Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo: INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE ACEROS SINTERIZADOS: ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

Entidad colaboradora : PMG Asturias

Tutor industrial o externo: María Fernández Vega

Tutor académico: María Cristina Rodríguez González

Departamento: Departamento de construcción e ingeniería de fabricación

Javier Fernández Castañón

Universidad de Oviedo

Julio 2014

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo: ***INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE ACEROS SINTERIZADOS: ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL***

Firma	*Firma*	*Firma*
María Fdez Vega	*Mª Cristina Rodríguez González*	*Javier Fdez Castañón*

Universidad de Oviedo

Julio 2014

ÍNDICE

1. Introducción 3
2. Antecedentes 5
2.1. Cubos sincronizadores 5
2.2. Descripción del proceso de fabricación 8
2.2.1. Materia prima 9
2.2.2. Prensado 11
2.2.3. Sinterizado 14
3. Materiales utilizados y procedimiento experimental 18
3.1. Materiales utilizados 18
3.2. Procedimiento experimental 21
3.2.1. Ensayo de tracción 21
3.2.2. Análisis de porosidad 25
3.2.2.1. Preparación de las muestras y equipo utilizado 27
3.2.3. Análisis de las imágenes 30
4. Resultados y discusión 33
4.1. Análisis de porosidad 33
4.2. Ensayo de tracción 36
4.3. Discusión de resultados 43
5. Aplicación en la determinación de las propiedades mecánicas de los cubos sincronizadores 48
5.1. Determinaciín de porosidad 48
5.2. Obtención de las caracteristicas mecánicas 49
6. Conclusiones 52
7. Presupuesto 54
8. Bibliografía 57

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

Se entiende por pulvimetalurgia (PM) al proceso por el cual se obtienen piezas de elevada resistencia y dureza calentando sin llegar a la temperatura de fusión, conglomerados de polvo, generalmente metálicos, que previamente se han modelado por presión

La pulvimetalurgia se basa en la consolidación de polvos metálicos, cerámicos o poliméricos, en componentes de forma y propiedades prefijadas mediante la aplicación de presión y calor a temperaturas por debajo del punto de fusión del constituyente mayoritario.

La versatilidad de la pulvimetalurgia se presta a una amplia variedad de aplicaciones para muchas industrias. Esta versatilidad hace referencia a la capacidad de seleccionar entre una gran variedad de polvos aleados previamente.

Esta tecnologíade fabricación puede ser una solución eficaz en función a los volúmenes que se van a producir, ya que el coste de herramientas de moldeado utilizando otro tipo de procesos de fabricación son muy elevados. Los clientes que necesitan mayores volúmenes de piezas anuales entienden rápidamente los ahorros sustanciales eligiendo la pulvimetalurgia.

En los últimos años, la industria pulvimetalúrgica de materiales ferrosos se ha fortalecido gracias a la introducción de elementos de aleación que confieren a los aceros elevadas templabilidades. En este sentido el Ni, el Mo y el Cu han sido los elementos más utilizados, y su respuesta frente al enfriamiento controlado o los tratamientos térmicos posteriores al ciclo de sinterización ha sido muy positiva, confiriendo a las piezas elevadas propiedades mecánicas.

Sin embargo, son el Cr y el Mn en los materiales en los que se encuentra el mejor balance entre templabilidad y economía. Estos elementos ampliamente utilizados en la metalurgia convencional presentan dificultades para el procesamiento en los sistemas convencionales de sinterización debido a su alta afinidad con el oxígeno.

Hoy en día, son numerosos los estudios realizados para encontrar nuevos polvos, con nuevos aleantes, con el fin de mejorar las prestaciones al precio más reducido posible. El principal problema a la hora de determinar la calidad de estos nuevos productos es que la caracterización de las propiedades mecánicas siempre se hace sobre el material, y no directamente sobre el producto, al tratarse generalmente de piezas de pequeñas dimensiones.

ANTECEDENTES

2. Antecedentes

En este apartado se dará una visión general tanto de los cubos sincronizadores como del proceso pulvimetalúrgico que se utiliza para fabricarlos.

2.1. Cubos sincronizadores

El cubo sincronizador es un componente de la caja de cambios de los automóviles la finalidad que se busca en el desarrollo de esta parte del automóvil, es mejorar la eficiencia del combustible, conseguir un cambio de marcha más suave, así como conseguir un diseño más compacto. En este apartado se pretende presentar el cubo sincronizador, especificando sus partes principales, así como su funcionamiento dentro de la caja de cambios para conocer los esfuerzos a los que está sometido.

En la figura 2.1 se muestra esquemáticamente la sección transversal de un cubo sincronizador. En ella se indican las zonas principales de la pieza, que son: diente, cubo y radio. Estas son las partes funcionales de la pieza.

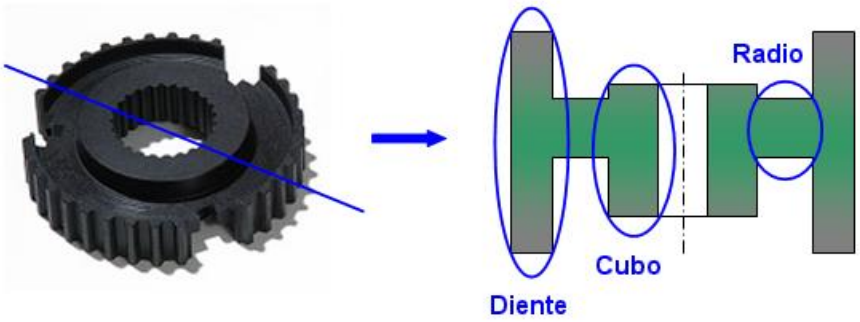


Figura 2.1 Esquema de la sección transversal de un cubo sincronizador

Para entender por qué estas son las partes funcionales de los cubos sincronizadores, es necesario ver su funcionamiento dentro de la caja de cambios.

Los cubos sincronizadores utilizados para este proyecto son piezas que van montadas en cajas de cambios de tipo manual, por tanto, la explicación se centrará en este tipo de cambios.

De forma muy simple, se puede definir la caja de cambios como la parte del coche que recoge una potencia a una velocidad de giro determinada y la transmite a las ruedas, modificando la velocidad de giro del eje.

En un principio, para conseguir el propósito de seleccionar la relación adecuada de desmultiplicación en la caja, se usaron los engranajes de dentado recto, inicialmente no enfrentados, que, cuando se accionaba el mecanismo de selección de la velocidad, se acercaban hasta hacer contacto y transmitir potencia. Pero la velocidad del motor, incluso desembragado, al acoplar dos piñones que giran a distinta velocidad, planteaba problemas técnicos muy delicados (desgaste y despunte de dientes, golpes en los ejes de transmisión,…), y requería una gran destreza por parte del conductor. La figura 2.2 muestra, de forma esquemática, el sistema de tres ejes de una caja de cambios de engranajes rectos como la que se ha descrito antes, con cuatro velocidades, y marcha atrás.

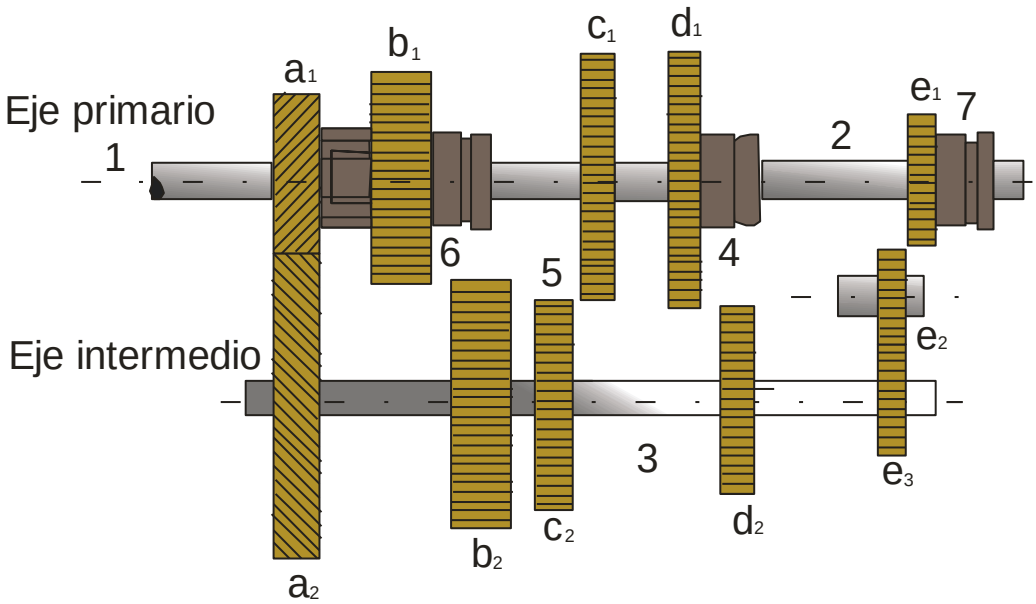


Figura 2.2 Caja de cambios de 3 ejes, 4 velocidades y marcha atrás.

Para hacer frente a este problema, la solución históricamente adoptada es la llamada “toma constante”, en la que los engranajes están permanentemente enfrentados, pero sin transmitir par entre ejes, puesto que no están solidariamente unidos a uno de los ejes (el secundario), sino que giran locos respecto a él por medio de un rodamiento.

El mecanismo de selección de la velocidad ahora no debe engranar dos piñones, sino que lo que hace es que el piñón situado en el eje secundario se solidarice con el eje.

Esto se consigue por medio de unos dentados de arrastre que se introducen en el interior de las coronas de los piñones y que se desplazan longitudinalmente sobre el eje por medio de unas nervaduras o acanaladuras. La figura 2.3 ilustra esto de forma sencilla. A la izquierda el selector de velocidad se encuentra desplazado hacia la izquierda, y eso hace que el elemento sincronizador actúe sobre el par de engranajes de la derecha, acoplando la corona del piñón con el eje estriado mediante el conjunto sincronizador que se describirá másadelante. En la parte derecha ocurre el fenómeno opuesto.

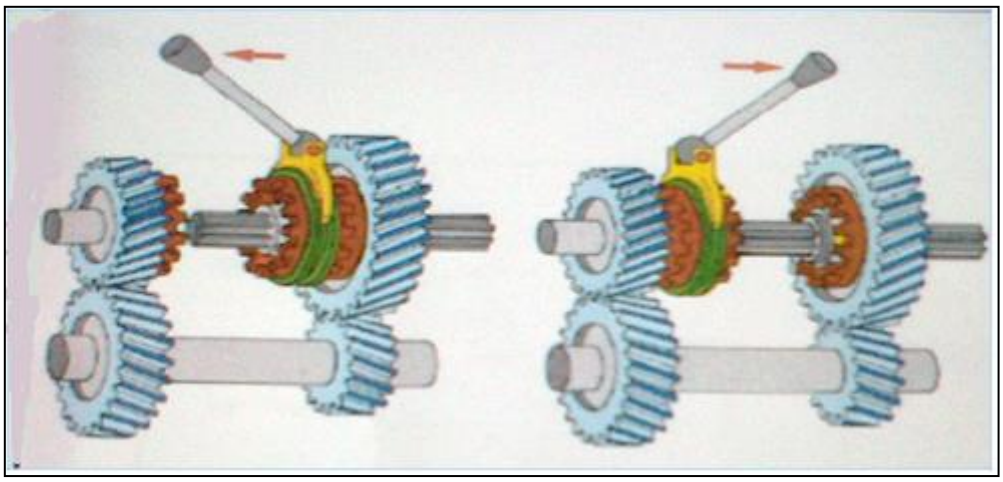


Figura 2.3 Esquema de la acción del conjunto sincronizador

En la figura 2.4 se esquematiza cada uno de los conjuntos sincronizadores que se han mencionado anteriormente:

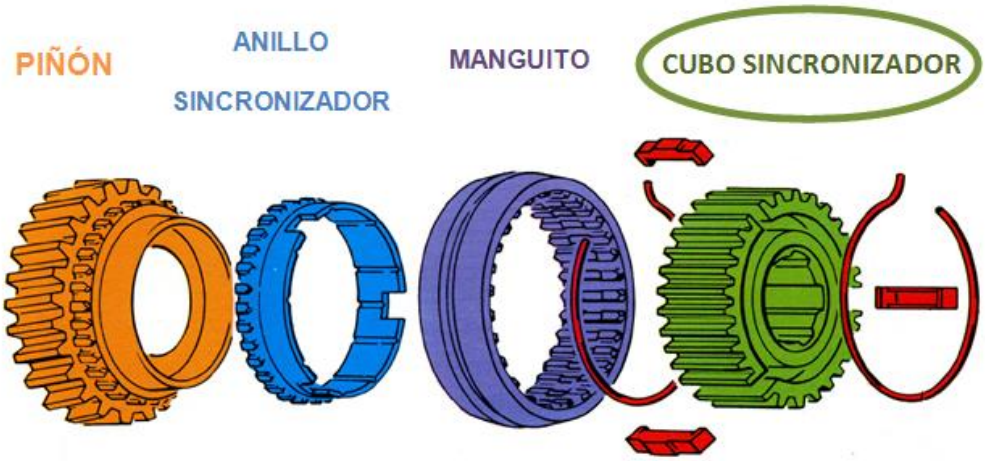


Figura 2.4 Esquema de un conjunto sincronizador

El piñón: montado libre en el árbol, lleva un cono macho de fricción y un dentado de acoplamiento.

El anillo sincronizador: es el cono hembra de fricción y el elemento que impone la interacción durante la sincronización. Consta de 3 muescas espaciadas 120º para alojar las 3 chavetas.

El manguito es el elemento de acoplamiento que hace solidario el piñón libre con el árbol por medio del cubo sincronizador.

El cubo sincronizador va completamente fijo al árbol, y permite que el manguito se deslice a la vez que acondiciona la retención de los 3 fiadores espaciados 120 º y sus 2 muelles. Es la pieza que permite realizar el cambio de velocidad, sincronizando las dos velocidades existentes en el proceso de cambio de marchas, para que otras partes móviles de la caja puedan seleccionar los engranajes adecuados en cada marcha.

Los tres fiadores y las dos anillas: este conjunto permite que el anillo de sincronización se mueva suavemente cuando el manguito entra en acción.

2.2. Descripción del proceso de fabricación

El proceso pulvimetalúrgico es el habitualmente empleado en la fabricación de los cubos y hace posible utilizar materias primas y energía de forma especialmente eficiente. Además, permite fabricar piezas con geometrías complejas y en grandes series. Es por esto, que la pulvimetalurgia se adapta perfectamente a las necesidades de esta pieza, tanto desde el punto de vista de la calidad del producto fabricado, como a factores logísticos.

