

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Trabajo Fin de Máster

***Optimización microestructural de blindajes para
revestimientos en prensas de compresión uniaxial
empleadas en la fabricación
de material refractario***

Autor: Laura Francos Garrote

Tutor: José Florentino Álvarez Antolín

Oviedo, Julio de 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a José Florentino Álvarez Antolín toda la dedicación que le ha prestado a este proyecto, su disponibilidad e incondicional ayuda en todo momento.

También agradecer encarecidamente a los maestros de laboratorio Juan y Nacho el haberme ayudado en el de laboratorio.

Muchas gracias a mi novio David por ayudarme y apoyarme siempre.

Y por haberme enseñado que un camino de mil millas comienza con un simple paso , dar las gracias a mis padres, Pilar y José Ángel, y mi hermana Lucía porque sin ellos nada de esto sería realidad.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	4
2. INTRODUCCIÓN.....	4
3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	5
3.1 MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO.....	5
3.1.1 ACERO.....	5
3.1.2 FUNDICIONES BLANCAS.....	5
3.2 DUREZA.....	7
3.3 ENSAYO DE DESGASTE "PIN ON DISK".....	8
3.4 MICROSCOPIA.....	10
3.4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	10
3.4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	13
3.4.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
4.1. DUREZA.....	15
4.2 ENSAYO DE DESGASTE "PIN ON DISK".....	17
4.3 MICROSCOPIA.....	21
4.3.1 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	21
4.3.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	34
5. CONCLUSIONES.....	44
6. REFERENCIAS.....	45

1. RESUMEN

Ante la reducida vida útil de los blindajes de acero usados como revestimiento de prensas de compresión uniaxial para la fabricación de material refractario, se han propuesto a estudio dos fundiciones blancas como materiales alternativos. Como método experimental se han llevado a cabo tratamientos térmicos, además de ensayos de dureza, desgaste y metalográficos para los tres materiales de interés. Tras analizar los resultados y valorar el grado de influencia de cada propiedad en la elección del material como sustituto del acero, se ha concluido que el material más adecuado es la fundición blanca con 18% Cromo catalogada en el presente trabajo como FED18, tras haber recibido tratamiento de temple en aceite y dos revenidos a 500°C.

2. INTRODUCCIÓN

En la fabricación de ladrillos de material refractario se utilizan, como método de conformado, prensas de compresión uniaxial. El presente proyecto trata de optimizar microestructuralmente el blindaje utilizado como revestimiento en este tipo de prensas.

El prensado uniaxial tiene por objeto la compactación de la mezcla dentro de un molde rígido aplicando la presión en una sola dirección por medio de un émbolo, un pistón o un punzón rígido. Es un procedimiento de elevada capacidad de producción y fácil de automatizar (*Blanco, 2015*).

Los blindajes que conforman el revestimiento están, por tanto, en contacto directo con el material refractario a prensar, siendo la superficie de contacto la encargada de transmitir la fuerza compresiva necesaria para la compactación del ladrillo. Será pues una zona sometida a grandes exigencias mecánicas, debiendo presentar elevadas prestaciones en cuanto a desgaste, dureza y resistencia a corrosión.

Actualmente, se utiliza como revestimiento un acero para herramientas altamente aleado. Sin embargo, debido a sus condiciones de trabajo está sujeto a una corta vida útil, por lo que se considera de interés el estudio de otros materiales que ofrezcan mejores rendimientos. Como alternativas, se plantean dos tipos diferentes de fundición blanca altamente aleadas en cromo.

El presente trabajo detalla el estudio comparativo de los tres materiales antes mencionados en cuanto a las propiedades más influyentes ante su utilización como revestimiento en prensas de compresión uniaxial, que son dureza y resistencia a desgaste.

3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.1 MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO

3.1.1 ACERO

Actualmente, el revestimiento se fabrica a partir de acero hipereutectoide para herramientas, cuya composición química se detalla en la Tabla 1.

	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni	% V	% W
ACERO	2	0,18	0,41	11,27	0,2	0,36	0,1	0,1

Tabla 1: Composición química del acero utilizado como revestimiento.

Este tipo de acero encaja en el grupo "D" de la clasificación AISI, denominados como "aceros autotemplantes" para herramientas. Por su contenido en cromo, puede clasificarse como un acero inoxidable martensítico, y teniendo en cuenta su elevado contenido en carbono resulta ser ledeburítico. (Pero-Sanz, 2004)

Es un acero cuya resistencia a la abrasión y desgaste supera a la de otros aceros, si bien su maquinabilidad resulta inferior a la de éstos. Ello justifica su utilización como revestimiento en presas de compresión uniaxial.

3.1.2 FUNDICIONES BLANCAS

Las fundiciones blancas objeto de estudio presentan las composiciones químicas que se reflejan en la Tabla 2.

	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo
FED 18	3,01	1,17	0,82	18,2	2,05
FED 25	2,72	1,19	0,81	25,1	0,52

Tabla 2: Composición química de las fundiciones blancas objeto de estudio.

