

Influencia de la temperatura de sinterizado sobre el comportamiento mecánico de pistones de amortiguadores telescópicos.

D. Carranza^a, A. Rodríguez^a, S. Cabello^{*,b}

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela.

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Resumen.-

Se ha investigado la influencia de la temperatura de sinterizado sobre el comportamiento mecánico de pistones de amortiguadores telescópicos empleados en la industria automotriz. Para ello, se ensayaron pistones de 1 3/16" y 57 g de peso inicialmente en estado verde, los cuales fueron sometidos a tres niveles de temperaturas de sinterizado: 955 °C, 1021 °C y 1066°C. Adicionalmente, se incorporaron en el estudio pistones comerciales como base de comparación. El comportamiento mecánico fue evaluado mediante ensayos de compresión uniaxial, dureza y microdureza. Además, se hicieron observaciones de la estructura, empleando para ello técnicas de microscopía óptica y electrónica, así como detectores para el análisis elemental y de este modo establecer correlaciones con las propiedades mecánicas obtenidas. La mayor resistencia mecánica encontrada fue asociada con la mayor temperatura de sinterizado estudiada, vinculada con una menor cantidad poros, estos últimos, precursores de esfuerzos localizados.

Palabras clave: Pulvimetalurgia, Sinterizado, Compresión, Amortiguadores.

Mechanical behavior in telescopic damper piston at different levels of sintering temperature.

Abstract.-

A study concerning to mechanical behavior in telescopic damper piston at different levels of sintering temperature has been carried out. The investigation was conducted employing 1 3/16" green pistons with 57 g in average weigh, which were treated at three sintering temperature levels: 955 °C, 1021 °C and 1066 °C. Commercial pistons were used in order to make some comparisons. Mechanical behavior was evaluated using compression test, hardness test and microhardness test. Structure observations were made using optical and electronical microscopy technics and finally detectors to elemental analysis were used and a correlation with mechanical properties was established. It has been determined that high resistance was associated with pistons testing at a major sintering temperature, which is related with a major amount of porosities, which are promoters of localized stress.

Keywords: Powder metallurgy, Sintering, Compression, Dampers.

Recibido: Marzo 2013

Aceptado: Junio 2013

1. Introducción.

En las últimas tres décadas, se ha desarrollado una amplia variedad de componentes mecánicos,

especialmente para el uso en varias partes automotrices, mediante métodos de compactación de polvos que son formados a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas. La producción de componentes a partir de polvos por compactación y sinterizado en secuencia es conocida como metalurgia de polvos o pulvimetalurgia, la cual es considerada como una nueva generación de procesos de manufactura. Por lo general, los

*Autor para correspondencia

Correo-e: scabello@uc.edu.ve (S. Cabello)

productos obtenidos a partir de esta técnica han sido empleados en aplicaciones automotrices, aeroespaciales, entre otras. Esta técnica ha llegado a ser más importante en la medida en que proporciona mayores ventajas que las técnicas convencionales de fabricación como forja, mecanizado, etc, ya que permite la obtención de componentes mecánicos con alta precisión [4].

El estudio de los componentes de los automóviles es de gran importancia para garantizar la eficiencia en todas sus partes, así como para mantener los factores de seguridad adecuados que permitan salvaguardar la vida de las personas. Por ello, analizar muy detalladamente cada autoparte es uno de los desafíos automotrices más importantes, y en el caso específico de los amortiguadores, es de vital importancia los desarrollos de investigación que respalden su adecuado funcionamiento, puesto que son una de las piezas clave de los vehículos automotores. Una de las partes de los amortiguadores hidráulicos telescópicos son los pistones, componentes encargados de soportar las cargas más elevadas que se presentan. Por ello, es necesario estudiar su comportamiento mecánico, el cual está íntimamente relacionado con su proceso de fabricación: la pulvimetalurgia.

La pulvimetalurgia consiste en el compactado de una mezcla polvos (básicamente hierro, cobre y grafito), que posteriormente es sinterizada para obtener una pieza con muy buenas propiedades mecánicas. Cabe destacar que el sinterizado es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, con la finalidad de incrementar la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas [2], razón por la cual es un tratamiento de importancia para cualquier empresa que desea maximizar la calidad de sus productos.

Esta técnica innovadora trae consigo grandes beneficios, en cuanto a propiedades mecánicas, sin embargo, exige una serie de restricciones que dependen del propio proceso y afectan principalmente al diseño de la pieza [3], por lo que deben controlarse, de forma rigurosa, los parámetros del proceso de fabricación, entre ellos, la temperatura de sinterizado. Debido a las discrepancias de pro-

piedades mecánicas de los pistones sinterizados a diferentes temperaturas, se presume que éste sea un factor determinante en la vida útil del amortiguador, por lo que se plantea estudiar la influencia que tiene la temperatura de sinterizado sobre las variaciones de las propiedades mecánicas de dichas piezas, así como la correlación correspondiente con la microestructura observada. Lo anterior, no supone que otros parámetros como el tiempo de permanencia en el horno y la atmósfera de éste tengan menor incidencia; ni aquellas características relacionadas directamente con el polvo, tales como: el tamaño de las partículas, la distribución de tamaños, la forma, la compresibilidad, la pureza y la densidad aparente. Sin embargo, en este estudio sólo se considera la variación de la temperatura como una primera aproximación al proceso de fabricación de los pistones bajo estudio, dado que es el parámetro que en la práctica de campo fue susceptible a modificaciones.