Como en cualquier proceso de fabricación, en pulvimetalurgia cada paso del proceso (que se esquematiza en la figura 2.5) influye en las propiedades mecánicas finales de las piezas. Por ello, a continuación se describe cada uno de los pasos, así como su influencia en las propiedades mecánicas del producto final.

La pulvimetalurgia se compone, principalmente, de dos procesos. Un primer proceso físico, que partiendo de los metales en polvo (partículas con tamaños ≤ 200 µm), se conforman obteniéndose un compacto con la suficiente resistencia y cohesión como para poder ser manipulado y transferido a la siguiente etapa de forma segura. Es durante el segundo proceso, de carácter químico y denominado sinterización, donde los anteriores contactos físicos entre las partículas se transforman en enlaces químicos, perdiendo las partículas su individualidad y pasando a formar un

continuo, con una cierta porosidad pero con suficiente resistencia como para ser utilizados en la aplicación para la que han sido destinados.

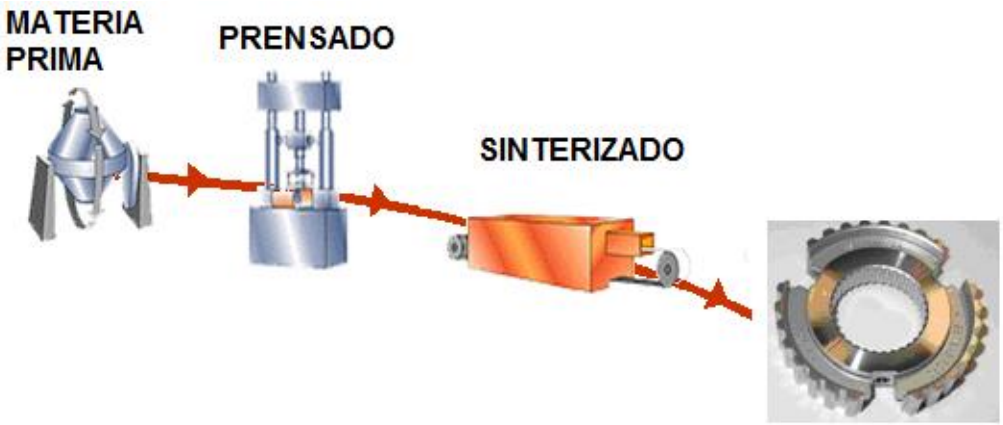


Figura 2.5 Esquema del proceso de sinterizado

2.2.1. Materia prima

La materia prima para la fabricación de las piezas es una mezcla de polvos de hierro de baja aleación, cuya caracterización exacta se realiza en la planta proveedora, la cual certifica los productos que vende.

Existen 3 tipos de procesos para la fabricación de polvos de hierro:

Mezclado: al polvo base se le añaden los elementos de aleación sin que exista ningún método de unión física o química entre ellos y el polvo base. Lo que significa que la aleación, propiamente dicha, se consigue durante el sinterizado. Este método permite un ajuste exacto y flexible de la composición del polvo final, pero suele presentar problemas de segregación.

Predifusión: Mediante un tratamiento térmico en atmósfera reductora, los elementos de aleación se fijan al grano base de hierro. Para que esto sea posible, la granulometría de los elementos de aleación debe ser mucho menor que la del polvo base y tener controladas las condiciones en el tratamiento térmico.

Prealeación: en este caso, los aleantes se añaden al polvo base en el estado previo a la atomización, por lo cual, la mezcla constituye un verdadero acero aleado. Posteriormente a estos materiales se le aplica un atomizado por agua o por aire.

Este último método de aleación consigue productos finales más resistentes y menos dúctiles que los obtenidos con las materias primas predifundidas, pero su comportamiento a fatiga es mucho mejor.

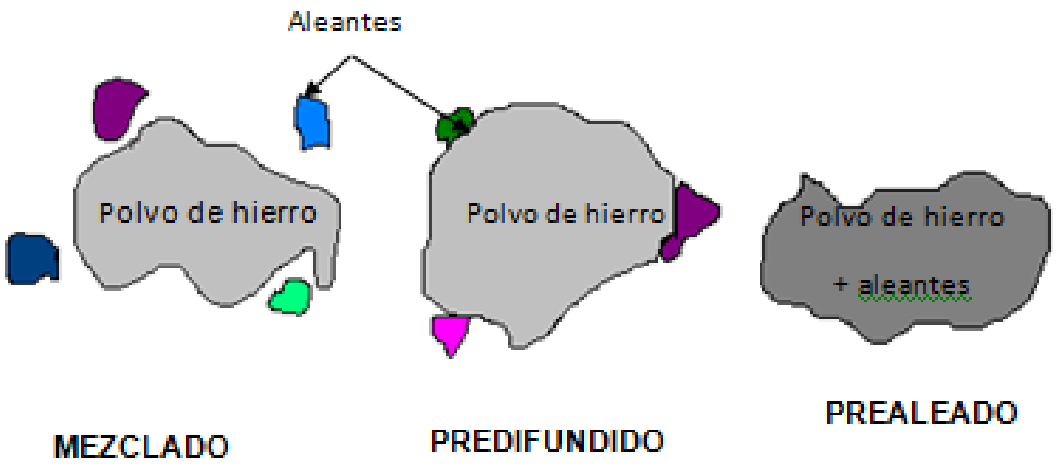


Figura 2.6 Diferentes procesos de fabricación de polvos

Una vez definido el polvo base, hay que añadirle la cantidad de carbono idónea (en forma de grafito) para conseguir las mejores propiedades mecánicas tras el sinterizado así como una cierta cantidad de lubricante (en este caso concreto serán ceras) para hacer que el polvo sea prensable sin dañar los utillajes. Dado que las ceras se quemarán posteriormente en la primera fase del proceso de sinterizado, su tamaño afectará a la densidad del producto final. Además se añadirán los aditivos necesarios para facilitar cualquier otro tipo de operaciones (por ejemplo, se suele añadir sulfuro de manganeso para facilitar el mecanizado).

En metalurgia de polvos existen dos posibles vías que conducen a la mejora del nivel de las propiedades mecánicas y tribológicas de un material:

1) actuar sobre la densidad

2) modificar el sistema de aleación, introduciendo nuevos elementos que propicien mejoras.

Debido a la gran cantidad de aleantes que actualmente se encuentran en el mercado, nos centraremos en los más utilizados en esta aplicación.

El ***Níquel*** uno de los elementos de aleación más importantes. Se utiliza para la producción de aceros pulvimetalúrgicos de elevada resistencia. Es lo que se conoce en metalografía un elemento gammágeno, es decir, favorece la formación de austenita. El

níquel, en cantidades comprendidas entre 2 y un 5%, aumenta la resistencia mecánica y el límite de elasticidad del acero sin disminuir su tenacidad, evitando el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos. Sin embargo, desde que el níquel ha sido clasificado por la Unión Europea como sustancia peligrosa y también debido a su escasez en la naturaleza, han sido numerosos los estudios e investigaciones conducentes a desarrollar aleaciones libres de níquel con un nivel de propiedades mecánicas aceptables.

El ***Cobre*** es también un elemento gammágeno, que mejora el comportamiento a fatiga y la resistencia a la corrosión de los aceros.Además tiene una baja temperatura de fusión (1083ºC), lo que significa que aparecerá en fase líquida durante el proceso de sinterizado. La presencia de cobre líquido asegura la conexión entre las partículas de aleación.

El ***Molibdeno*** es un elemento alfágeno, es decir estabiliza la fase ferrita. Es uno de los elementos que más favorece la templabilidad de los aceros. También mejora la resistencia a la tracción.

El ***Cromo*** también favorece la templabilidad además de la inoxidabilidad y aumenta la dureza y la resistencia a tracción. La desventaja del cromo frente al níquel, es su alta afinidad por el oxigeno, lo que da problemas en el sinterizado. Como ventajas cabe destacar su bajo precio y su buena reciclabilidad.

2.2.2. Prensado

Es uno de los procesos clave de la pulvimetalurgia, ya que de él depende en gran medida la calidad final de la pieza.

Es el proceso que consigue pasar de la materia prima en forma de polvo suelto, a polvo compactado con la forma y la densidad que se necesita.

En la figura 2.7 se muestra el esquema de un utillaje utilizado en el prensado. Este concretamente, consta de 3 punzones superiores y 3 punzones inferiores, pero el número de punzones puede variar en función de la geometría de cada pieza.

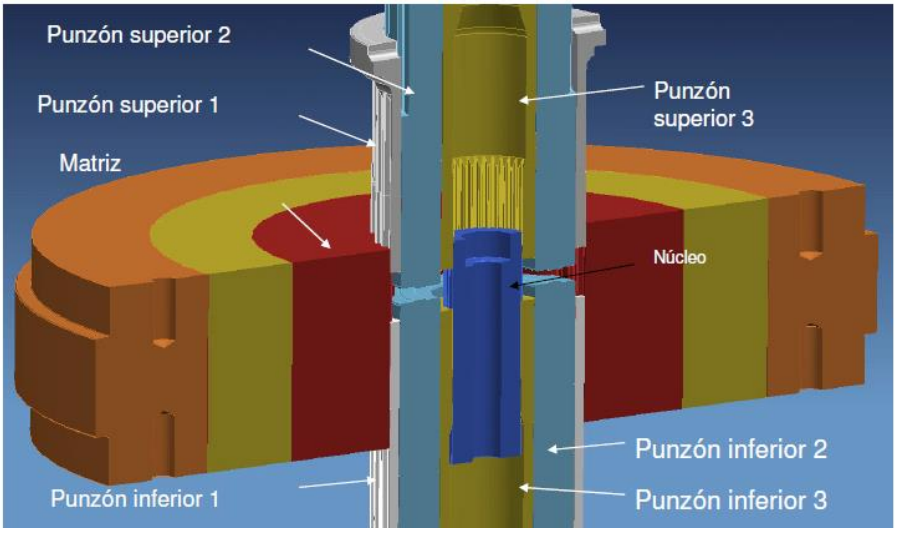


Figura 2.7 Esquema de un utillaje de 3 punzones superiores y inferiores

Las diferentes etapas de este tipo de prensado son:

- Llenado:

Se parte del utillaje vacío, tal y como muestra la figura 2.8. A continuación empieza el proceso propiamente de llenado por medio de un tolvín situado en la parte alta de la prensa donde se almacena el polvo materia prima, este polvo a través de un mecanismo de tubos llega a la zapata que es la que se encarga del llenado de utillaje.

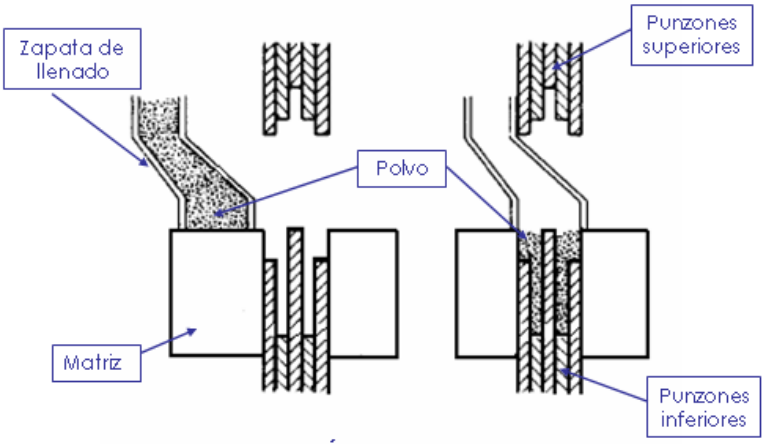


Figura 2.8 Proceso de llenado

Puede haber dos tipos de llenado, el llenado por succión, donde la zapata, cuando entra para realizar el llenado, los utillajes aún no han llegado a su posición final, realizando una serie de movimientos que favorecen la entrada de polvo en el hueco

que van dejando. Y un segundo tipo, el llenado por gravedad, cuando el polvo se deja caer en el hueco por simple gravedad.

- Transporte de polvo**:**

Los utillajes empiezan a moverse, ya con el hueco que ellos mismos dejan lleno de polvo. El utillaje superior se acerca hasta la superficie del polvo y a partir de ahí hay una serie de movimientos coordinados entre los utillajes superior e inferior para situar las columnas de polvo en su posición correcta para conferir a la pieza su geometría. No obstante, la altura de las columnas será mayor que la dimensión final que se desea obtener.

El cociente entre la dimensión de las columnas y la altura final deseada se conoce como factor de llenado que se obtiene de la relación entre la densidad aparente del polvo y la densidad del mismo tras la compactación.

- Prensado o compactación (figura 2.9)**:**

Se produce la compactación del polvo propiamente dicha. Para conseguir que las densidades obtenidas en el paso anterior, sigan siendo homogéneas, el prensado se lleva a cabo de forma unidireccional, ya que los punzones inferiores se mantienen inmóviles. Para simular un prensado inferior se desplaza la matriz hacia abajo, acompañando el movimiento de los punzones superiores.

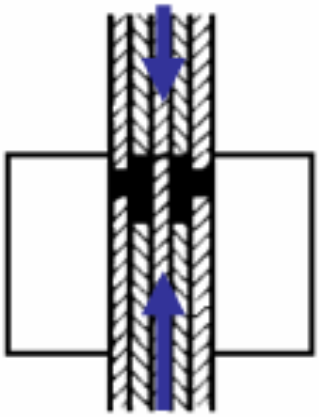


Figura 2.9 Prensado

- Extracción (figura 2.10)**:**

Se trata del paso más difícil, ya que a pesar de que la pieza ya está compactada, la consistencia de la pieza es mínima, y cualquier pequeño fallo en la extracción puede significar la aparición de defectos en la pieza.

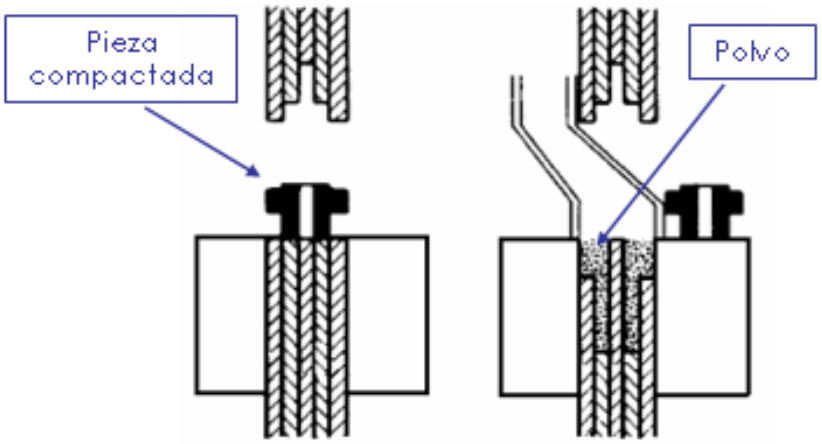


Figura 2.10 Extracción

El resultado de este proceso es la pieza con la forma y densidades requeridas, pero todavía es necesario que mediante el siguiente paso, el sinterizado, se pase de tener polvo prensado a tener la pieza final totalmente consistente y con las dimensiones deseadas.