Ambas fundiciones son de tipo hipoeutéctico altamente aleadas en cromo. Debido a su elevado contenido en cromo presentan una alta dureza y resistencia al desgaste, por lo que son utilizadas comúnmente en la industria minera (trituration, molienda y clasificación de minerales), siderúrgica y cementera.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Este tipo de fundición blanca se caracteriza por solidificar dando como constituyente disperso austenita primaria rica en cromo y una matriz eutéctica no ledeburítica compuesta por austenita y carburos K_2 . En esta eutéctica, el constituyente matriz es la austenita que rodea a dichos carburos. Cabe mencionar que son además martensíticas, debido a la gran templabilidad que confieren a la austenita proeutéctica y eutéctica los elementos que ésta contiene en solución sólida de sustitución. Es por ello que el enfriamiento al aire desde el estado bruto de moldeo pueda proporcionar martensita, lo cual infiere una elevada dureza a la fundición. Esta es la razón por la cual se conforman mediante moldeo a partir del caldo líquido. Sin embargo, en el caso de ser necesario su mecanizado, se precisa la aplicación de un tratamiento de ablandamiento mediante un enfriamiento isotérmico en la zona perlítica que impide la formación de martensita. En nuestro caso, al haber recibido los testigos de colada directamente de la fundición, se he llevado a cabo este tratamiento de ablandamiento en ambos tipos de fundición, manteniendo las piezas a 700°C durante 10 horas, con enfriamiento dentro del propio horno. *(Pero-Sanz, 1994)*

Por otro lado, el enfriamiento al aire de las piezas en bruto de moldeo supone habitualmente la aparición de austenita residual sin transformar, debido al lento enfriamiento y al bajo valor de la temperatura M_s . Esta austenita residual resta dureza a la pieza, por lo que resulta conveniente su eliminación mediante un tratamiento de temple. En nuestro caso se llevó a cabo un temple a 1000°C para reaustenizar las piezas durante 4 horas, permitiendo así la desestabilización de la austenita por precipitación de carburos. El enfriamiento posterior se hace utilizando como medio aceite, convirtiéndose esta austenita ahora empobrecida en carbono y cromo en martensita. Con ello obtenemos una menor proporción de austenita retenida, lo cual se traduce en una mayor cantidad de martensita, que deriva en un aumento de la dureza de la pieza. *(Pero-Sanz, 1994)*

Sin embargo, tras el tratamiento de temple aún queda una fracción de austenita retenida, por lo que se aplican dos tratamientos de revenido a 500°C durante 6 horas con enfriamiento al aire, que tienen como objetivo la eliminación de la austenita retenida así como un endurecimiento estructural debido a la transformación de ésta en martensita y a la precipitación de carburos.

Con todo lo anterior se pretende adecuar la microestructura de ambas fundiciones para así conseguir un aumento en las prestaciones mecánicas.

3.2 DUREZA

El modo de medir la dureza de un material es cuantificar la resistencia del mismo a ser penetrado. En nuestro caso se ha utilizado el ensayo de dureza Rockwell, que mide la profundidad de la huella permanente producida mediante un penetrador que es presionado sobre la pieza con una fuerza determinada.



Figura 1: Durómetro Rockwell

Existen diferentes escalas de dureza Rockwell, en función de la dureza del material a ensayar. En nuestro caso, se aplica una escala tipo "C", indicada para el análisis de dureza de aceros y fundiciones blancas, que se caracteriza por:

- *Carga*: 150 Kp
- *Penetrador*: forma cónica con ángulo de 120° y punta de diamante de 0,2 mm de radio.

Por otro lado, las probetas utilizadas para realizar las medidas han de poseer una superficie plana y limpia de óxidos e impurezas, de manera que el penetrador se disponga perpendicularmente a la superficie.

Se ha utilizado para ello un durómetro Rockwell analógico y manual (Figura 1), habiéndose seguido los siguientes pasos en la realización de las medidas:

1. Aplicación de la precarga de 10 Kp: es la posición de referencia donde el penetrador a profundizado en la superficie de la pieza para reducir los efectos derivados del acabado superficial de la misma y eliminar la deformación elástica.
2. Aplicación de la carga de 150 Kp durante un tiempo de 20 segundos.
3. Retirada de la carga, manteniendo la precarga inicial.
4. Lectura analógica de la medida de la dureza del material.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

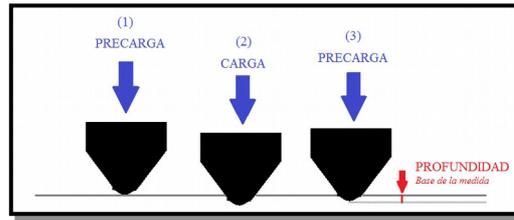


Figura 2: Fundamento de la medida de la dureza Rockwell

Luego a una mayor penetración, menor será el valor de HR y por tanto más blando será el material. En nuestro caso, el durómetro ofrece una medida directa de la dureza del material.

3.3 ENSAYO DE DESGASTE "PIN ON DISK"

Según la norma ASTM G40-05, se define como "desgaste" el daño que se produce en una superficie sólida, generalmente con la pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre la superficie y otra sustancia o sustancias en contacto con ella. La resistencia a desgaste de un material es un aspecto muy importante a tener en cuenta en la elección y selección del mismo para un determinado uso en la industria, ya que condiciona su vida útil y, por ende, su rendimiento económico.