2. Procedimiento experimental.

El estudio se llevó a cabo empleando pistones de amortiguadores telescópicos suministrados por Gabriel de Venezuela, C.A. Los pistones, de $1\frac{3}{16}$ " y 57 g fueron tratados térmicamente a 954,5 °C (1750 °F), 1021 °C (1870 °F), 1065,5 °C (1950 °F). Adicionalmente, se dispuso de pistones comerciales como referencia para posteriores comparaciones. Por tanto, se ensayaron cuatro condiciones diferentes. La proporción en peso de la mezcla de polvos utilizada fue la siguiente: 92,63 % de hierro, 5,97 % de cobre, 0,66 % de grafito y 0,74 % de Acrawax (estearamida comercial usada como lubricante). La presión de compactación fue de 400 MPa, con una densidad en estado verde de 6,86 g/cm³. Además, se dispuso de pistones comerciales como referencia para comparaciones posteriores. En consecuencia, se ensayaron cuatro condiciones diferentes.

Por cada condición de estudio se llevaron a cabo ensayos mecánicos (compresión uniaxial, ensayo de microdureza Vickers y ensayo de dureza Rockwell F), así como estudios de microscopía óptica, electrónica de barrido y por último, análisis

elemental.

2.1. Ensayo de compresión uniaxial.

Con este ensayo se determinó la resistencia mecánica de los pistones. En primer lugar, fue necesaria la fabricación de una matriz para la sujeción del pistón. En la Figura 1 se muestra el montaje experimental utilizado. La región del pistón con un menor diámetro se introdujo en el agujero del dispositivo de prueba, y la zona de mayor diámetro quedó apoyada sobre el soporte. En uno de los extremos del pistón (suspendido dentro de la matriz) se ensambló un vástago de rosca 7/16" de diámetro y por el otro extremo del pistón se introdujo un punzón (al cual se le aplicó la carga de compresión) que aplicó una fuerza directamente sobre el vástago antes roscado, permitiendo una fractura del pistón (a elevadas cargas) por tracción, a pesar de que la fuerza es aplicada a compresión. Es necesario resaltar que la carga se aplicó hasta lograr la fractura del pistón.

2.2. Ensayo de microdureza Vickers.

El ensayo consistió en generar sobre la superficie de las muestras una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada con determinado ángulo entre las caras opuestas (punta de diamante), y medir las diagonales de dicha huella después de retirar la carga. Para la realización de este ensayo, las cargas aplicadas fueron muy pequeñas, por el orden de los 10 N. Después se aplicó la carga por un tiempo establecido de 5 segundos en una zona del pistón seleccionada previamente. Luego de aplicar la carga, el equipo mostró el valor de la microdureza Vickers, así como de las diagonales en (μm). Se realizaron 5 penetraciones por cada condición para obtener un valor promedio, además de una desviación menos pronunciada.

2.3. Ensayo de dureza Rockwell.

Para la realización del ensayo, en primer lugar se procedió a establecer la escala de dureza adecuada para el material a evaluar (escala F, que es la utilizada para estudiar aceros blandos y aleaciones de cobre recocido). Para este ensayo se utilizó un penetrador de bola esférica de

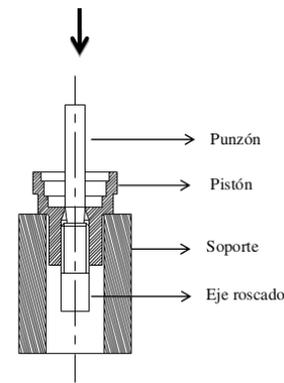


Figura 1: Montaje experimental para ensayos de compresión.

acero endurecido (templado y pulido) de 1/16", el cual fue presionado contra las probetas una vez que estuvieron preparadas. A continuación se le aplicó una precarga menor de 10 Kgf (98 N), básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado más preciso. Luego, se le aplicó durante unos 15 segundos una carga de 60 Kgf (588 N) a compresión. Los valores correspondientes a la dureza fueron calculados por el equipo automáticamente y presentados en un panel digital. Se realizó 15 mediciones de dureza por cada condición.

2.4. Microscopía electrónica de barrido.

Para este estudio se empleó un microscopio electrónico de barrido (M.E.B.). El estudio permitió la observación y caracterización superficial de los pistones (sinterizados a los niveles de temperatura establecidos), proporcionando información morfológica de las zonas microscópicas, como son: tamaño de partícula, porosidad de la muestra, composición química, entre otras.