2.2.3. Sinterizado

La definición ISO para el proceso de sinterizado lo describe como un tratamiento térmico de un polvo o compacto a temperatura inferior a la de fusión del principal constituyente, con el propósito de aumentar su resistencia a través de la unión de las partículas.

Aunque la definición parece sencilla, en este proceso existen muchos subprocesos, factores o situaciones puntuales que darán a la pieza sus características físico-químicas finales.

El factor fundamental e impulsor para que este proceso de sinterizado suceda, es la diferencia de energía libre entre los dos estados de la pieza: compactado y sinterizado. En la naturaleza, todo proceso tiende a su estado de mínima energía, y la sinterización no es una excepción.

El proceso de sinterización puede dividirse en varias etapas;

- **Iniciación y desoxidación**, en esta etapa se forman los llamados cuellos en los puntos de contacto entre las partículas individuales, es decir, tiene lugar el transporte inicial del material en los puntos de contacto de las partículas previamente tocantes. Esto se evidencia por medio de un aumento simultáneo de la conductividad.

Aumentando la temperatura y el tiempo, aumenta la resistencia de los cuellos, que origina un aumento en la resistencia total del compacto; y en una etapa posterior en una ductilidad aumentada. La razón de esto es el transporte microscópico del material resultando en parte a la difusión de la red y la difusión de la superficie.

En esta primera etapa también tiene lugar la desoxidación, ya que cuando la pieza en verde entra en el horno de sinterizado, todos sus granos de polvo van recubiertos de una película de óxido que, o se elimina, o producirá una sinterización incorrecta, cuya consecuencia final será la no obtención de las características mecánicas apropiadas de la pieza.

- **Difusión**: gobernada por la ecuación de Arrhenius (expresión matemática a través de la cual se demuestra la dependencia de la constante de velocidad de una reacción con la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción) y las leyes de Fick (leyes que describen los distintos modos de difusión a nivel molecular en forma de ecuaciones diferenciales) . El proceso de difusión puede ser de varios tipos (superficial, por juntas de grano, volumétrica, por flujo viscoso – plástico, por vacantes, intersticial…).

Como consecuencia de esta etapa de difusión se produce el engrosamiento de los cuellos entre los granos.

-Enfriamiento rápido: Tras la difusión y con objeto de obtener una microestructura de elevada resistencia y dureza, el material se somete a un enfriamiento rápido al objeto de conseguir estructuras metaestables de temple (martensitas y bainitas).

Con todo esto, se llega a la conclusión de que no existe una teoría definitiva de la sinterización, esto quiere decir que no hay ninguna fórmula que describa el proceso en su totalidad y que permita predecir las propiedades de los materiales sinterizados. Sin embargo, la sinterización es una técnica y, como tal, puede parametrizarse y controlarse.

Los parámetros más importantes de esta etapa son: selección y control de la temperatura de operación, uso de una atmósfera protectora adecuada, tipo de horno, tiempo y temperatura durante las tres fases del proceso (calentamiento, sinterización y enfriamiento) y composición, forma y tamaño del compacto.

Temperatura y tiempo:

A altas temperaturas, la difusión de los átomos se activa de manera importante. Existen dos tipos de temperaturas: las denominadas “temperatura estándar” (1120-1135 ºC) y la “temperatura alta” (1250 ºC).

La temperatura estándar es a partir de 1120ºC, por encima de ella, se consigue un aumento de la densidad de sinterización y una mejora de la homogeneización y el tipo de porosidad (más redondeada y cerrada), lo que implica una mejora en las condiciones mecánicas del producto final.

Atmósfera protectora:

El principal propósito de la atmósfera de sinterización es proteger al material de la oxidación. Las piezas objeto de este estudio se sinterizan en hornos con dos tipos de atmósferas distintas: nitrógeno-hidrógeno y endogás en función de la materia prima que se tratara: Para las materias primas con Ni, Cu y Mo, se empleó un horno abierto con atmósfera de endogás.

Los productos fabricados a partir de la materia prima con cromo y molibdeno, como ya se había explicado, debido a la gran afinidad del cromo por el oxígeno, se han sinterizado en hornos cerrados con atmósfera de N_2/H_2.

En las primeras, se utiliza frecuentemente una mezcla de 75% en volumen de hidrógeno y 25% de nitrógeno, el segundo es una mezcla de hidrógeno, nitrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua, cuyas proporciones pueden variar, que se obtiene por la combustión incompleta del gas natural. El endogás se quema a la entrada al horno de las piezas, esta atmósfera permite mantener el potencial de carbono.

MATERIALES UTILIZADOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3. Materiales utilizados y procedimiento experimental

En este apartado se presentarán los distintos materiales utilizados y posteriormente, se explicará el procedimiento experimental que se ha llevado a cabo en dichos materiales.

3.1 Materiales utilizados

Las materias primas utilizadas en este trabajo fueron tres tipos de polvos comerciales diferentes, Distaloy AE®, Distaloy HP® y AstaloyCrM®, suministrados todos ellos por el proveedor de polvos de hierro Höganäs AB.

El Distaloy AE®, que a partir de ahora denominaremos AE, es un polvo de hierro puro, ASC 100.29, al que se le añaden por difusión Ni, Cu y Mo como aleantes. El hecho de que la unión se produzca por difusión hace que el material muestre una elevada comprensibilidad y una gran resistencia en verde.

El Distaloy HP®, a partir de ahora HP, es un polvo de hierro con los mismos aleantes que el anterior, pero conteniendo el molibdeno como prealeación, mientras que el resto (Ni y Cu) están unidos al polvo base por difusión. Este polvo presenta cambio dimensional estable.

El AstaloyCrM®, en adelante CrM, es un polvo de hierro prealeado con Mo y Cr y posteriormente atomizado en agua. La ventaja de este polvo frente a los anteriores es su bajo coste, al ser el Cr el elemento aleante más barato y el que ha sufrido menos fluctuaciones en el transcurso de los años. Esta ventaja se ve favorecida por el hecho de que el níquel haya sido clasificado como sustancia peligrosa por la Unión Europea.

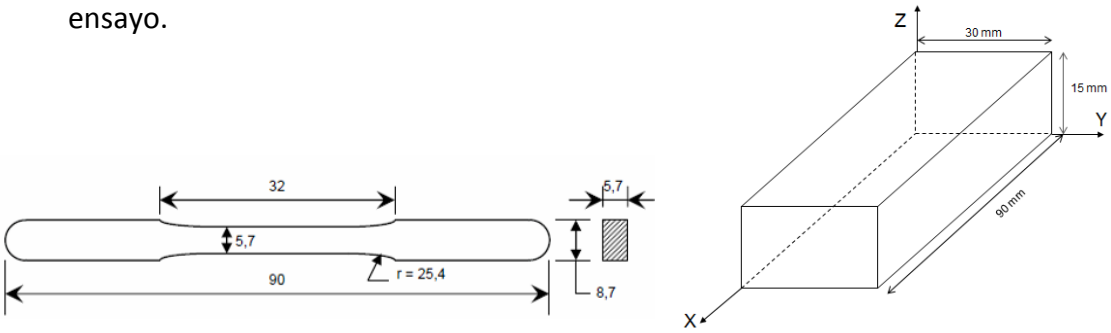
La tabla 3.1. Muestra la composición química de los polvos base

Tabla 3. 1 Composición química teórica de los polvos utilizados

	Polvo base	Método de aleación	Ni (%)	Cu (%)	Mo (%)	Cr(%)
AE	ASC100.29	100% difundido	4.00	1.50	0.50	-
HP	Astaloy Mo	Mo prealeado	4.00	2.00	1.40	-
CrM		Mo y Cr prealeados	-	-	0.50	3.00

A partir de los tres tipos de polvos base utilizados, se fabricaron dos tipos de muestras:

- Muestras con la geometría de una probeta de tracción standard. Las dimensiones de este tipo de probetas, de sección transversal rectangular, viene recogida en la Fig. 3..a. En adelante, cuando se haga referencia a este tipo de muestra utilizaremos la letra *T*.
- Muestras con forma paralepipédica, de dimensiones 30 x15 x 90 mm^3 (Fig. 3..b) a las que denominaremos muestras *B*. A partir de estas muestras se extraerán probetas destinadas a distintos tipos de ensayo.



a) b)

Fig. 3.1 Geometrías de los dos tipos de muestras utilizadas

Estos dos tipos de muestra fueron sometidos a los procesos de sinterizado y/o revenido que usualmente se realizan en función del tipo de polvo de partida. Dado que se parte de 3 tipos de polvo, de cada tipo de muestra tendremos 6 materiales distintos que denominaremos de la siguiente manera:

- AES: Muestras fabricadas a partir de los polvos AE y sometidas a un proceso de doble prensado y doble sinterizado (DPDS).
- AER: Muestras fabricada a partir de polvos AE y que tras el proceso de DPDS fueron sometidas a un tratamiento de revenido.
- HPS: Muestras fabricadas a partir de los polvos HP y sometidas a un proceso de doble prensado y doble sinterizado (DPDS).
- HPR: Muestras fabricadas a partir de los polvos HP y que tras el proceso de DPDS fueron sometidas a un tratamiento de revenido.
- CrMS: Muestras fabricadas a partir de los polvos CrM y sometidas a un proceso de prensado y sinterizado simple.

- CrMR: Muestras fabricadas a partir de los polvos CrM y tras someterse a un proceso de prensado y sinterizado simple, fueron sometidas a un tratamiento de revenido.

La empresa fabricante de estos materiales realizó, de cada tipo de muestra y material el análisis tanto del contenido en carbono como de la densidad y la dureza, propiedades que podríamos denominar convencionales y que son las normalmente utilizadas en el control de calidad de estos productos. La tabla 3.2. resume los resultados obtenidos.

	%C				Densidad g/cm^3		Dureza HB 2,5			
	Muestras T		Muestras B		Muestras T	Muestras B	Muestras T		Muestras B	
	s	i	s	i			s	i	s	i
AES	0.61	0.62	0.53	0.62)	6.71	7.03	279	287	227	238
AER	0.61	0.59	0.52	0.62	6.95	7.09	276	275	216	245
HPS	0.44	0.45	0.55	0.54	6.92	7.13	329	330	367	363
HPR	0.42	0.39	0.55	0.39	6.70	7.00	301	294	299	254
CrMS	0.45	0.48	0.43	0.51	6.72	6.95	348	377	394	429
CrMR	0.47	0.43	0.44	0.54	6.72	7.00	355	351	351	406

Tabla 3.2. Contenido en carbono, densidad y dureza HB2.5 de las muestras analizadas

Para complementar estos resultados también se analizó la microestructura de cada muestra y material identificando las fases presentes.

Los materiales fabricados a partir de polvos con base AE caben destacar por tener la microestructura heterogénea, lo que se debe al hecho de que el polvo de partida contenga a sus aleantes en forma predifundida.

La microestructura está compuesta por una matriz bainítico-martensítica con austenita retenida presente posiblemente en las zonas más enriquecidas en níquel alrededor de los poros. Además, se aprecian islas de perlita fina rodeadas por ferrita

Pasando ahora al material HP, la principal diferencia de este polvo con respecto al anterior es que el molibdeno se encuentra prealeado en vez de predifundido, lo que revierte en que la microestructura sea más homogénea que la presentada en los productos fabricados con AE.

Se trata en general de una microestructura mayoritaria de martensita, con agujas de bainita e islotes de austenita retenida. En este caso no se aprecia la existencia de ferrita y perlita.

Los productos derivados del polvo CrM, Este polvo, en el que tanto el molibdeno como el cromo están prealeados, se caracteriza por una microestructura homogénea, constituida por una matriz bainito-martensítica, con predominancia de la fase martensítica. El alto contenido de Cr favorece la formación de bainita, lo cual provoca un incremento en las propiedades a tracción en comparación con la estructura perlítica.

3.2 Procedimiento experimental

3.2.1 Ensayo de tracción

Para obtener las propiedades mecánicas a tracción de los materiales analizados, se han realizado ensayos de tracción sobre probetas tipo T y B. Para las primeras (especialmente fabricadas para este propósito) cuya geometría general se muestra en la figura 3.2. Se utilizó un mínimo de tres probetas para cada tipo de material.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos mecánicos MTS, que se encuentra en el Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Oviedo, a temperatura ambiente (figura 3.3).

El primer paso es medir de la forma más exacta posible las dimensiones de las probetas. Las que se utilizaron en el proyecto tenían unas dimensiones constantes de 6x6 mm^2. Además se procedió a marcar una longitud de referencia en la zona calibrada de la probeta L_0=30mm, al objeto de medir el alargamiento a rotura.

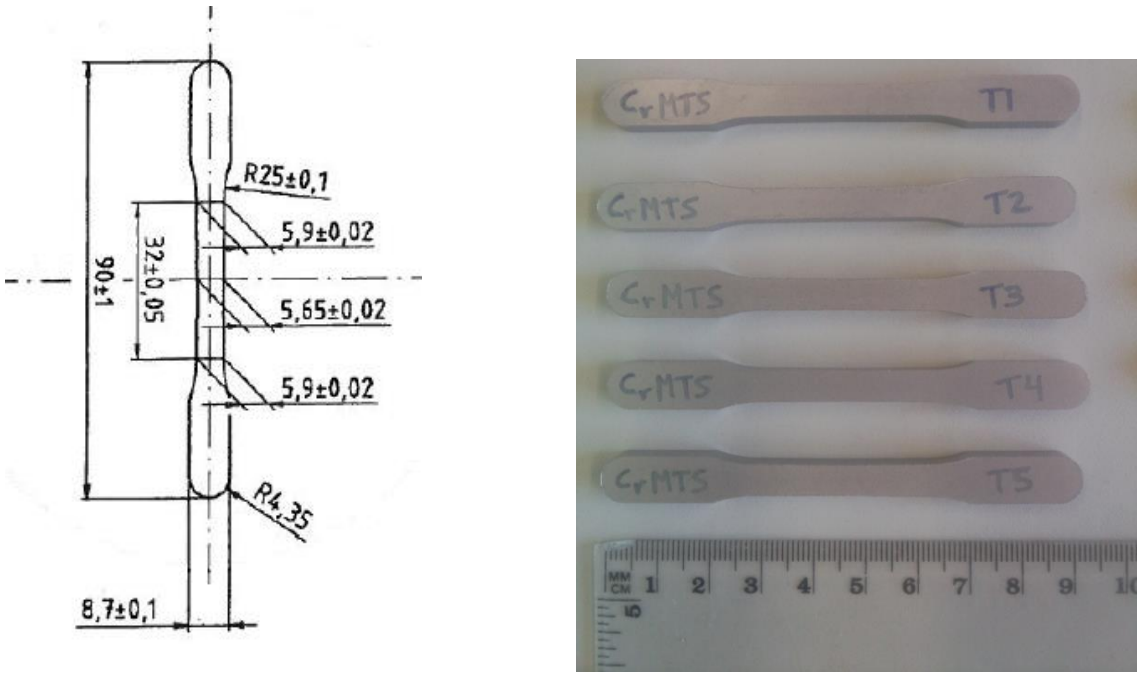


Figura 3.2 Geometría general de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción

Figura 3.3 Máquina utilizada en el ensayo de tracción

La medida de la deformación en el curso del ensayo se llevó a cabo utilizando un extensómetro de tracción (figura 3.4) que tiene una longitud de referencia (gagelength) de 20 mm. La velocidad de desplazamiento utilizada en el ensayo fue de 5 mm/min.