Como condicionantes de la resistencia a desgaste de un material se tienen:

- La dureza, composición química y acabado superficial de los cuerpos que friccionan.
- La presencia de cuerpos extraños, tales como óxidos, impurezas, etc.
- Las condiciones de trabajo, como por ejemplo, velocidad, carga aplicada.

Luego entonces, actuando sobre estos parámetros el desgaste puede ser reducido, aunque nunca eliminado por completo.

El ensayo elegido para comparar la resistencia a desgaste de los metales de estudio ha sido el método "PIN ON DISK". Dicho ensayo se ha llevado a cabo en un tribómetro de la marca Microtest, modelo MT/30/SCM/T (Figura 3), conectado a un ordenador encargado de recoger y procesar los datos del análisis.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO



Figura 3: Tribómetro de la marca Microtest, modelo MT/30/SCM/T.

El ensayo consiste en poner en contacto una probeta cilíndrica (PIN) verticalmente sobre un disco (DISK), el cual se hace girar mediante un servomotor a una velocidad controlada. El PIN está dispuesto a una distancia "r" del centro del disco, lo cual hará que describa una trayectoria circular con ese mismo radio sobre el mismo. Esto se consigue mediante un brazo conector sobre el cual se aplica directamente la carga y que está conectado con un sensor que permite registrar la fuerza de rozamiento a lo largo del ensayo, y por tanto obtener el coeficiente de fricción.

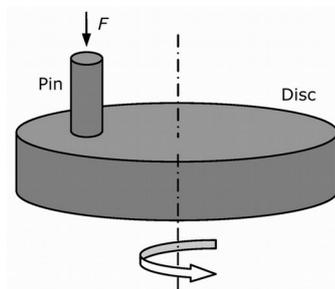


Figura 4: Esquema de funcionamiento del Tribómetro.

En el presente proyecto se han ensayado probetas, tanto de acero como de ambas fundiciones blancas, de radio 15 mm. El PIN cilíndrico utilizado será invariante en todos los ensayos, compuesto de acero y con un diámetro de 4 mm.

Luego entonces, los parámetros de ensayo invariantes para los tres tipos de material son:

- PIN: fragmento cilíndrico de acero de 4 mm de diámetro con dureza 48 HRC.
- Carga: 25 N
- Velocidad de giro del DISK: 180 rpm
- Radio: 15 milímetros
- Intervalos de medición: 1 kilómetro de distancia recorrida.
- Distancia recorrida total en el ensayo: 10 kilómetros

Este ensayo se valorará atendiendo a la pérdida del peso del PIN a lo largo de los 10 kilómetros recorridos durante el mismo. Por otro lado, también se tendrá en cuenta la pérdida de peso de la probeta al término de los 10 kilómetros.

Se traduce pues, que una mayor pérdida de peso del PIN representa una mayor resistencia a desgaste por parte de la probeta. Así mismo, una alta pérdida de peso por parte de la probeta se traduce en una mala resistencia a desgaste. Se deriva entonces de lo anterior que ha de buscarse un equilibrio entre ambos factores con el fin de encontrar un comportamiento ideal ante el desgaste. Así pues, con la intención de valorar todos los parámetros concernientes a cada material, se llevará a cabo un análisis atributivo en el que se asignará la importancia precisa tanto la variación del peso del PIN como a la variación de peso de la probeta.

3.4 MICROSCOPIA

Con la intención de examinar los constituyentes microestructurales tanto del acero como de ambas fundiciones blancas se llevan a cabo ensayos metalográficos utilizando la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido.

3.4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para poder analizar microestructuralmente los materiales objeto de estudio es necesario preparar adecuadamente las probetas. La superficie metálica a observar debe ser plana y estar correctamente pulida y atacada, lo cual resulta indispensable para conseguir un correcto enfoque por parte de los equipos de microscopía.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

En este trabajo se llevaron a cabo los siguientes pasos en la preparación de muestras:

CORTE

Debido al excesivo tamaño de las muestras ha resultado necesario el corte de las mismas en fragmentos de tamaño adecuado para poder llevar a cabo su posterior embutición.

En el caso de las fundiciones, para este proceso se utilizó la tronzadora de disco del laboratorio del Campus de Gijón, de marca Buelher, modelo Abrasimet 2 (*Figura 5*), con disco de carburo de silicio.



Figura 5: Tronzadora de disco, marca Buelher, modelo Abrasimet 2.

La muestra se coloca y se asegura en la posición adecuada con la ayuda de unas mordazas. El corte es producido por el disco a medida que éste descende a través de la pieza, regándose simultáneamente la zona con refrigerante (taladrina), lo que impide el calentamiento excesivo de la misma.

Para el caso del acero, el corte y mecanizado de las probetas se lleva a cabo en talleres externos a la Universidad mediante corte con hilo.