En primer lugar las muestras se llevaron a dimensiones acordes con la cámara del MEB (de hasta un cubo de 1 cm de lado). Dichas muestras se prepararon metalográficamente hasta obtener un acabado tipo espejo. Luego, se procedió a introducir las muestras en un equipo metalizador, para generar una delgada capa de oro sobre la superficie pulida, con la finalidad de cubrir la muestra y hacerla conductora. Finalmente, las muestras fueron introducidas en el equipo para realizar las observaciones de microestructura, así como un estudio EDX o análisis elemental.

2.5. Microscopía óptica.

Una vez realizada la preparación metalográfica de las muestras mediante las fases de corte, desbaste y pulido, se procedió al ataque. Para el ataque se utilizó como reactivo Nital al 2 % por un tiempo aproximado de 5 segundos. Se obtuvieron imágenes de la microestructura de cada una de las condiciones evaluadas a diferentes aumentos.

Tabla 1: Valores de microdureza Vickers para las diferentes condiciones evaluadas.

Muestras	I1	I2	I3	I4	I5	
T1	M1	60,6	65,3	59,8	63,1	71
	M2	57,9	42,6	50,7	45,2	44,6
	M3	59,1	50,3	47,6	68,8	52,4
T2	M1	55,4	61,8	73,6	65,2	75,4
	M2	64,8	64,7	63,6	60,1	65,5
	M3	74	60,6	62,1	63,1	73,5
T3	M1	103,4	93,8	90,4	87,3	80,5
	M2	80,8	75,7	82,2	75,5	85,4
	M3	82,9	82,2	98	97,8	103,4
Pistón comercial	M1	131,5	125,1	133,6	138,4	127,1
	M2	139,8	147,6	154,9	140,7	136,2
	M3	124,5	114,7	123,8	110,3	130,8

I1, I2, I3, I4 e I5 corresponden a las diferentes indentaciones realizadas en cada condición.

T1, T2 y T3: Las temperaturas de sinterizado evaluadas, 954°C, 1021 °C y 1066 °C respectivamente.

M1, M2 y M3: las muestras utilizadas para evaluar la microdureza en cada condición.

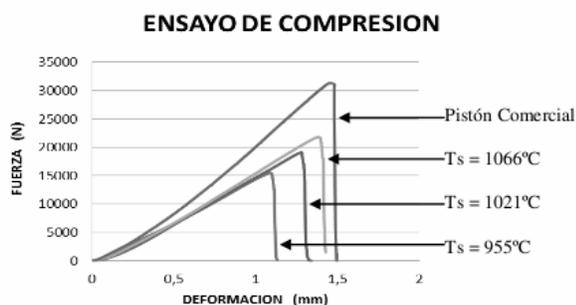


Figura 2: Ensayos de compresión a las diferentes condiciones evaluadas.

3. Resultados y discusión.

La Figura 2 muestra los resultados del ensayo de compresión uniaxial realizado a cada una de las condiciones evaluadas. Se observa en todas las condiciones un comportamiento muy frágil. La mayoría de los materiales sinterizados

tienen la particularidad de fracturarse con escasa deformación [1, 5].

A diferencia de los materiales más convencionales, el comportamiento mecánico de estos agregados de partículas todavía no es bien conocido. No existe una teoría ampliamente aceptada que explique el comportamiento mecánico de las partículas durante la compactación; no hay acuerdo en el modelo plástico, mientras que el comportamiento elástico, prácticamente, ha sido ignorado. Durante el ensayo de compresión uniaxial aplicado a los pistones estudiados a las diferentes condiciones, se observaron tres etapas en las que predominaron mecanismos de deformación distintos. Al inicio del ensayo, para cargas bajas, hay una pequeña deformación permanente que se atribuye a fenómenos de fricción interna (la fricción que ocurre entre las partículas del polvo que conforman la mezcla) [3]. A esta pequeña deformación plástica inicial le sucede una fase dominada por la deformación elástica y que se extiende hasta un valor de esfuerzo máximo en que el compacto metálico falla súbitamente tras cierta deformación plástica adicional (justo antes de la fractura). Dichas muestras tuvieron diferentes cargas de ruptura, las cuales iban en aumento en la medida en que la temperatura del sinterizado era mayor. Asimismo, puede señalarse que el límite elástico aumentó de manera sostenida con la temperatura de sinterizado, y en el caso de las muestras comerciales se presume influyeron notablemente las técnicas pulvimetalúrgicas utilizadas, cuyos parámetros se desconocen.

Los resultados obtenidos en los ensayos de microdureza Vickers se listan en la Tabla 1.

En la Figura 3 se muestran los histogramas de frecuencias para las diferentes condiciones de sinterizado. Se observa alta variabilidad de la microdureza, especialmente para la condición de sinterizado a 1021 °C, lo que sugiere la necesidad de incrementar el número de mediciones de dureza.

En la Tabla 2 se muestran los valores de dureza Rockwell F para las diferentes condiciones evaluadas.