Figura 3.4 Extensómetro utilizado en el ensayo de tracción

Las probetas tipo B, de menor tamaño, que fueron extraídas de los bloques tipo B, tal como se esquematiza en la figura 3.5 y que designaremos como BT, además se muestra la geometría general de dichas probetas, cuyo espesor medio fue de aproximadamente 0.5mm.

Estas probetas se extrajeron de tres zonas del bloque respecto al espesor: una zona próxima a la cara de la muestra que había estado en contacto con la placa durante la fabricación (zona i), la zona media respecto al espesor (zona m) y la zona superior (zona s).

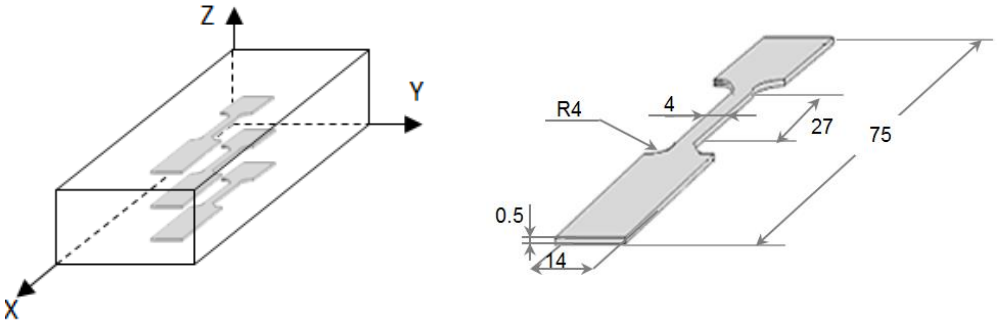


Figura 3.5 Probetas de tracción obtenidas de las muestras B

Con el objeto tanto de comparar resultados como de obtener parámetros tan importantes en este tipo de materiales como el coeficiente de Poisson (ν), en algunos casos se empleó además un equipo de videocorrelación de imágenes Aramis. La utilización de esta técnica requiere la preparación previa de la superficie de las probetas, que deben ser tintadas con un spray especial, de modo que sobre un fondo totalmente blanco se adviertan multitud de pequeños puntos oscuros cuyo desplazamiento será seguido por las cámaras que componen el equipo. El análisis de dichos desplazamientos, permite al equipo obtener, la deformación instantánea en cualquier dirección.

En la figura 3.6 se muestra las distintas probetas preparadas para el ensayo además de la colocación de las cámaras para realizar el ensayo

Figura 3.6

A partir de las curvas de tracción obtenidas se calcularon los parámetros característicos: modulo elástico, E, limite elástico, σys, resistencia a la tracción, σR, y alargamiento a rotura, A. Además, en aquellos ensayos en los que se utilizó el equipo Aramis también se obtuvo el coeficiente de Poisson, ν. De cada tipo de geometría de probeta se realizaron al menos 3 ensayos. En la figura 3.7 se muestra una curva de tracción

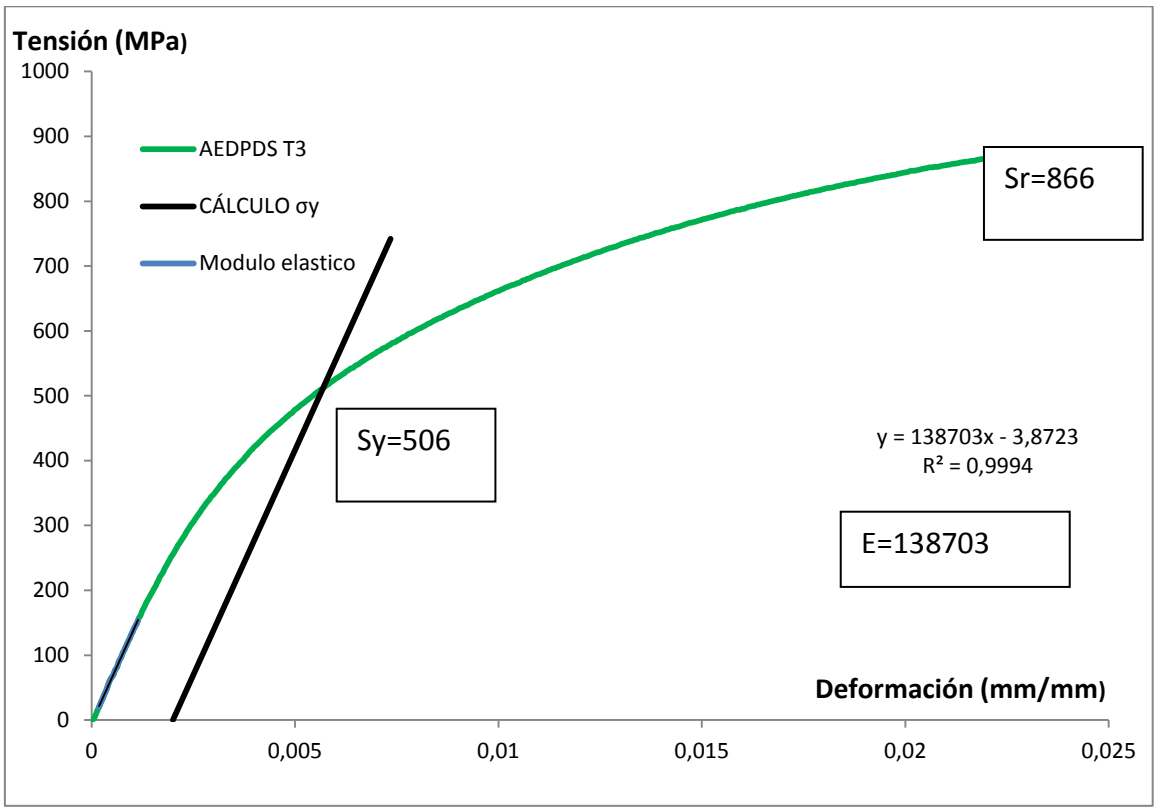


Figura 3.7 Curva de tracción del material Aes con sus propiedades mecánicas

3.2.2 Análisis de porosidad

Los materiales sinterizados se caracterizan por la presencia de poros a lo largo de la pieza, siendo así necesario analizar en profundidad esa porosidad en distintas direcciones y posiciones de cada probeta.

Así, en el caso de las muestras tipo T, el análisis fue realizado sobre secciones transversales al eje longitudinal de la muestra en la zona de las cabezas de las probetas que posteriormente fueron ensayadas. Asimismo una probeta de cada material fue seccionada por la zona calibrada central al objeto de medir la porosidad en esa zona.

En la sección de la cabeza se hicieron nueve mediciones, tres en la zona inferior, tres en la central y tres en la superior (Figura 3.8) para así poder comparar la variación de la porosidad entre las distintas posiciones.

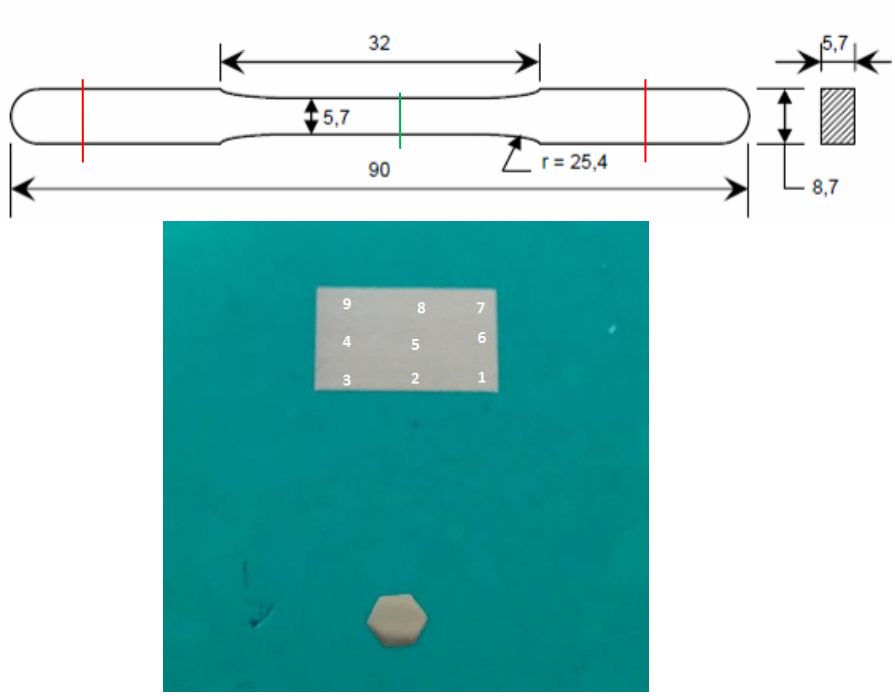
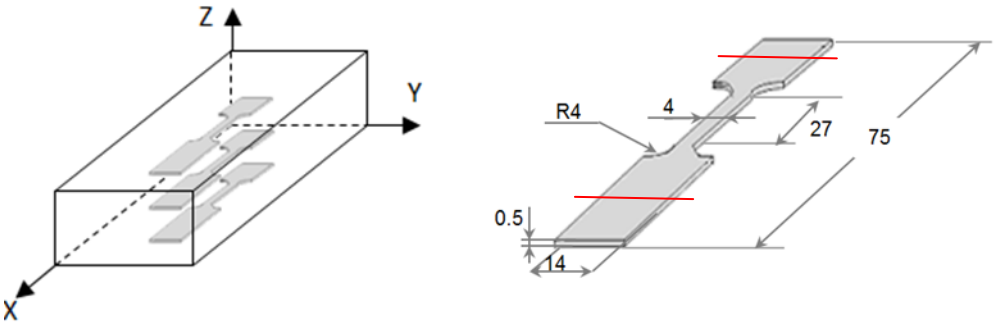


Figura 3.8 Zona de obtención de las mediciones de porosidad en probetas T

Por su parte, las muestras tipo B, mucho más masivas, fueron analizadas en secciones transversales al eje más largo (eje longitudinal), en secciones paralelas a dicho eje y en probetas de tracción sacadas del interior del bloque (Figura 3.9).

En las probetas de tracción, la porosidad se estudió en la zona de las cabezas para comprobar así si existía diferencia entre ambas.



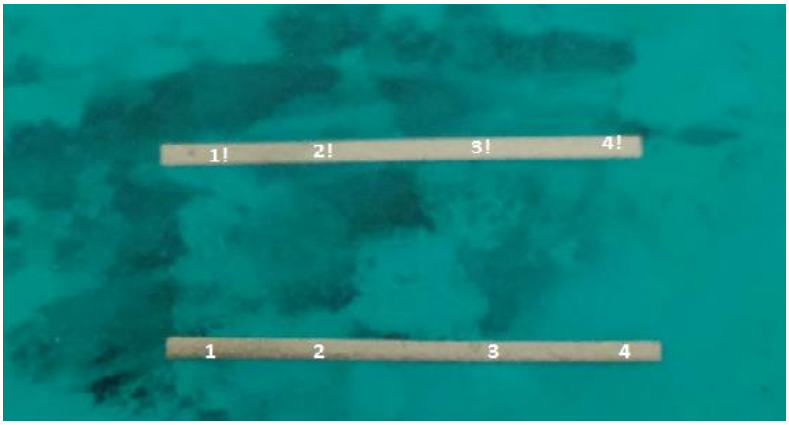


Figura 3.9 Zona de obtención de las mediciones de porosidad en probetas B

También se realizaron mediciones en una cara del bloque en dirección del eje X para comparar los resultados así obtenidos con los que se obtuvieron en las probetas de tracción anteriores. Pudiéndose comprobar así la influencia del espesor sobre piezas masivas.

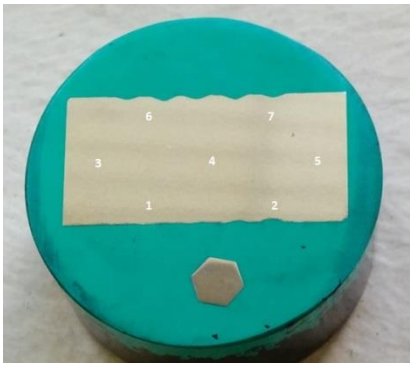


Figura 3.10 Zona de obtención de las mediciones de porosidad en el bloque B

3.2.2.1 Preparación de las probetas y equipos utilizados

Las probetas, una vez cortadas y embutidas, se sometieron a un proceso de desbaste y pulido hasta conseguir una superficie especular. En estos productos este proceso es muy importante, ya que un mal pulido, puede llevar a esconder o agrandar posibles defectos que tenga el producto.

Para poder manejar las probetas a la hora de lijarlas y pulirlas se utilizó una embutidora Simplimet 1000 de Buehler (figura 3.11). Se trata de una máquina automática que permite embutir las probetas en resina.

En la máquina se introduce la probeta y se le añade resina, y la propia máquina se encarga de someterlas a altas condiciones de presión y temperatura, provocando que

la resina se funda y se amolde a la probeta para así obtener la probeta lista para pulir una vez enfriada y consolidad la resina.

Figura 3.11 Máquina embutidora

Una vez que tenemos la probeta embutida (Figura 3.12), la pasamos por las diferentes lijas para desbastar y pulir, de forma manual, se recomienda hacer el lijado con papel de 180, 320, 600 y 1200 siempre que se realice un cambio de orientación de la probeta, bien en el mismo papel, bien en otro se cambiara 90º

A continuación se emplearon pulidoras semiautomáticas para pasar los últimos paños de pulido, como las que podemos ver en la figura 3.13. Primero se pasaron por un paño con una pasta de diamante de 6µm, y a continuación por otro con pasta de 1µm.

Figura 3.12 Probeta embutida

Figura 3.13 Pulidoras semiautomáticas

Antes de utilizar los paños, y entre los mismos, es muy importante lavar con agua a presión y jabón las probetas y secarlas bien para eliminar cualquier resto de suciedad que pudiera quedar en ellas y contaminar los paños.

Una vez preparadas las superficies de las probetas, las observamos al microscopio óptico (modelo Nikon Epiphot 200), conectado al ordenador para analizar las imágenes, utilizando el software de tratamiento de imágenes BuehlerOmnimet.(Véase figura 3.14).