EMBUTIDO

Una vez obtenidas las probetas con una dimensión adecuada, se embuten en una embutidora marca Buelher, modelo SimpliMet 1000 (*Figura 6*), utilizando para ello resina Buelher Epomet Molding Compound. Es un dispositivo completamente automático, de manera que se introduce en la cámara de embutido la probeta con la resina y, por acción de presión y temperatura, ésta solidifica obteniéndose una probeta cilíndrica apta para su manipulación en microscopía.



Figura 6: Embutidora marca Buelher, modelo SimpliMet 1000.

DESBASTE Y PULIDO

Con la intención de preparar la superficie de las probetas de manera adecuada, se desbastean y pulen con la ayuda de la pulidora automática marca LSA, modelo Remet (Figura 7).



Figura 7: Pulidora automática marca LSA, modelo Remet.

Las probetas se encajan y aseguran mediante tornillos al soporte, el cual se conecta a un sistema de aire comprimido que hace que éste presione sobre un plato magnético en el que se colocan las diferentes lijas y paños. El plato y el soporte giran en sentidos opuestos para favorecer el rozamiento entre superficies. En la primera etapa se lleva a cabo el desbaste con las lijas de 180 y después con las de 1200, siempre con riego de agua para lubricar y arrastrar las partículas que se desprenden durante el proceso. Tras este lijado se limpian las probetas y se pasa al pulido, comenzando por el pulido grueso, utilizando para ello pasta de diamante de 6 μm . La última etapa consta de un pulido fino con pasta de diamante de 1 μm . Los paños utilizados durante el pulido se han lubricado con aceite.

Al término de este proceso, se consiguen probetas con superficie prácticamente especular, no válidas aún para su examen a microscopio.

ATAQUE

Una vez las probetas poseen una superficie especular, se limpian minuciosamente y se las somete a un ataque químico. En nuestro caso se escoge como agente reactivo una disolución de Nital al 2%. Este reactivo actúa de manera selectiva sobre la microestructura revelando fases, juntas de grano, rechupes, impurezas, etc. La manera de proceder es sencilla: se deposita un poco de reactivo en un pequeño recipiente de plástico y la probeta se pone en contacto con el mismo durante unos segundos. Después se sumerge en agua corriente para detener la reacción y se observa el grado de ataque al microscopio. El proceso debe repetirse el número de veces que se requiera para conseguir el nivel de ataque idóneo.

3.4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

El microscopio óptico permite estudiar la microestructura de los metales, pudiendo discernir sus fases constituyentes, así como deducir los tratamientos térmicos y procesos de fabricación a los que han sido sometidos previamente. El microscopio óptico utilizado para analizar las probetas en el presente proyecto fue un NIKON "Epiphot 200", con un ocular x10 y objetivos x5, x10, x20, x50, y x100, conectado a un ordenador en el que está instalado un software analizador de imagen OMNIMET-ENTERPRISE. Este programa informático permite visualizar las imágenes obtenidas por el microscopio y analizarlas mediante la adecuada aplicación de "rutinas". En nuestro caso se aplicará una "rutina" que revelará la proporción de área que pertenece a la fase de carburos que posean las fundiciones blancas.

Para asegurar un resultado representativo, se llevarán a cabo 10 mediciones para cada imagen a x20, sometiéndolas después a un estudio estadístico que revele un valor promedio para cada muestra. El estudio estadístico consiste en un análisis univariante llevado a cabo en el programa Microsoft Office Excel 2007.

3.4.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El microscopio electrónico de barrido basa su funcionamiento en acelerar un haz de electrones a un potencial de hasta 30kV, entre un cátodo y un ánodo hueco colimados, y dirigirlo hacia la muestra. La imagen resultante se obtiene gracias a los fenómenos ópticos como refracción, difracción, reflexión, etc., siendo los electrones retrodispersados o secundarios los responsables de la composición de la imagen. En nuestro caso el microscopio electrónico de barrido utilizado fue un JEOL JSM 5600 (Figura 8).



Figura 8: Microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM-5600.

Este tipo de microscopía se utiliza para analizar la composición química de la muestra, tanto cualitativa como cuantitativamente. Como resultado, ofrece además fotografías de la microestructura de la muestra a mayores aumentos de los que puedan alcanzarse en la microscopía óptica. El análisis químico consiste en un espectro elemental de la muestra, que representa los elementos mayoritarios y minoritarios en función de la magnitud de los "picos" del mismo. Para poder observar estos resultados a simple vista, se realiza un "mapping" de la muestra, que consiste en asignar un color a cada elemento representativo, de manera que las zonas ricas en cada elemento quedarán resaltadas, creando así una imagen con un "mapa" de concentraciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DUREZA

La dureza del material es un parámetro muy importante si tenemos en cuenta que, para este trabajo, se valora su validez como revestimiento de prensas uniaxiales. Es por ello, que se llevan a cabo ensayos de dureza Rockwell tanto en el acero utilizado actualmente como blindaje, como en los dos tipos de fundición blanca con las que se pretende comparar.

En todos los casos, se llevan a cabo 10 mediciones en una probeta con forma de paralelepípedo de dimensiones 28x15x15 mm. Se tomará como resultado final representativo la media de éstos valores.

Para el caso del acero, tenemos un valor de dureza de 60,5 HRC.