En la Figura 4 se muestran los histogramas

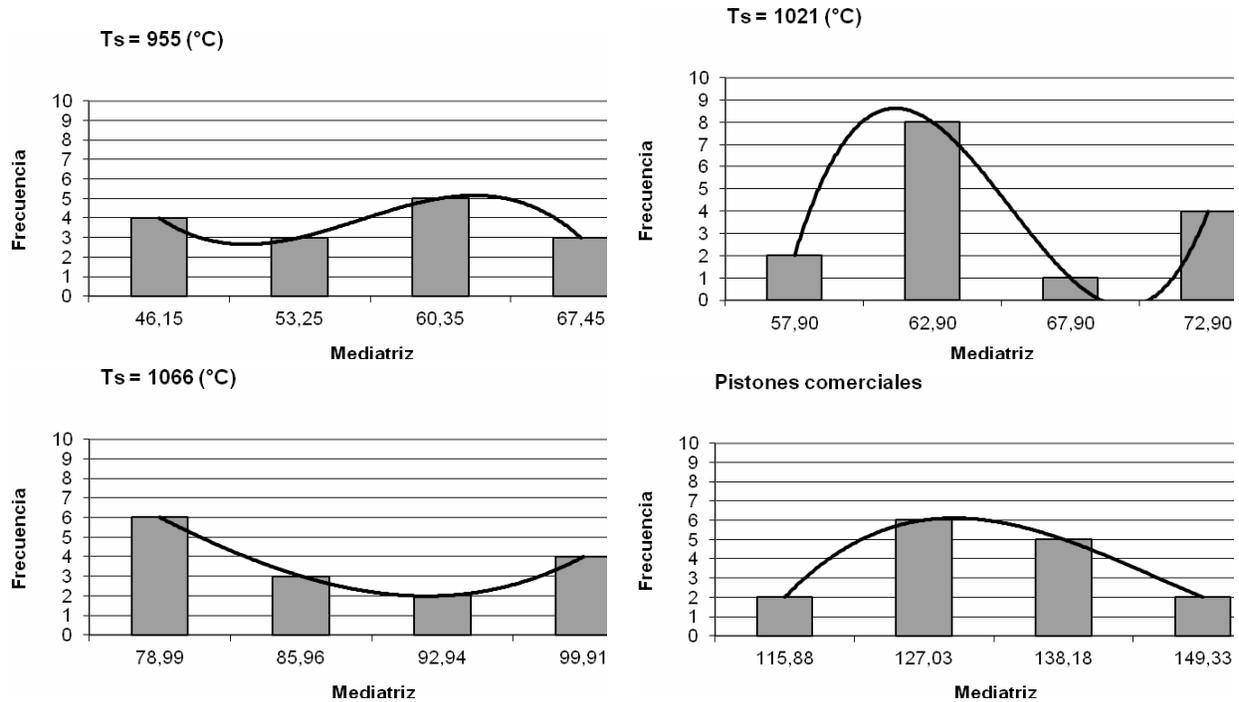


Figura 3: Histogramas de frecuencias de los valores de microdureza Vickers para las diferentes condiciones de estudio.

de frecuencias para las diferentes condiciones de sinterizado.

Los resultados de la microscopía óptica se muestran en la Figura 5. Se observa que mientras más alta es la temperatura de sinterizado, mayor es la unión entre las partículas que conforman el compuesto; es decir que al disminuir el tamaño de las porosidades, impurezas y otros defectos superficiales, aumenta la fracción de volumen en contacto con partículas adyacentes, lo que le confiere a las piezas una mayor resistencia mecánica [6].

La Figura 6 muestra la microestructura observada a partir de técnicas de microscopía electrónica de barrido. El estudio permitió visualizar diferencias notables entre las muestras en estudio (analizadas a los tres niveles de temperatura) y la muestra comercial. Específicamente, a mayor temperatura de tratamiento, se observa menor densidad de poros.

De la Figura 6 se evidencia que a medida que la temperatura de sinterizado aumenta, los bordes de las partículas son más difusos, como consecuencia de la disminución de las porosidades. Las muestras comerciales mostraron una estructura más uniforme que las provenientes de

la experimentación. Por tanto, se asume que la temperatura de sinterizado influye con las técnicas utilizadas en los procesos de compactación y de sinterización, los cuales claramente son más eficientes en las muestras comerciales que las obtenidas por experimentación, ya que éstas mostraron una microestructura más heterogénea.

Los elementos encontrados en las diferentes zonas observadas en cada una de las muestras en su mayoría correspondían con los componentes de la mezcla (Hierro, Cobre y Acrawax), pero se evidenciaron también otros elementos no deseados (como Aluminio, Silicio, entre otros), razón por la cual se pudo apreciar una discrepancia de color con respecto a la mezcla base de polvos que conforma al pistón (de color más claro). Sin embargo, existen pocos casos en donde las zonas oscuras presentaron la misma composición química del material base, por lo que se presume que en estas situaciones particulares la variación de la temperatura jugó un papel importante en los cambios presentes en la mezcla base de polvos, pudiendo reaccionar los elementos nombrados a medida que aumentaba o disminuía la temperatura. Cabe destacar que el microscopio electrónico de barrido utilizado para la realización de este

Tabla 2: Valores de dureza Rockwell F para las diferentes condiciones evaluadas.