Figura 3.14 Microscopio utilizado para el análisis de la porosidad

3.2.3 Análisis de las imágenes

Dado que no se disponía de un método normalizado para medir la porosidad de este tipo de metales pulvimetalúrgicos, lo único que se hizo fue medirla para observar si existían diferencias entre unas partes del material y otras, así como entre los diferentes materiales.

Para ello se utilizaron imágenes a 100 y 200 aumentos de la superficie de las probetas en estado de pulido, como la que se presenta en la figura 3.15, en laque las zonas claras corresponden al material metálico y las zonas oscuras serían poros.

Aunque parezca que identificar todas las zonas oscuras con poros no sería totalmente cierto, ya que es posible que un pequeño porcentaje de la misma se corresponda a algún óxido o suciedad, dado que todas las probetas pasaron por el mismo proceso de preparación se supuso que la proporción de suciedad y óxidos era la misma en todas las muestras, siendo perfectamente comparables los resultados obtenidos.

El software empleado para el análisis de la porosidad (figura 3.16) permite calcular el porcentaje que constituye la zona oscura y el porcentaje que constituye la zona más clara de la imagen obtenida, obteniéndose así el porcentaje de porosidad.

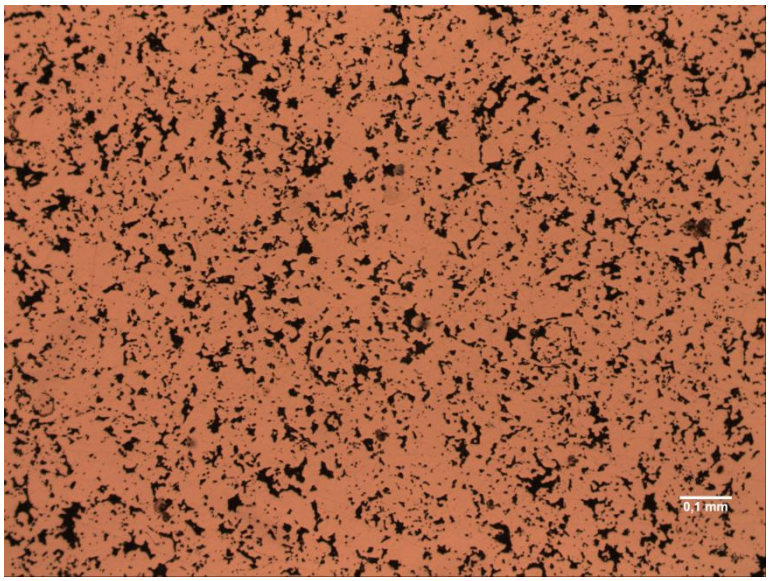


Figura 3.15 Ejemplo de una de las probetas analizadas a 100 aumentos

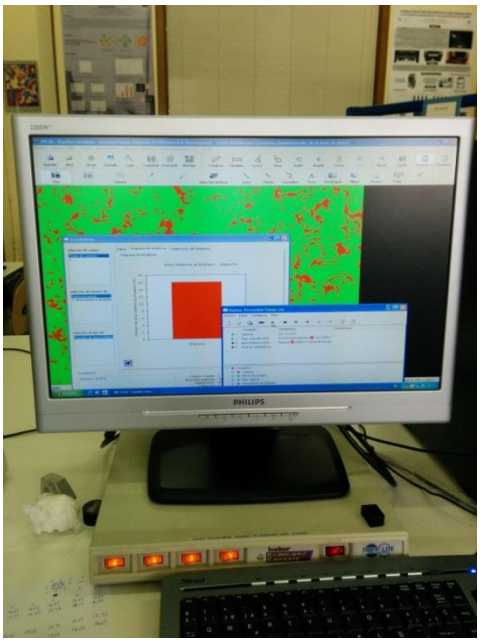


Figura 3.16 Imagen del software utilizado para el cálculo de porosidad

Además del estudio cuantitativo de la porosidad, directamente ligado a la densidad, en este trabajo también se valoraron aspectos como la forma de los poros o el tipo de porosidad, distinguiendo entre la porosidad secundaria constituida por los poros de menor tamaño y la porosidad primaria formada por los poros más grandes, que normalmente quedan entre las partículas de polvo y que en general son los responsables de la formación de grietas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4 Resultados y discusión

En este capítulo se presentarán y discutirán los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados durante este Proyecto a partir de las muestras patrón, es decir, los resultados obtenidos de ensayar las probetas de tracción y probetas extraídas de las muestras tipo B, proporcionadas por el fabricante. Además de la porosidad de los distintos tipos de materiales y probetas.

Como ya se ha comentado en el punto 3, para realizar correctamente los ensayos y que los resultados fueran los más reales posibles se han tenido que tratar dichas probetas para analizar las muestras en las mejores condiciones para su ensayo.

4.1 Análisis de porosidad

En este trabajo se realizó un análisis de la porosidad con el objeto de justificar las posibles diferencias existentes en los ensayos mecánicos que se realizarían más tarde.

Se analizaron probetas de tracción tipo T y tipo B proporcionadas por el fabricante, dentro del bloque tipo se extrajeron las probetas BT que también fueron analizadas. En todas ellas se realizó el análisis en distintas puntos de las cabezas y del centro y tanto del material sin revenir como revenido.

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos a 100 y 200 aumentos de los distintos materiales, diferenciando entre el material sinterizado y el sinterizado y revenido.

		Aes								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas BT	10x	14,76	9,55	11,53	8,94	12,37	10,09	12,84	12,69	
	20x	11,31	8,91	9,98	7,42	8,49	7,26	8,36	8,25	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10x	11,07	15,14	**15,83**	**16,76**	**15,06**	13,86	15,77		
	20x	13,4	12,14	**12,58**	**16,23**	**13,71**	12,68	14,45		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	19,43	19,99	19,29	**20,92**	**19,61**	**17,25**	17,84	18,82	16,77
	20x	17,98	19,66	17,11	**20,42**	**19,19**	**15,85**	15,48	18,07	16,88

Tabla 4.1 Porosidad del material AE sinterizado

		Aesr								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas BT	10x	8,11	8,89	10,04	11,04	11,55	10,58	11,99	10,81	
	20x	8,69	9,93	8,69	10,67	8,67	9,34	9,96	9,29	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10x	14,97	14,59	**16,17**	**17,57**	**15,49**	13,52	14,03		
	20x	13,08	13,4	**13,68**	**14,09**	**15,31**	14,42	14,26		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	17,8	17,86	16,06	**17,46**	**18,06**	**22,28**	22,42	18,39	17,43
	20x	15,38	14,84	13,82	**11,84**	**15,35**	**16,88**	18,66	16,09	16,05

Tabla 4.2 Porosidad del material AE sinterizado y revenido

		Hps								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas BT	10x	13,82	14,55	11,23	15,05	11,26	14,44	12,61	15,3	
	20x	15,22	11,9	11,9	13,97	15	14,2	12,88	13,21	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10x	14,02	12,55	**14,01**	**16,73**	**15,94**	15,4	15,91		
	20x	14,95	12,16	**14,89**	**14,73**	**15**	15,26	15,09		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	18,37	17,34	17,75	**18,96**	**18,59**	**20,07**	19,21	17,87	16,73
	20x	15,41	16,26	14,84	**17,71**	**16,78**	**16,04**	16,12	16,22	15,85

Tabla 4.3 Porosidad del material HP sinterizado

		Hpsr								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas BT	10x	9,82	12,68	9,41	13,2	9,1	12,91	10,58	11,16	
	20x	9,77	13,77	9,85	11,84	9,75	12,34	7,45	11,95	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10,95	12,55	10,08	**13,66**	**10,85**	**9,94**	12,6	15,91		
	10,84	13,21	11,14	**14,23**	**11,34**	**11,08**	12,57	15,09		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	15,53	14,94	12,24	**16,16**	**15,88**	**18,19**	17,35	14,76	14,75
	20x	14,13	13,77	11,63	**15,76**	**12,54**	**16,98**	14,36	13,13	12,97

Tabla 4.4 Porosidad del material HP sinterizado y revenido

		Crms								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas	10x	14,55	11,36	13,29	11,04	12,85	10,7	13,46	10,34	
BT	20x	12,78	11,7	13,27	10,79	12,58	10,99	11,27	11,4	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10x	12,57	14,71	**12,88**	**16,28**	**16,43**	15,26	14,79		
	20x	13,67	14,29	**13,69**	**16,61**	**14,82**	15,56	14,37		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	15,94	15,59	15,66	**15,36**	**15,66**	**16,86**	15,14	15,42	13,7
	20x	13,12	14,39	12,08	**13,24**	**13,96**	**15,16**	12,89	12,51	12,11

Tabla 4.5 Porosidad del material CrM sinterizado

		Crmsr								
		1	1!	2	2!	3	3!	4	4!	
Probetas	10x	13,32	14,18	12,62	13,69	12,22	12,2	12,65	12,3	
BT	20x	12,51	12,87	12,34	11,54	13,11	11,41	11,72	12,7	
		1	2	3	4	5	6	7		
Bloque B	10x	11,36	15,41	**12,25**	**15,85**	**15,1**	15,01	15,91		
	20x	12,9	13,8	**15,11**	**15,62**	**13,43**	15,08	15,55		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probetas T	10x	17,16	17,79	17,66	**17,26**	**17,36**	**19,48**	19,46	17,72	15,05
	20x		18,89	15,61	**15,83**	**15,96**	**15,11**	17,07	16,6	13,95

Tabla 4.6 Porosidad del material CrM sinterizado y revenido

Se observa que la distribución de poros no es homogénea en la dirección del espesor, mostrando una mayor porosidad en la zona media, sobre todo en el caso de las muestras B.

La figura 4.1 recoge el aspecto de la distribución de poros a través del montaje de varias fotografías obtenidas en diferentes niveles en dirección del espesor (dirección z) del material Aes. En la figura se aprecia la mayor concentración de poros en la zona central (mitad del espesor, zona m).

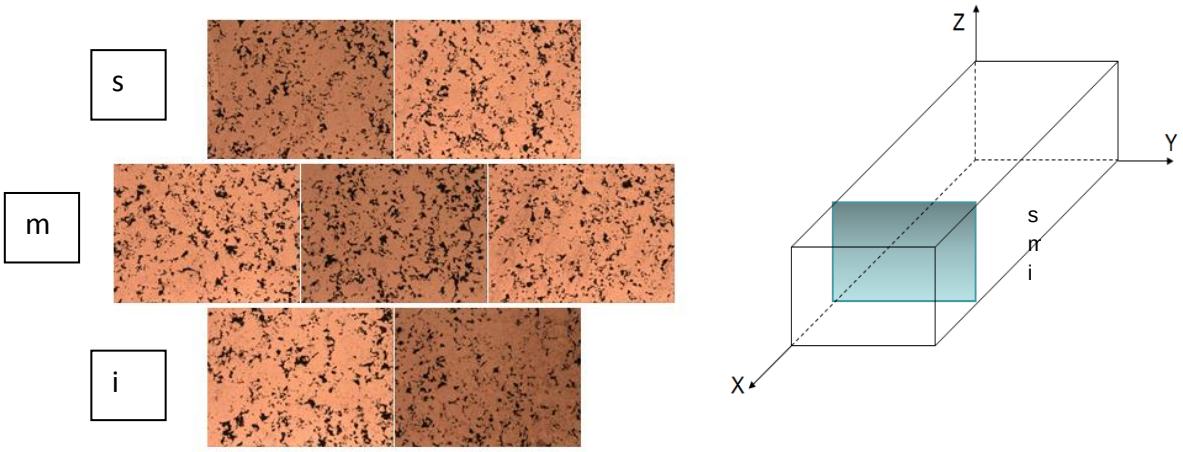


Fig. 4. 1 Distribución de poros en sección transversal de las muestras tipo B del material HPR.

4.2 Ensayo de tracción

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados. Se analizaron probetas de tracción tipo T y tipo B proporcionadas por el fabricante.

Se realizaron ensayos de tracción sobre 8 probetas de material revenido y otras 8 probetas de material no revenido, en algunos casos se estropeo la muestra y no se pudo realizar los 8 ensayos. Se obtuvieron valores del módulo elástico E, límite elástico convencional σ_y, resistencia a tracción σ_r y el alargamiento a rotura ε_r.

En una de las probetas tipo T y en tres del bloque se utilizó un equipo de videocorrelación de imágenes Aramis para así poder calcular además el coeficiente de poisson, el resto se utilizaron extensómetro como se a descrito en el apartado anterior.

Se ha observado que el alargamiento a tracción era muy bajo y que rompía con facilidad debido a su naturaleza porosa.

Las siguientes tablas y gráficos muestran los resultados de los distintos materiales tanto revenidos como sin revenir. Se diferencia los dos tipos de probetas, tipo T y tipo B.