Para el caso de las fundiciones blancas, se ha procedido de la misma forma, obteniéndose los siguientes resultados:

<i>FED 18</i>		<i>FED 25</i>	
TRAT. TERMICO	HRC	TRAT. TERMICO	HRC
BRUTO DE MOLDEO	64	BRUTO DE MOLDEO	62
TRAS TRAT.ABLANDAMIENTO	32	TRAS TRAT. ABLANDAMIENTO	38
TRAS TEMPLE	63	TRAS TEMPLE	59
TRAS REVENIDO 1	60	TRAS REVENIDO 1	55
TRAS REVENIDO 2	62	TRAS REVENIDO 2	50

Tabla 3: Dureza Rockwell C de FED18 y FED25 tras los sucesivos tratamientos térmicos.

Para el caso particular de las fundiciones se miden las durezas a medida que se van sometiendo las probetas a los diferentes tratamientos térmicos. Se aprecian variaciones considerables en el valor de la dureza para ambas, lo cual indica que probablemente ha existido un cambio en su microestructura. En el siguiente gráfico se representa la evolución de los valores de dureza Rockwell para las fundiciones.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

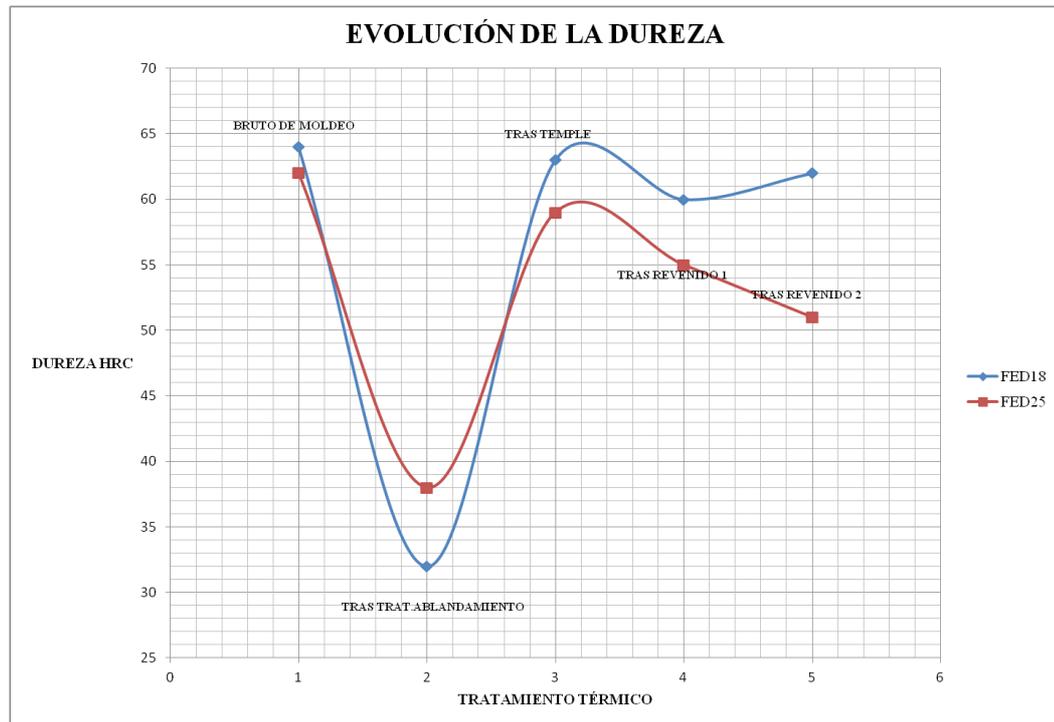


Figura 9: Evolución de la Dureza Rockwell C de FED18 y FED25.

En la gráfica anterior se aprecia cómo tras el tratamiento de ablandamiento, las durezas de ambas fundiciones evolucionan de manera similar con la aplicación de los tratamientos térmicos. Sin embargo, la fundición blanca FED18 toma valores mayores que la fundición FED25 tras el temple y tras cada uno de los revenidos, aun partiendo de un valor menor de dureza conseguido con el tratamiento de ablandamiento.

Así mismo, la fundición blanca FED18 arroja mejores resultados que el acero tras haberle aplicados los tratamientos térmicos. Luego entonces, puede concluirse que el material con mejores cualidades en cuanto a dureza es la fundición blanca FED 18 tras temple, y tras temple y dos revenidos.

4.2 ENSAYO DE DESGASTE "PIN ON DISK"

Como medida de los resultados del ensayo PIN ON DISK, se recogen los datos de las pesadas del PIN al cabo de cada kilómetro recorrido en la máquina de tribología. Este ensayo se ha realizado para las siguientes muestras:

- Acero
- Fundición blanca FED 18 tras temple
- Fundición blanca FED 25 tras temple
- Fundición blanca FED 18 tras temple y dos revenidos

Comenzamos con los resultados arrojados en el ensayo del acero:

DISTANCIA (Km)	PESO PIN (g)
0	7,0261
1	7,0253
2	7,0244
3	7,0242
4	7,0237
5	7,0227
6	7,0205
7	7,0161
8	7,0143
9	7,0111
10	7,0082

Tabla 4: Resultados del ensayo de desgaste "PIN ON DISK" para el acero.