	T1			T2			T3			Pistón Comercial		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
I1	26,60	30,20	27,10	34,80	36,50	31,90	39,00	41,30	42,60	69,40	70,30	74,80
I2	30,20	34,00	28,20	35,90	37,70	30,90	40,60	38,50	39,20	69,50	69,50	76,70
I3	32,80	31,60	33,10	39,00	44,00	40,50	34,10	41,50	47,20	71,30	71,20	74,40
I4	28,90	32,90	31,60	36,70	35,40	39,20	34,50	42,20	42,40	71,80	75,20	74,20
I5	31,20	30,30	32,20	38,30	43,60	38,30	35,40	39,40	45,20	77,90	77,80	76,40
I6	27,80	31,30	34,30	37,10	39,30	36,90	36,60	39,60	39,70	79,20	76,80	73,60
I7	30,70	32,40	32,80	33,30	36,00	31,00	38,50	37,50	42,10	77,20	78,20	75,60
I8	30,30	29,70	28,60	32,30	36,90	33,50	38,00	37,70	45,70	77,70	78,30	80,50
I9	27,30	27,60	30,90	32,60	43,90	31,80	37,10	36,30	40,70	73,80	72,90	75,30
I10	27,60	29,70	26,30	31,80	34,50	32,50	38,10	33,90	41,80	69,80	73,40	76,60
I11	32,30	28,40	33,50	36,90	35,30	36,00	35,10	41,70	40,40	72,80	69,80	77,80
I12	28,60	33,90	32,70	31,70	36,30	35,60	37,40	36,40	44,20	75,00	74,80	71,30
I13	27,40	31,20	30,90	41,50	38,60	41,50	37,10	33,80	40,70	75,70	75,00	70,00
I14	28,30	30,80	27,30	36,20	40,00	44,30	38,00	39,50	39,80	75,10	73,70	73,60
I15	29,60	31,60	29,80	32,70	41,10	33,20	38,70	39,00	41,70	76,40	76,60	78,70

I1, I2, I3, I4 e I5 corresponden a las diferentes identaciones realizadas en cada condición.
 T1, T2 y T3: Las temperaturas de sinterizado evaluadas, 954°C, 1021 °C y 1066 °C respectivamente.
 M1, M2 y M3: las muestras utilizadas para evaluar la microdureza en cada condición.

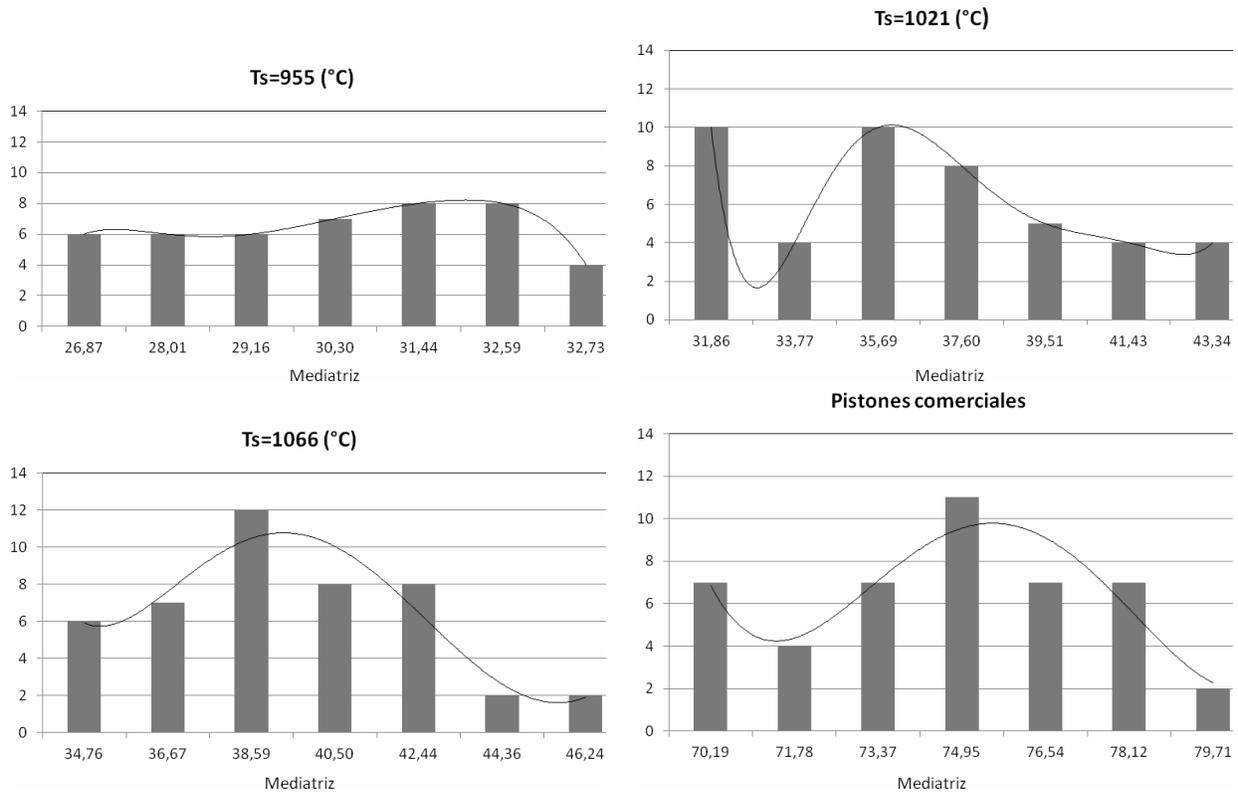
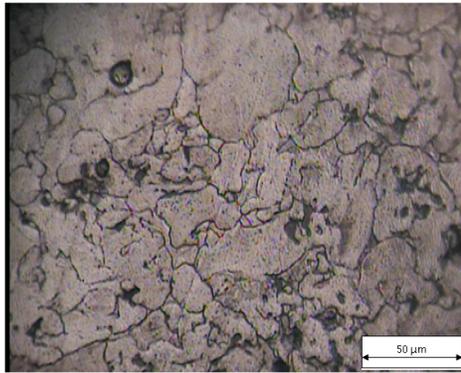