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
AES T1	128678	514	887	0,0204
AES T2	136149	503	881	0,0210
AES T3	138703	553	866	0,0220
AES T4_Aramis	140710	510	835	0,0190
media	136060	523	878	0,0206
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
AES_Aramis (i)1mm	132739	435	732	0,0230
AES_Aramis_1 (m)	128760	386	562	0,0152
AES_Aramis_javier	117965	373	477	0,0100

Tabla 4.7 Características mecánicas del material Aes

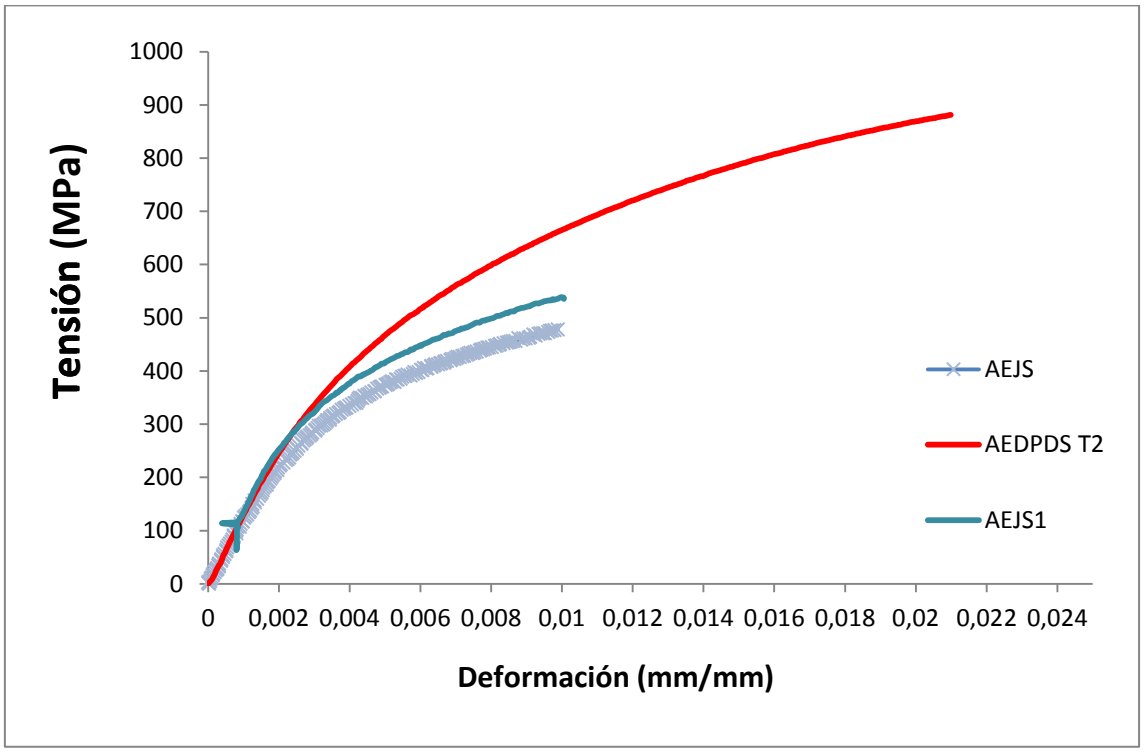


Figura 4.2 Curvas de tracción de diferentes probetas del material AEs

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
AESR T6	143417	545	933	0,0248
AESR T7	144522	533,73	908	0,0229
AESR T8	137448	515,43	929	0,0265
AESR T9_Aramis	140710	508	834	0,0190
media	**141524**	**526**	**901**	**0,0233**
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
AESR_Aramis (i)1mm	135861	451	718	0,0240
AESR_Aramis (i)	122436	390	608	0,0230
AESR_extensometro	122092	415	663	0,0277
AESR_Aramis_javier	122674	374	598	0,0231

Tabla 4.8 Características mecánicas del material AEsr

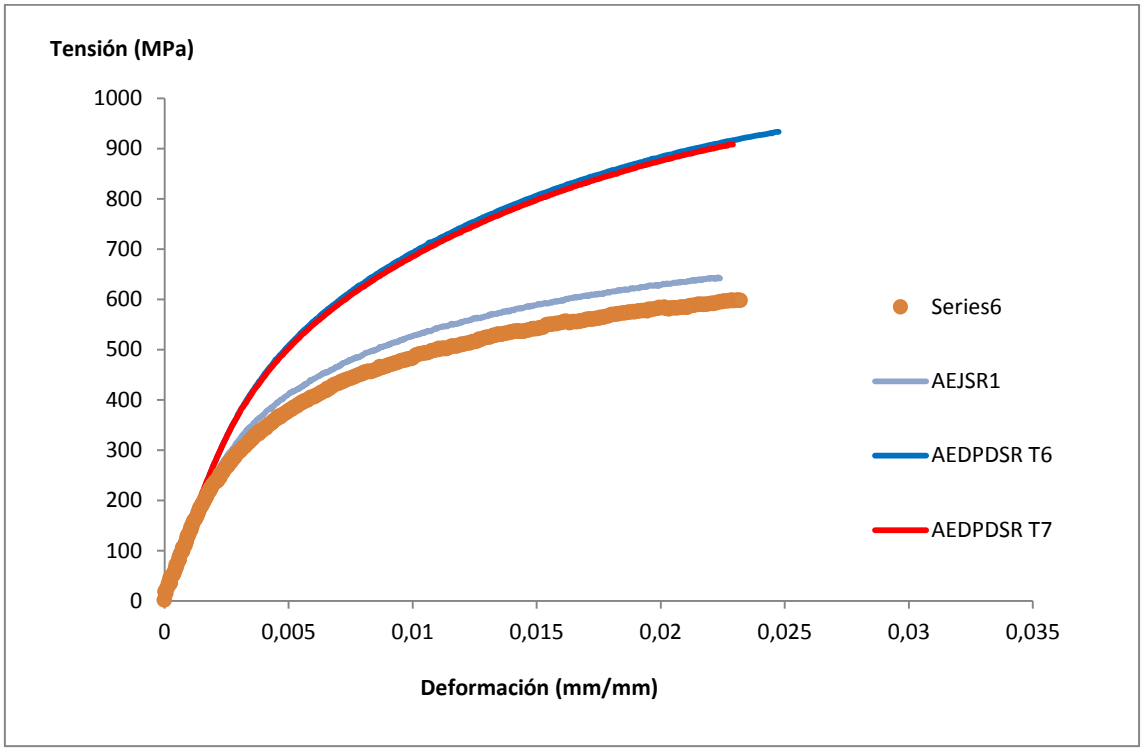


Figura 4.3 Curvas de tracción de diferentes probetas del material AEsr

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
HPS T1	121958	488	831	0,0137
HPS T2	114448	515	789	0,0127
HPS T3	117453	552	730	0,0105
HPS T4	***Se utilizó para calcular la porosidad***			**0,0123**
media	**117953**	**518**	**783**	**0,01227**
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
HPS_Aramis (i)1mm	123002	577	765	0,0114
HPS_Aramis	122737	370	464	0,0092
HPS_Aramis_javier	112000	480	534	0,0085

Tabla 4.9 Características mecánicas del material HPs

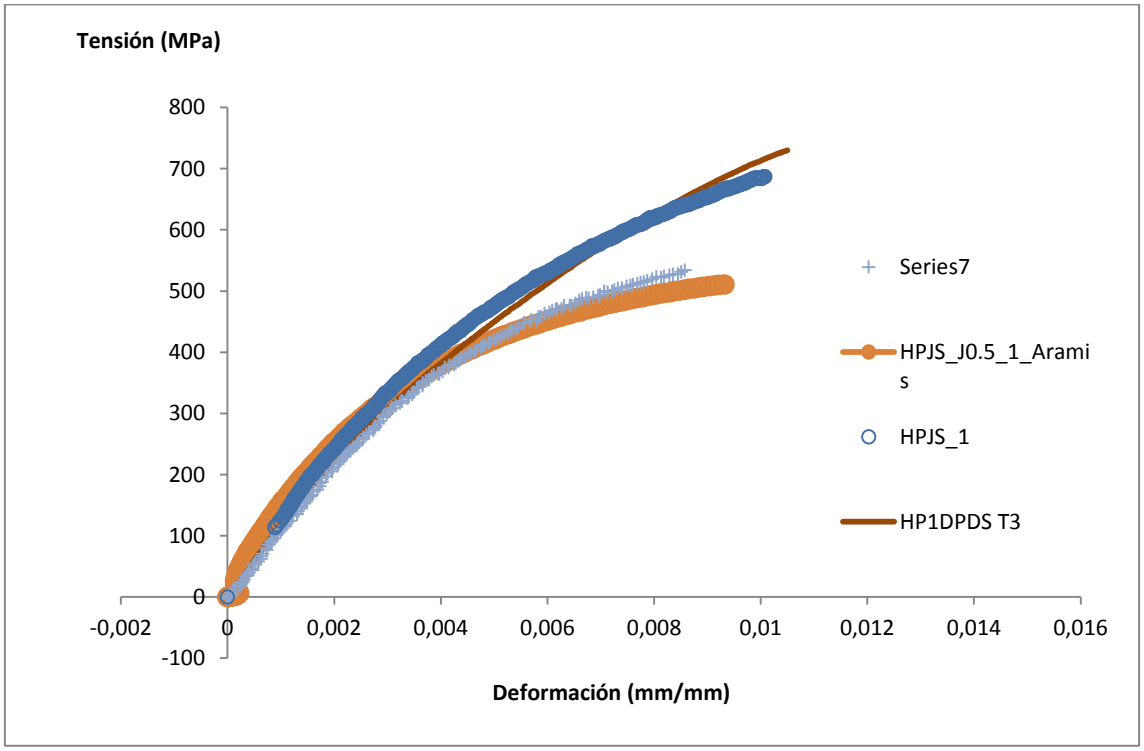


Figura 4.4 Curvas de tracción de diferentes probetas del material Hps

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
HPSR T6	**129017**	**561**	**899,028967**	**0,0144**
HPSR T7	**131245**	**532**	**932,079692**	**0,0165**
HPSR T8	**130969**	**544**	**933,033921**	**0,0164**
HPSR T9_Aramis	**127119**	**559**	**870**	**0,0137**
media	**129587,5**	**549**	**908,535645**	**0,015244075**
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
HPSR_Aramis (ni)1mm	130063	445	557	0,0091
HPSR_Aramis	125494	328	405	0,0096
HPSR_Aramis_Javier	108000	340	386	0,0088

Tabla 4.10 Características mecánicas del material HPsr

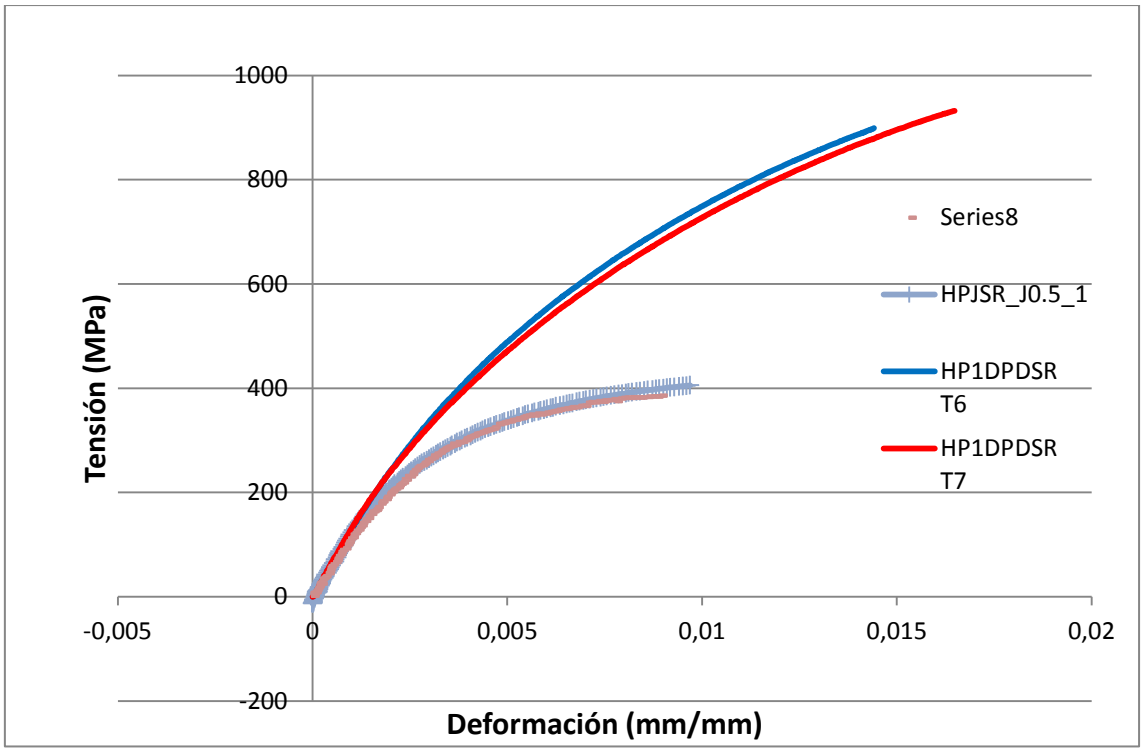


Figura 4.5 Curvas de tracción de diferentes probetas del material Hpsr

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
CrMS T1	139438	699,225118	699	0,0062
CrMS T2	140431	723,866594	724	0,0065
CrMS T3	131261	753,916257	754	0,0072
CrMS T4_Aramis	131776	621,85	622	0,0054
media	**135727**	**700**	**700**	**0,0063**
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
CrMJS_Aramis (ni-m)1mm	137714	785	859	0,0093
CrMJS_Aramis (ni)	126231	656	683	0,0078
CrMJS_Extensometro	137747	671	704	0,0076
CrMJS_Aramis _Javier	125555	650	650	0,0068

Tabla 4.11 Características mecánicas del material CrMs

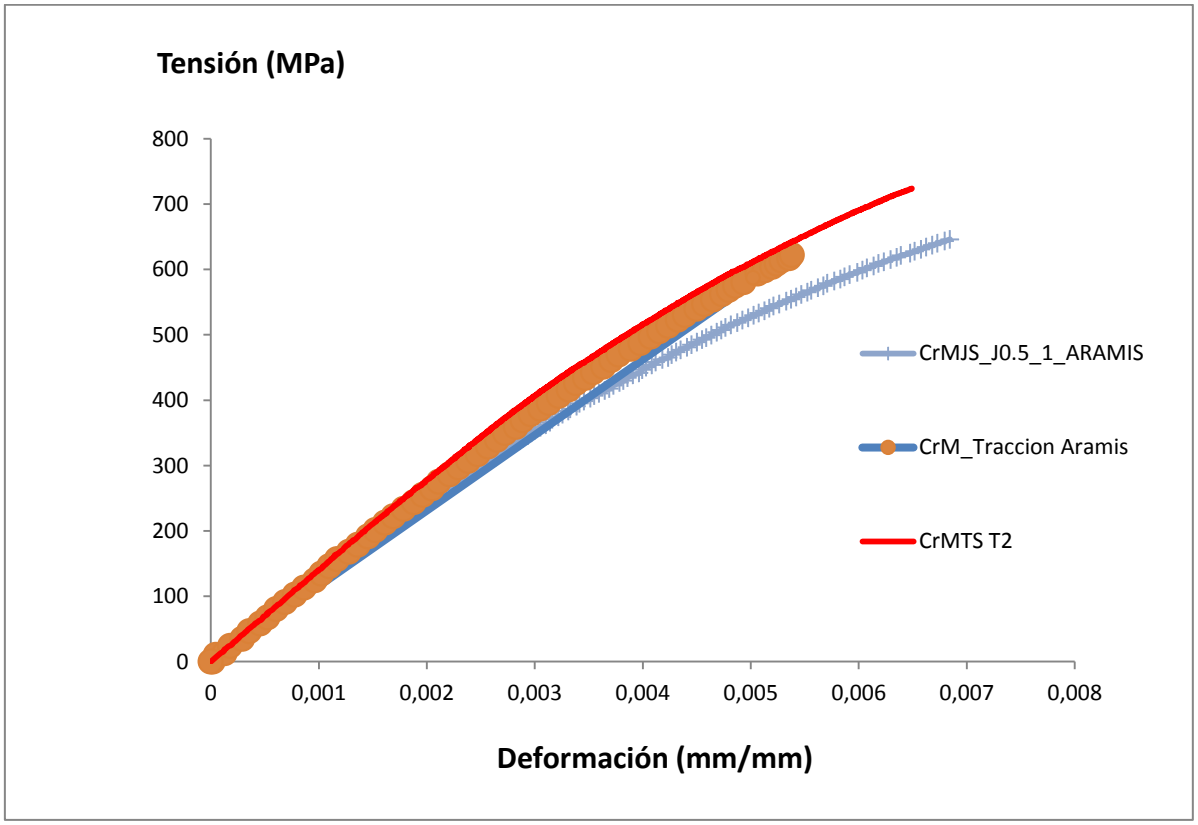


Figura 4.6 Curvas de tracción de diferentes probetas del material CrMs

PROBETAS T	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)	εr (mm/mm)
CrMTSR T1	134640	734	745	0,0077
CrMTSR T2	131587	717	785	0,0086
CrMTSR T3	133557	748	796	0,0085
CrMTSR T4_Aramis	Esta probeta se erdió en el horno durante el revenido			
Media	**133261**	**733**	**775**	**0,0083**
PROBETAS BLOQUE	**E (MPa)**	**σy (MPa)**	**σr (MPa)**	**εr (mm/mm)**
CrMJSR_2 Aramis (i-m)	126231	656	683	0,0078
CrMJSR_Extensometro	127197	680	784	0,0101
CrMJSR_Aramis_Javier	126571	615	627	0,0071