Para el caso de las fundiciones, tal y como se ha descrito anteriormente se han ensayado para distintos estados. Se han hecho ensayos tras la aplicación de un tratamiento de temple a 1000°C durante 4 horas, recogiendo los siguientes resultados tanto para la FED25 como para la FED18.

DISTANCIA (Km)	PESO PIN (g)
0	7,0092
1	7,0038
2	6,9964
3	6,9902
4	6,9851
5	6,9800
6	6,9749
7	6,9700
8	6,9649
9	6,9590
10	6,9542

Tabla 5: Resultados del ensayo de desgaste "PIN ON DISK" para la FED18 tras temple.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

DISTANCIA (Km)	PESO PIN (g)
0	6,9542
1	6,9506
2	6,9463
3	6,9426
4	6,9378
5	6,9339
6	6,9299
7	6,9259
8	6,9220
9	6,9179
10	6,9139

Tabla 6: Resultados del ensayo de desgaste "PIN ON DISK" para la FED25 tras temple.

Así mismo, se lleva a cabo un ensayo sobre una probeta de FED18 tras un tratamiento de temple a 1000°C durante 4 horas y dos revenidos a 500°C durante 6 horas.

DISTANCIA (Km)	PESO PIN (g)
0	6,922
1	6,9172
2	6,9114
3	6,9061
4	6,9008
5	6,8969
6	6,8936
7	6,8903
8	6,8864
9	6,8821
10	6,8788

Tabla 7: Resultados del ensayo de desgaste "PIN ON DISK" para la FED18 tras temple y dos revenidos.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos se obtienen las variaciones de peso del PIN en cada caso y se calculan las pérdidas de peso "acumuladas".

**OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO**

PESOS ACUMULADOS(g)				
KM	ACERO	FED18 TRAS TEMPLE	FED25 TRAS TEMPLE	FED 18 TRAS TEMPLE Y DOS REVENIDOS
1	0,0049	0,0054	0,0036	0,0048
2	0,0093	0,0128	0,0078	0,0106
3	0,0133	0,019	0,0115	0,0159
4	0,0173	0,0241	0,0163	0,0212
5	0,0211	0,0292	0,0202	0,0251
6	0,0244	0,0343	0,0242	0,0284
7	0,0263	0,0392	0,0282	0,0317
8	0,0295	0,0443	0,0321	0,0356
9	0,0327	0,0502	0,0361	0,0399
10	0,0359	0,055	0,0401	0,0432

Tabla 8: Pérdidas de peso acumuladas del PIN en el ensayo "PIN ON DISK".

Para examinar los resultados presentados en la Tabla 8, se construye una gráfica que compara las pérdidas de peso acumuladas del PIN a lo largo de los 10 kilómetros de ensayo para los cuatro casos planteados. Aparecen también los coeficientes de rozamiento para cada uno de los ensayos.

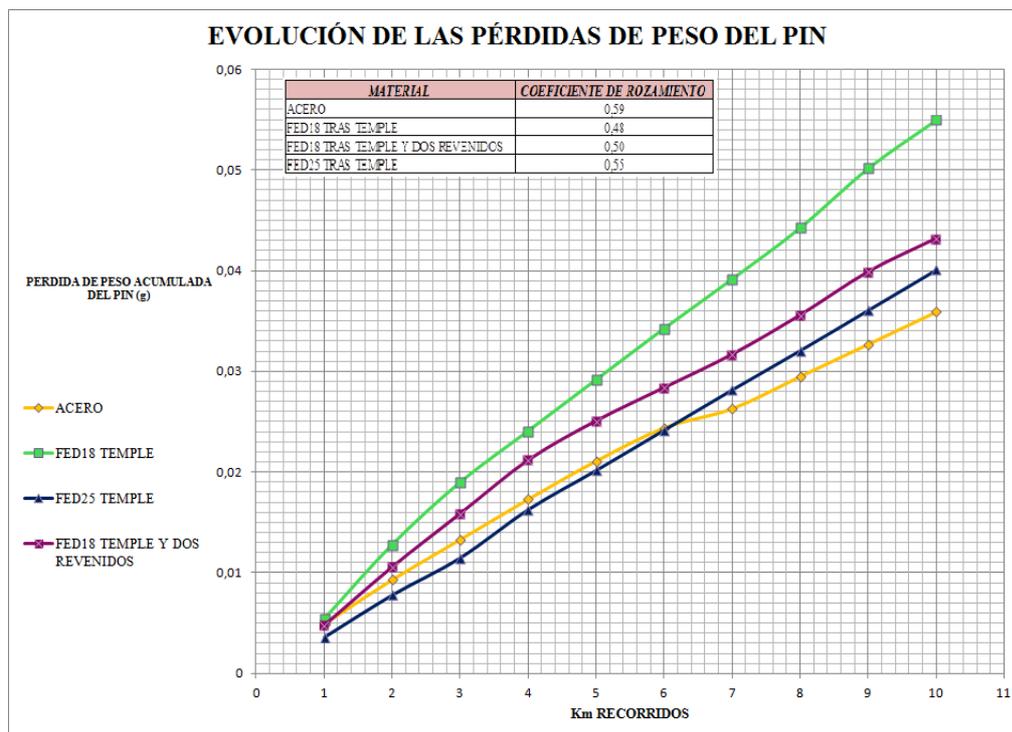


Figura 10: Gráfico comparativo de los resultados del ensayo de desgaste "PIN ON DISK".