Figura 4: Histogramas de frecuencias de la dureza Rockwell F para las distintas condiciones evaluadas.

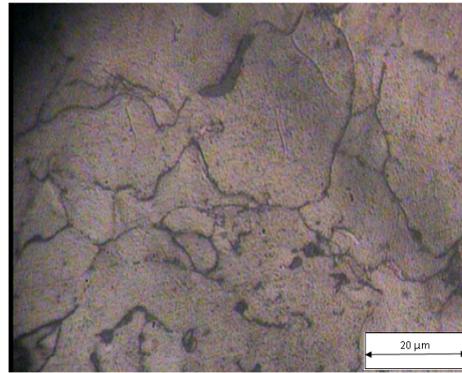
estudio, solo detectaba materiales metálicos, y por consiguiente no se pudieron observar las pequeñas cantidades de grafito que son incluidas en la mezcla base de polvos.

tanio, que se presume fue adicionado a la mezcla de polvos como un componente clave para la mejora del comportamiento mecánico de los pistones al reaccionar con los diferentes valores de temperaturas, ya que dichas muestras tenían una

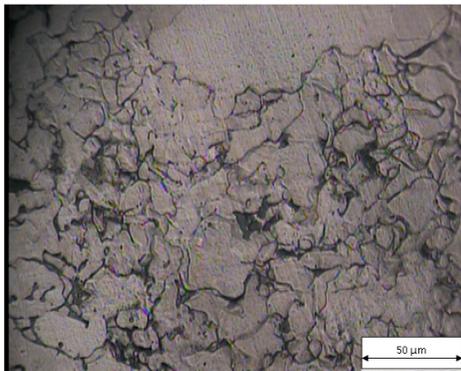
En las muestras comerciales se determinó Ti-