Tabla 4.12 Características mecánicas del material CrMsr

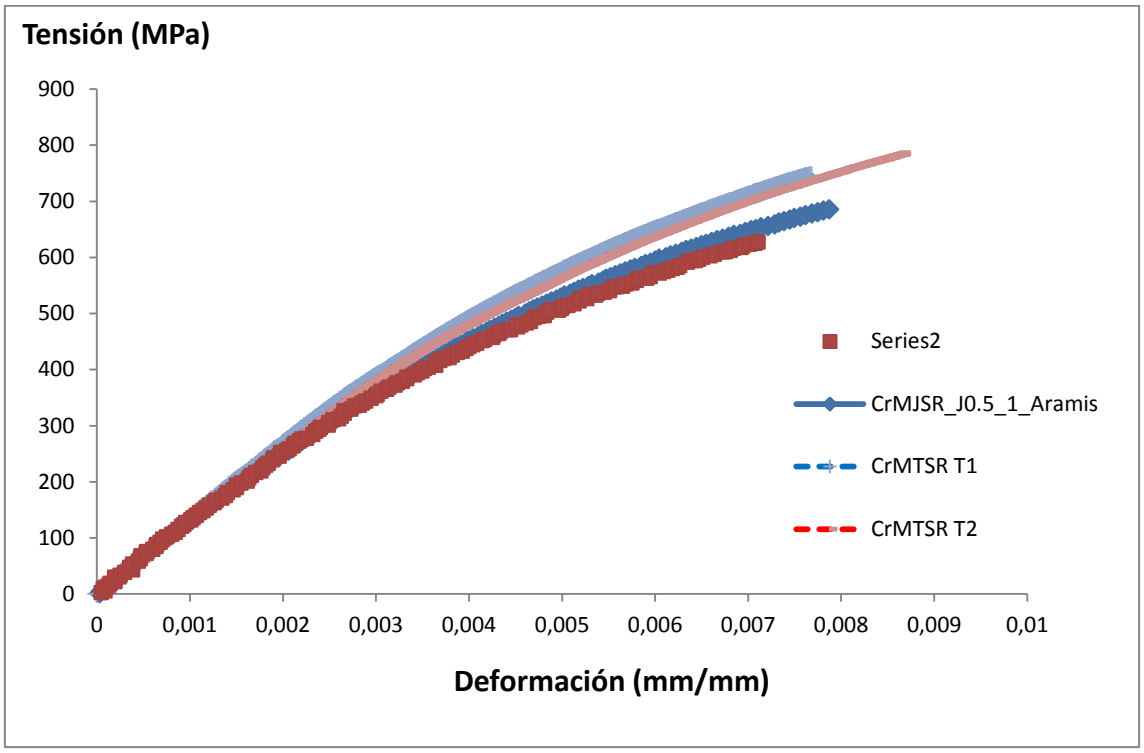


Figura 4.7 Curvas de tracción de diferentes probetas del material CrMsr

Las curvas que presentan una mayor resistencia son las obtenidas tras el ensayo de las muestras tipo T, muestras que habían sido fabricadas directamente con la geometría de una probeta de tracción estándar. Por debajo de estas curvas se encuentran las obtenidas tras ensayar probetas extraídas de las muestras B en la posición i (en la posición s se obtienen curvas semejantes). Por último y con una menor resistencia y

ductilidad se encuentran las curvas obtenidas tras el ensayo de muestras B pero extraídas en la zona media del espesor (BTm).

El hecho de que las probetas tipo T exhiban una mayor resistencia que el resto estaría fundamentado en su microestructura, con un menor contenido en ferrita, en virtud de una mayor velocidad de enfriamiento y en el menor porcentaje de carbono que tiene la zona central.

Esta misma razón, apoyaría la menor resistencia de las probetas obtenidas de la zona central de las muestras tipo B, zona que enfriaría más lentamente que las superficies. Pero además de una menor resistencia, las probetas BTm muestran también pérdida de ductilidad. La razón de este comportamiento estaría en la mayor porosidad presente en la zona media de las probetas.

Cabe destacar que el material CrM muestra un comportamiento mecánico a tracción más homogéneo, con muy poca dispersión en función del tipo de muestra analizado. No obstante, son de nuevo las probetas provenientes de la mitad del espesor de las muestras B (probetas BTm) las que presentan unas características mecánicas más mermadas, lo que de nuevo se fundamentaría, básicamente, en la mayor porosidad y menor velocidad de enfriamiento de esta zona respecto al resto.

4.3 Discusión de resultados

En este apartado vamos a analizar los resultados de las propiedades mecánicas en función de los valores de porosidad.

Se ha visto además que la geometría de la muestra, y más concretamente su efecto sobre la velocidad de enfriamiento tras el proceso de sinterizado, parece tener más influencia en las propiedades mecánicas de un determinado material que el efecto de un posterior revenido.

4.3.1 Relación entre la porosidad y las características mecánicas a tracción

Con objeto de intentar ver el efecto de la porosidad, se ha considerado que las muestras procedentes de un mismo polvo de partida tendrían la misma microestructura mientras tuviesen la misma geometría y se han comparado sus propiedades mecánicas a tracción en función de la porosidad. En las siguientes tablas se muestran con las propiedades mecánicas a tracción el porcentaje de porosidad y el coeficiente de poisson para los distintos materiales.(Figura4.7 Material AE, figura4.8 Material HP, Figura 4.9 Material CrM).

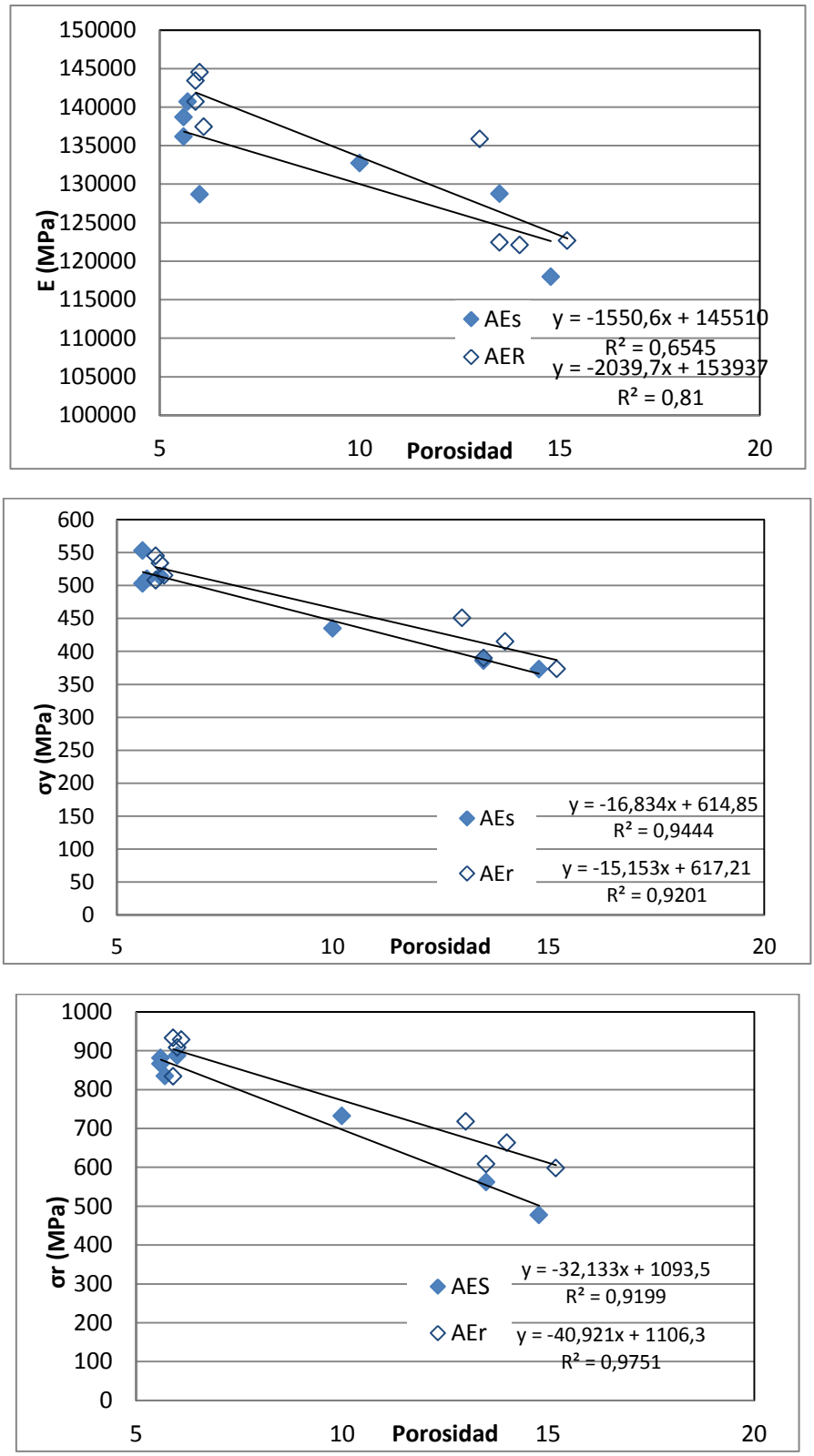


Fig. 4.8 Relación de la porosidad de los materiales procedentes de los polvos AE con: (a) el modulo elástico (b) límite elástico, (c) la resistencia mecánica

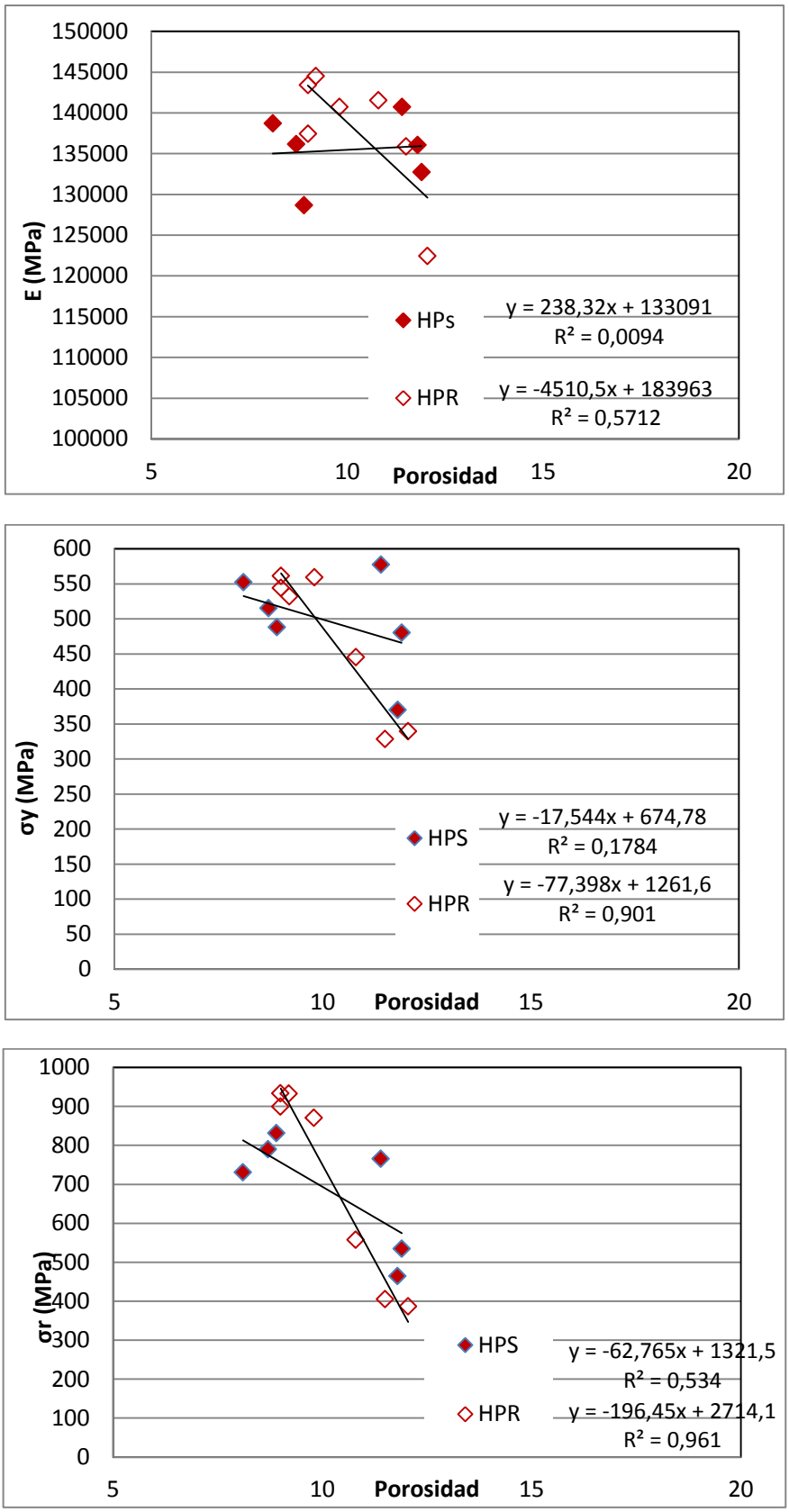
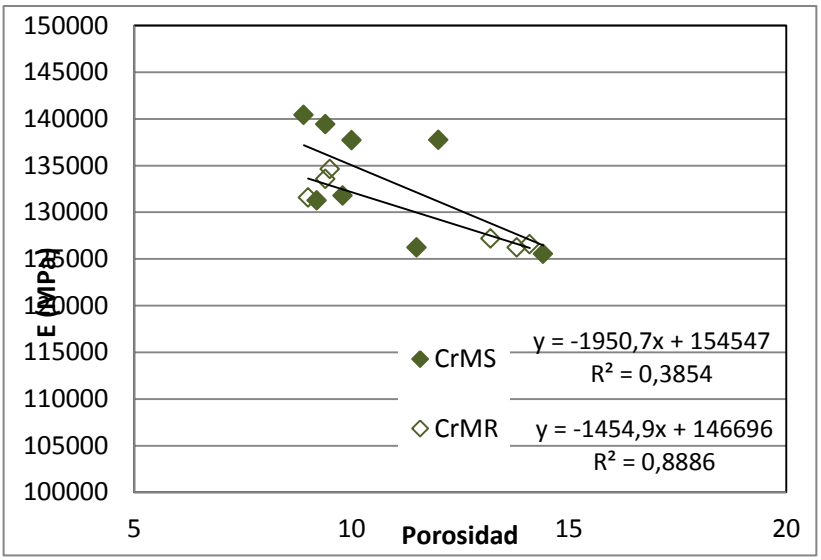
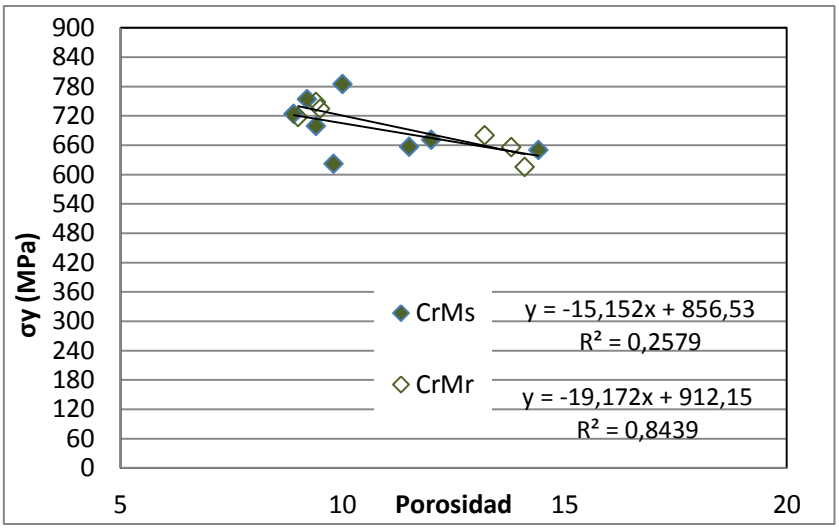