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Por otra parte, han de considerarse las variaciones de peso que sufren las probetas tras los 10 km de ensayo, las cuales se detallan en la siguiente tabla.

MATERIAL	VARIACIÓN DEL PESO DE LAS PROBETAS(g)
ACERO	0,0079
FED18 TEMPLE	0,0128
FED18 TEMPLE Y DOS REVENIDOS	0,0080
FED25 TEMPLE	0,0099

Tabla 9: Pérdidas de peso en las probetas del ensayo de desgaste "PIN ON DISK".

En la gráfica siguiente, se representan las pérdidas de peso para los cuatro casos ensayados.

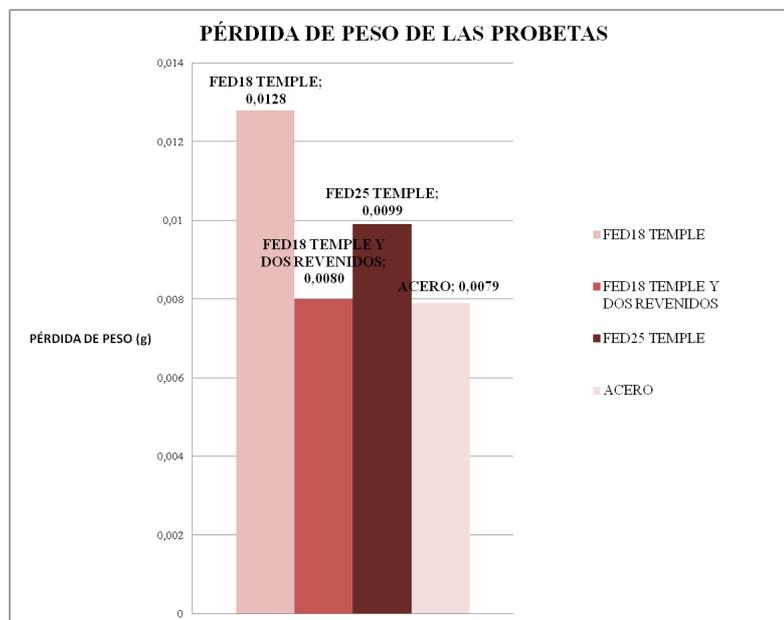


Figura 11: Gráfico comparativo de las pérdidas de peso de las probetas del ensayo de desgaste "PIN ON DISK".

Tanto la pérdida de peso del PIN como la pérdida de peso de la probeta son parámetros a tener en cuenta en la elección del material. La situación más favorable sería una mínima pérdida de peso en la probeta y una máxima pérdida de peso en el PIN. Sin embargo, dada la utilidad que se pretenda dar al material, lo más conveniente sería una mínima pérdida de peso en la probeta, ya que conllevaría la minimización del desgaste a lo largo de su vida útil.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Por ello, con la pretensión de equilibrar ambos factores se realiza un análisis atributivo que combine ambos parámetros de manera que se le asigna un factor del 40% a la pérdida de peso del PIN y un factor del 60% a la pérdida de peso de la probeta.

$$Q_i = \left[0,60 \cdot \frac{P_{min}}{P_i} + 0,40 \cdot \frac{p_i}{p_{max}} \right]$$

Ecuación 8: Análisis atributivo.

siendo:

p: pérdida de peso del PIN

P: pérdida de peso de la probeta

Aplicando la fórmula anterior se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 10.

	PÉRDIDA DE PESO DE LA PROBETA	PERDIDA DE PESO DEL PIN	<i>Q_i</i>
ACERO	0,0079	0,0359	0,86
FED18 TRAS TEMPLE	0,0128	0,055	0,77
FED18 TRAS TEMPLE Y DOS REVENIDOS	0,0080	0,04332	0,91
FED25 TRAS TEMPLE	0,0099	0,0401	0,77

Tabla 10: Resultados del análisis atributivo

En esta tabla, queda patente como el material que mejores resultados obtiene en cuanto a la combinación de ambos factores es la fundición blanca FED18 tras temple y dos revenidos.

4.3 MICROSCOPIA

4.3.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

Durante el análisis en el microscopio óptico, se tomaron imágenes de las microestructuras de los diferentes materiales objeto de estudio con la intención de observar las diferencias entre los mismos a nivel microscópico.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Para el caso del **acero** se obtuvieron las siguientes imágenes:

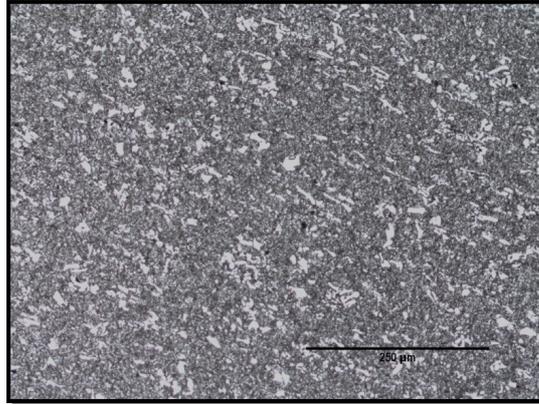


Figura 12: Acero x20.