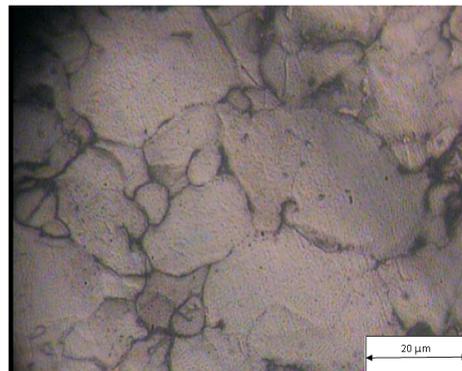
$T_s = 955^\circ$ y aumento 400x



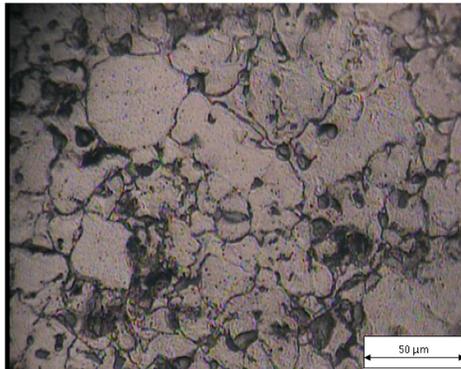
$T_s = 955^\circ$ y aumento 1000x



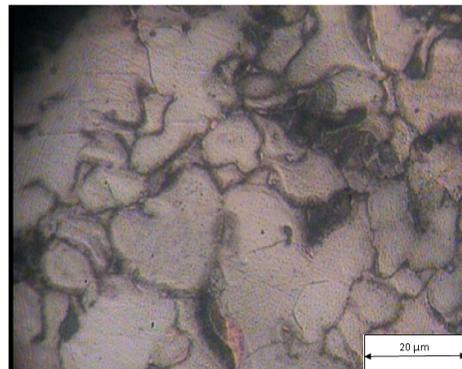
$T_s = 1021^\circ$ y aumento 400x



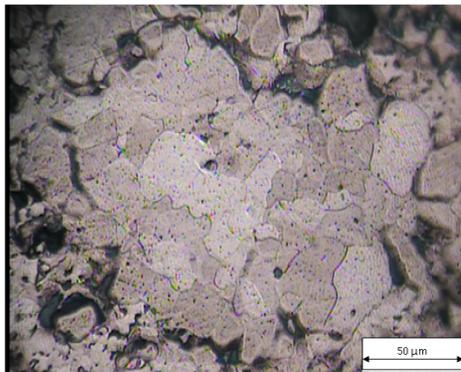
$T_s = 1021^\circ$ y aumento 1000x



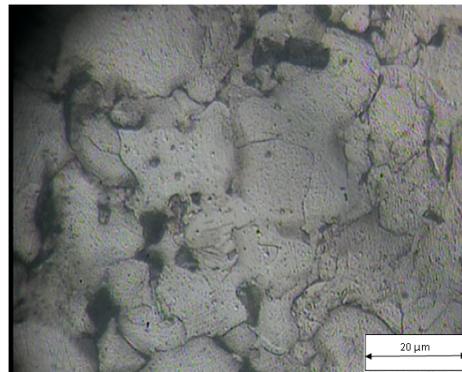
$T_s = 1066^\circ$ y aumento 400x



$T_s = 1066^\circ$ y aumento 1000x



Muestra comercial y aumento 400x



Muestra comercial y aumento 1000x

Figura 5: Microscopía óptica a las distintas condiciones evaluadas y empleando aumentos de 400x y 1000x .