Fig. 4.9 Relación de la porosidad de los materiales procedentes de los polvos HP con: (a) el modulo elástico (b) límite elástico, (c) la resistencia mecánica





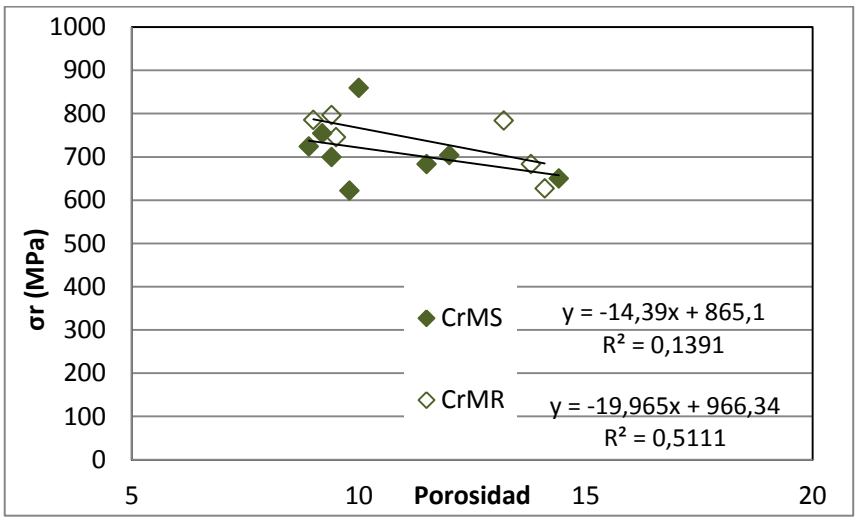


Fig. 4.10 Relación de la porosidad de los materiales procedentes de los polvos CrM con: (a) el modulo elástico (b) límite elástico, (c) la resistencia mecánica

Aplicación en la determinación de las propiedades mecánicas de cubos sincronizadores

5 Aplicación en la determinación de las propiedades mecánicas de cubos sincronizadores

Con el fin de utilizar la relación de los resultados obtenidos anteriormente se analizó la porosidad en unas probetas obtenidas directamente de un cubo sincronizador de cada material.

Con los resultados obtenidos anteriormente, con la porosidad ahora medida y con el tipo de material utilizado se pueden obtener las propiedades mecánicas del cubo sincronizador, en las zonas del diente, del cubo y de los radios.

5.1 Determinación de la porosidad

Se analizó la porosidad en tres muestras distintas obtenidas de los cubos sincronizadores para así poder analizar las propiedades mecánicas.

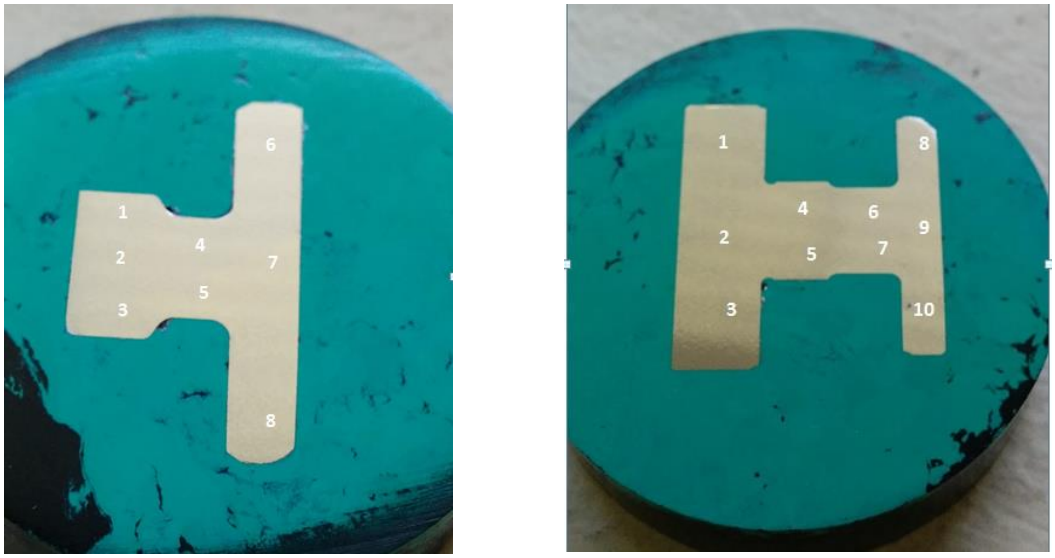


Figura 5.1 Zonas donde se midió la porosidad en las probetas de los cubos sincronizadores

En las siguientes tablas (tabla 5.1, tabla 5.2, tabla5.3) se muestran los valores de las porosidades de estas muestras diferenciando entre la zona del diente, la del radio y la del cubo. Observándose que la zona del radio es la menor porosidad tenia, mientras que la del cubo y el diente son muy parecidas pudiéndose considerar la misma.

	Aes							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10x	14,98	12,54	11,54	10,94	9,77	11,24	11,85	14,52
20x	11,88	11,49	13,18	9,36	7,78	11,02	14,61	15,13
		Cubo		Radio			Diente	

Tabla 5.1 Porosidad del cubo sincronizador de material Aes

	Hps									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10x	19,92	21,22	16,07	14,74	15,17	14,58	12,56	19,26	15,75	15,37
20x	18,68	15,78	13,45	11,29	16,23	12,49	11,51	18,34	14,64	14,68
		Cubo		Radio 1		Radio 2			Diente	

Tabla 5.2 Porosidad del cubo sincronizador de material Hps

	CrMs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10x	9,62	10,9	7.53	9,2	8,88	8,76	9,32	8,6	9,91	8,67
		Cubo		Radio 1		Radio 2			Diente	

Tabla 5.3 Porosidad del cubo sincronizador de material CrMs

5.2 Obtención de las características mecánicas

Utilizando los valores de porosidad media en los cubos sicronizadores y diferenciando entra la zona del radio y la zona del diente y cubo, se realizó una tabla con los valores aproximados que tendrían las propiedades mecánicas a tracción.

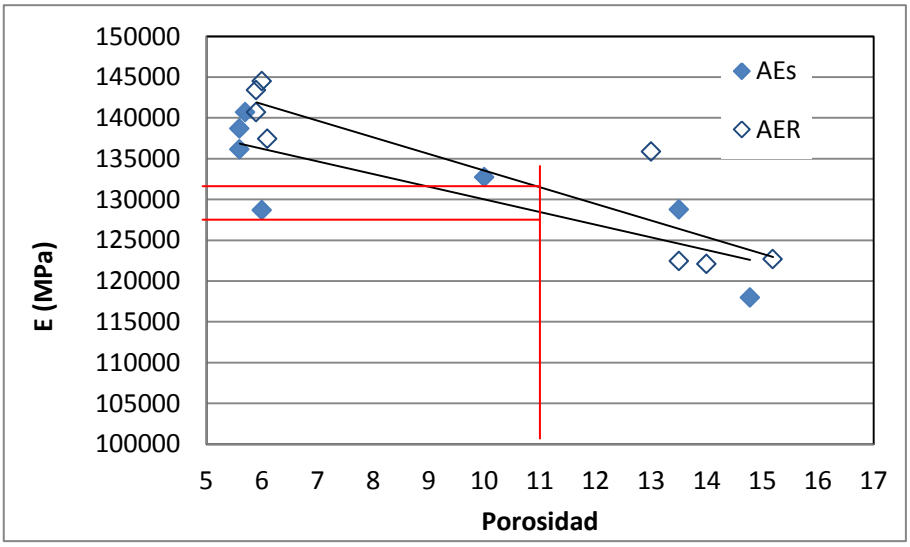


Figura 5.2 Obtención del módulo elástico en función de la porosidad

AE	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)
Diente	130000	430	680
Radio	135000	480	780
Cubo	131000	430	690

HP	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)
Diente	127000	350	400
Radio	130000	400	430
Cubo	125000	280	350

CrM	E (MPa)	σy (MPa)	σr (MPa)
Diente	135000	740	750
Radio	138000	770	800
Cubo	135000	750	750

Tabla 5.4 Valores de las propiedades a tracción de los cubos sincronizadores obtenidos a partir de la porosidad

Cabe decir que estos valores son aproximados ya que no se puede saber con seguridad el porcentaje de porosidad que tendrían todos los cubos sincronizadores

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

En el trabajo se ha analizado el comportamiento mecánico de los distintos materiales fabricados mediante un proceso pulvimetalúrgico, aplicando ensayos convencionales de tracción y medidas de porosidad. Tras el análisis y discusión de los resultados obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones:

- La primera y más importante es que se ha demostrado que una variación de las propiedades mecánicas en función de la porosidad, a mayor concentración de poros estas propiedades mecánicas disminuyen de forma lineal.

- De esta forma conociendo la porosidad de un material pueden obtenerse los valores de las propiedades mecánicas.

- El proceso de revenido en estos materiales no tiene influencia en el porcentaje de porosidad.

- En piezas masivas hay que diferenciar entre la zona central y la superior e inferior debido a la diferencia de porosidad existente entre ambas.

- El proceso de fabricación de la pieza también afecta al porcentaje de porosidad que vaya tener esta, ya que al estar fabricadas mediante prensas se podría ejercer mayor presión en algunas zonas.

PRESUPUESTO

7 Presupuesto

El presupuesto ha sido desglosado en tres capítulos: Coste de la preparación de las probetas, coste del personal y por último, coste total del proyecto, que engloba los dos anteriores.

Coste de la preparación de las probetas

Se ha medido el coste por unidad de probetas manejadas durante el proyecto, quedando el coste final reflejado en la tabla 7.1. Se incluye en el coste por unidad, el gasto y mantenimiento de las diferentes máquinas utilizadas.

Preparación de las probetas			
Concepto	Coste/ud (€)	Ud	Coste (€)
Extracción y corte de las probetas	10	24	240
Pulido de las probetas	20	24	480
Utilización Microscopio y Software	120	3	360
		TOTAL CAPÍTULO 1	**1080**

Tabla 7.1 Coste de la preparación de las probetas

Coste del personal

En este caso se ha medido el coste por hora, suponiendo que se la ha dedicado al proyecto 4h/día, media jornada laboral. Ya que todas las acciones fueron llevadas a cabo por un ingeniero en formación, suponemos un coste aproximado de 10€/h.

Coste del personal			
Concepto	Coste/h (€)	Horas	Coste (€)
Obtención y análisis de la información	10	140	1400
Preparación y ensayos de las probetas	10	192	1920
Observaciones al microscopio	10	60	600
Cálculo y evaluación de los resultados	10	100	1000
Redacción del trabajo	10	100	1000
		TOTAL CAPÍTULO 2	**5920**

Tabla 7.2 Coste del personal

Coste total

Coste total	
Concepto	Coste (€)
Capítulo 1: coste de la preración de las probetas	1080
Capítulo 2: coste del personal	5920
Total Bruto	7000
Gastos Generales (8%)	560
Beneficio Industrial (6%)	420
Total Parcial	7980
IVA (21%)	1676
COSTE TOTAL	**9656**

Tabla 7.3 Coste total

El coste total asciende a 9655.80 € (nueve mil seiscientos cincuenta y cinco euros y ochenta céntimos).

FDO: Javier Fernández Castañón

DNI: 11443605-R

BIBLIOGRAFÍA

1. Piedad García, "Aceros sinterizados de altas prestaciones y baja aleación para la industrialización decubos sincronizadores," leganñ, 2013.

2. P. García, "ILA 2423 Comparación de resultados piezas fabricadas con CrA, HP y CrM en atmósfera N2/H2," 2013.

3. Deng X. Chawla N., "Microestructure and mechanical behaviour of porous sintered steels," 98-112, 2005.

4. Höganäs AB, Polvos de hierro y acero Höganäs para componentes sinterizados, 1998.

5. María Fernández Vega, Tesis doctoral, 2014

6. Diego Álvarez Garrido, Caracterización mecánica de aceros utilizados en la fabricación de cubos sincronizadores; efecto del tratamiento térmico y de la posición de la probeta, 2012

7. P. Lindskog, "Dimensional Accuracy, Microstructure and Mechanical Properties of Parts made from some high strength sintered steels ," Höganäs, Sweeden.

8. W. Schatt, K.P. Wieters, Powder metallurgy, processing and materials, 1997

9. Pero-Sanz Elorz, J.A., Ciencia e Ingeniería de Materiales, 1996.

10. Signorini T., Molinari M., Straffelini G. Puscas M., "Image Analysis Investigation of the effect of the process variables on the porosity of sintered chromium steels ," 1-10, January 2003.