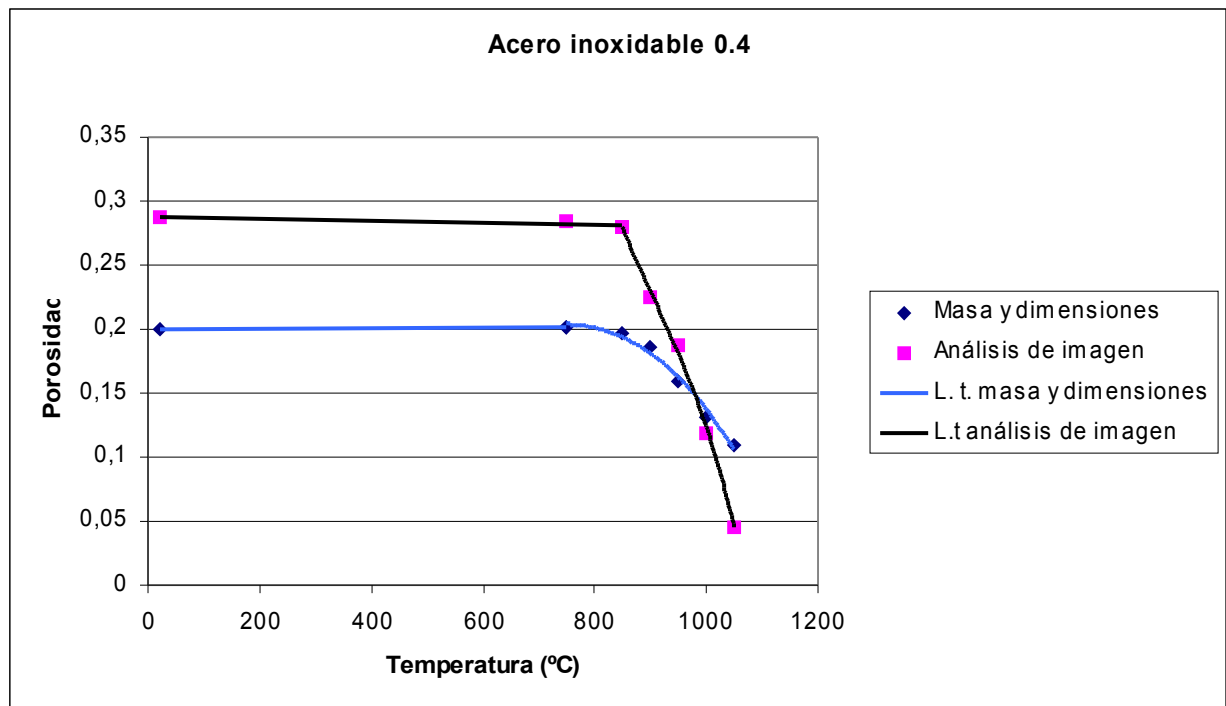


Figura 110: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del acero inoxidable 0.4.