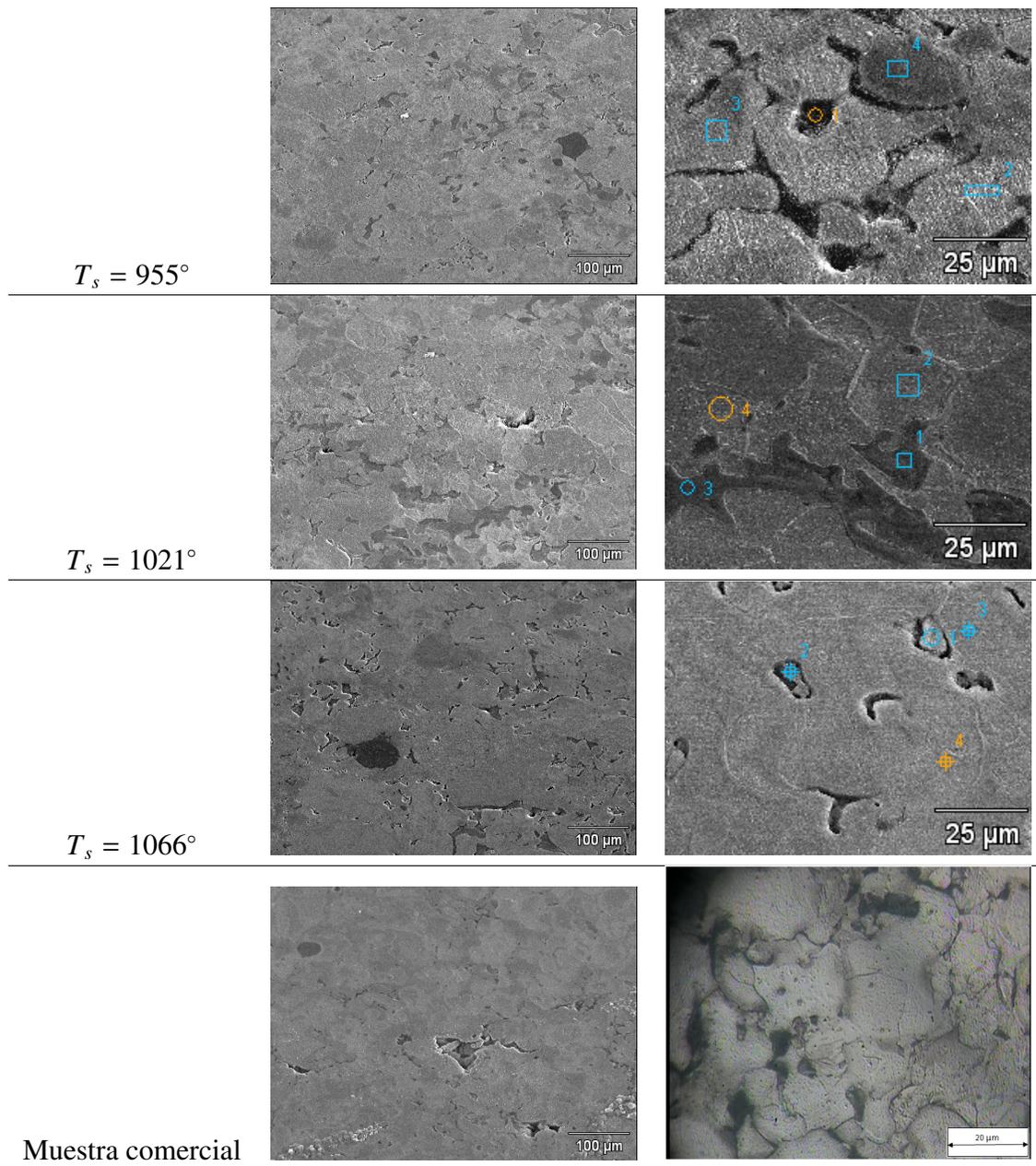


Figura 6: Microscopía electrónica de barrido a las distintas condiciones evaluadas.

tendencia claramente definida en los porcentajes de titanio encontrados, a diferencia de una de las muestras sinterizadas a 955 °C, en donde se encontró una pequeña cantidad de éste elemento que se considera un contaminante, puesto que de todas las muestras de experimentación estudiadas, fue la única donde se observó esta particularidad.

Finalmente, quedó registrado mejoras significativas de las microestructuras analizadas, en la medida en que se utilizaron niveles de temperatura de sinterizado más altos.

4. Conclusiones.

La presencia y distribución de poros determina la sección efectiva del material que soporta carga, además los poros actúan como microentallas internas alrededor de los cuellos de sinterización, lo cual induce concentración de esfuerzos localizados. En consecuencia, la existencia de poros disminuye la resistencia mecánica del material, ya que el área resistente será menor. En este contexto, de cara a mejorar la resistencia mecánica del material, es deseable tener una menor cantidad de

poros, de menor tamaño, con mayor espaciado entre sí, y con geometría más redondeada.

El estudio de las propiedades mecánicas realizado por medio de la microindentación de las diferentes muestras estudiadas (ensayo de microdureza a cada condición) permitió identificar diferencias significativas entre éstas. Los resultados obtenidos indicaron que en la medida en que se aumentaba la temperatura de sinterizado mayor era la resistencia mecánica del pistón. La misma tendencia se observó (pero más claramente) en el ensayo de dureza, permitiendo inferir que el aumento de la dureza de las muestras es proporcional al aumento de la temperatura, es decir, que piezas sinterizadas a los mayores niveles de temperatura ofrecen mejor resistencia a la penetración.

Aún cuando el incremento de la temperatura favorece el incremento de las propiedades mecánicas, este efecto no es ilimitado. En el intervalo de temperaturas evaluado, no se determinó la temperatura de saturación o reversión del efecto. No obstante, dadas las diferencias significativas entre el pistón comercial y el de mejores propiedades mecánicas obtenidas por experimentación, se presume que otras variables como el tiempo de permanencia en el horno, su atmósfera, así como la proporción de la mezcla empleada en la compactación, entre otros (el tamaño de las partículas, la distribución de tamaños, la forma, la compresibilidad, la pureza y la densidad aparente: parámetros desconocidos para el caso del pistón comercial y no evaluados en las muestras experimentales) pudieran explicar tal diferencia.

5. Agradecimientos.

Al Consejo de Desarrollo y Humanístico de la Universidad de Carabobo por el financiamiento del proyecto de ayuda menor según N° CDCH-AM-0435-10. Asimismo, a Gabriel de Venezuela por las muestras suministradas para el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] Bocanegra, M. H. (2001). Sinterización de polvos de óxido de magnesio precipitado de agua de mar: Efectos del estado de aglomeración sobre la microestructura. *Jornadas SAM – CONAMET*, 867 – 874.
- [2] Fuentes, J. J.; Rodríguez, J. A. y Herrera, E. J. (2005). Comportamiento mecánico de materiales de aluminio AM sinterizados. *Anales de mecánica de la fractura*, Vol. 22, 283 – 287.
- [3] M. D. Riera y J. M. Prado. (2006). Modelización y simulación de la etapa de compactación en PM. *Revista de Metalurgia* 42 (6), 456-462.
- [4] Md. Mujibur Rahman, Sany Shahrman Md Nor, Hendri Yani Rahman (2011). On the Effect of Carbon Content to the Mechanical Properties and Microstructure of Green Compacts Formed at above Ambient Temperature. *Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011*, 570-575.
- [5] Qin, X. P. y Hua, L. (2007). Deformación y fortalecimiento de un material ferroso sinterizado. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, 694 – 697.
- [6] Youseffi M., Wright C. y Jeyacheya F. (2000). Effect of carbon content, sintering temperature, density and cooling rate upon properties of prealloyed Fe-1.5Mo powder. *Powder Metallurgy*, Vol. 43, 270-274.