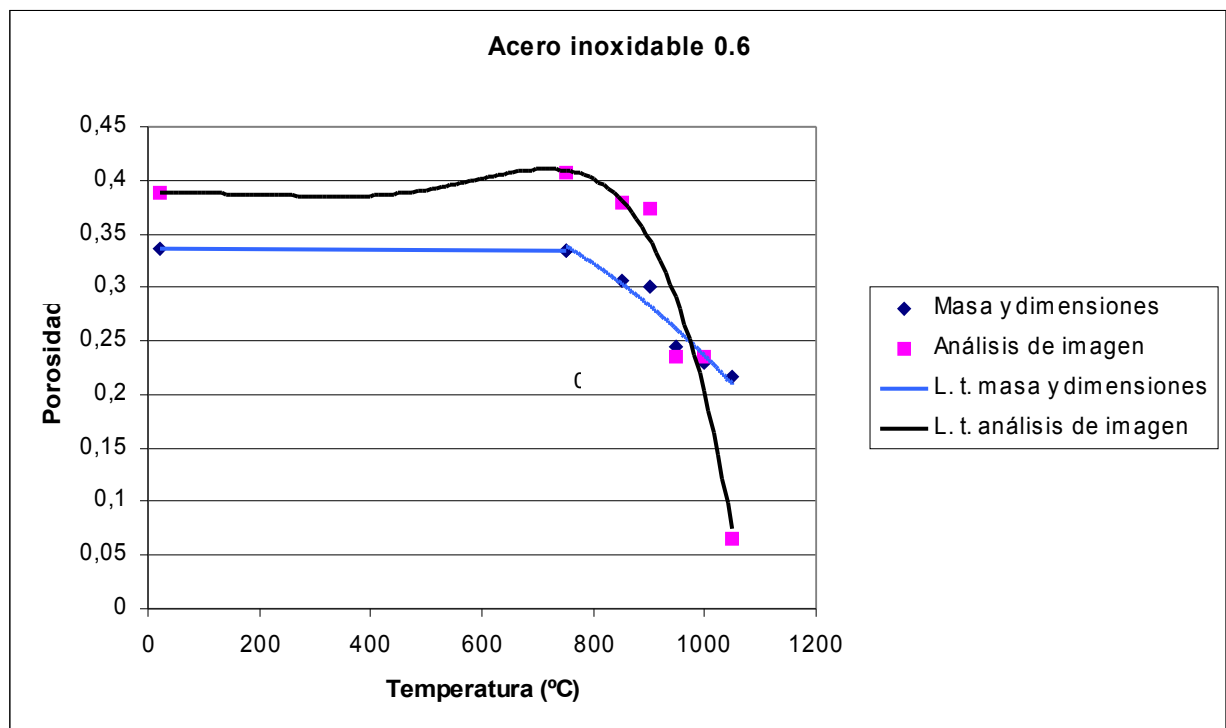


Figura 111: Comparación de la evolución de la porosidad en función de la temperatura de sinterización, medida mediante masa y dimensiones y análisis de imagen, en el caso del acero inoxidable 0.6.

La porosidad es bastante pareja, mediante los dos métodos, en las temperaturas de sinterización bajas, es decir cuando todavía el efecto de la misma es nulo o muy leve. Sin embargo, a partir de que el efecto comienza a ser notable las curvas se separan, existiendo un descenso mayor en el caso del análisis de imagen, que los resultados obtenidos mediante masa y dimensiones. Al realizar el análisis de imagen en la zona media de la probeta, tanto longitudinal como transversalmente, se deduce que el efecto producido por la sinterización es mucho más acusado en el centro de la probeta que en la periferia. Además, al observarse las probetas en el microscopio antes de realizar el análisis de imagen y buscando la zona donde se iba a realizar el análisis de imagen, se pudo apreciar que la porosidad era mayor cuanto más se alejaba del centro. Por tanto, las diferencias existentes entre ambos métodos de medida de porosidad se pueden achacar a una distribución no uniforme de la porosidad. Asimismo, la temperatura de sinterización a la que han sido sometidas las probetas no es lo suficientemente elevada como para crear una homogenización de las propiedades del material en toda su extensión, siendo más denso en su zona central que en la periférica.

Otro fenómeno importante que quedó pendiente del anterior apartado, es la hipótesis de que el descenso de la porosidad en el aluminio es menos acusado para el de mayor porosidad inicial, efecto que no se produce en el resto de los materiales y que incita a pensar que hay algún error al realizar estas medidas. Sin embargo, si analizamos el resultado del análisis de imagen, se observa que el comportamiento del aluminio está en concordancia con el previsto, aunque la diferencia entre ambas tendencias no es notablemente diferente. Por ello, parece una conclusión acertada el que el aluminio 0.6 todavía no ha alcanzado su máxima velocidad de disminución de la porosidad, es decir, la curva está por desarrollarse aún, no como en el aluminio 0.4 que ha conseguido alcanzar la máxima velocidad de compactación rápidamente.