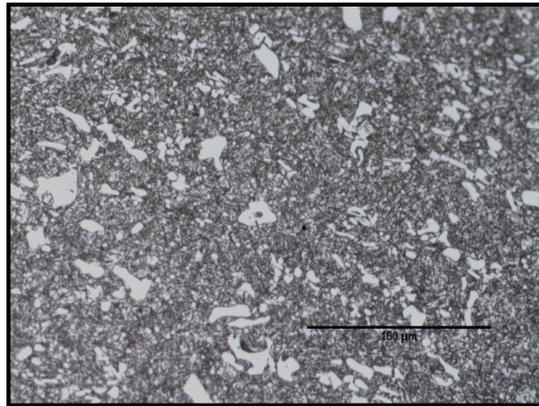


Figura 13: Acero x50.

La solidificación de este tipo de aceros para herramientas da lugar a una matriz eutéctica de austenita y carburos primarios. En las Figuras 12 y 13, pueden observarse carburos uniformemente distribuidos resultado de haber sufrido una forja de desbaste a muy alta temperatura, con el objetivo de mejorar la tenacidad. Este proceso dispersa los carburos ledeburíticos, comenzando con pequeños golpes para trocear la matriz ledeburítica y prosiguiendo después con mayores deformaciones. En la Figura 13 se observa que los carburos están embebidos en una matriz martensítica, consecuencia de la aplicación de un tratamiento térmico de temple. Es probable que haya sido sometido a uno o varios revenidos, con el objetivo de eliminar la austenita residual tras el temple, lo cual justificaría el valor de dureza de 60,5 HRC, menor que la obtenida tras el temple en este tipo de aceros.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

En el caso de las fundiciones FED18 y FED25 se tomaron imágenes para los siguientes estados:

- Tras el tratamiento térmico de ablandamiento
- Tras el tratamiento térmico de temple
- Tras el primer tratamiento térmico de revenido
- Tras el segundo tratamiento térmico de revenido

Las imágenes capturadas en el caso de la **fundición blanca FED18** son las siguientes:

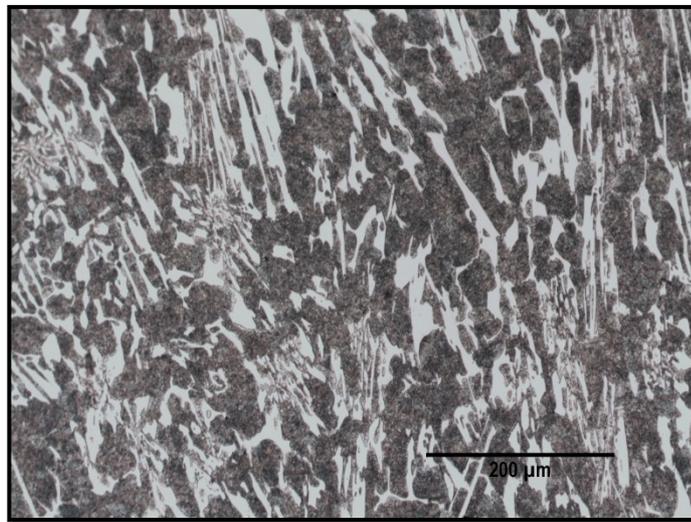


Figura 14: Fundición blanca FED18 tras tratamiento térmico de ablandamiento x20.

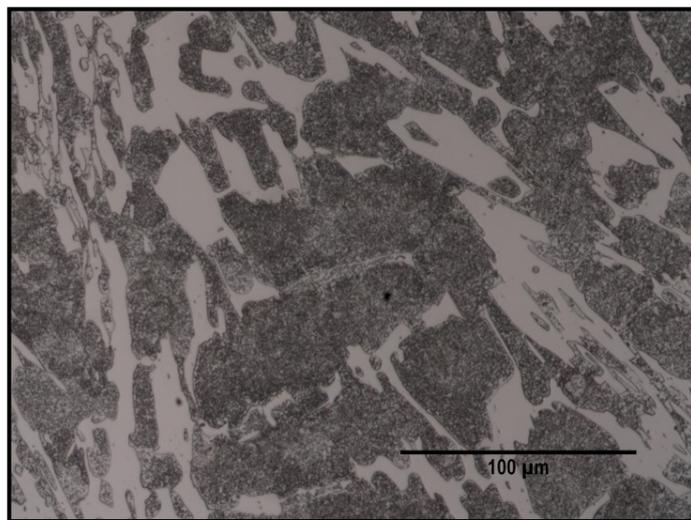


Figura 15: Fundición blanca FED18 tras tratamiento térmico de ablandamiento x50.

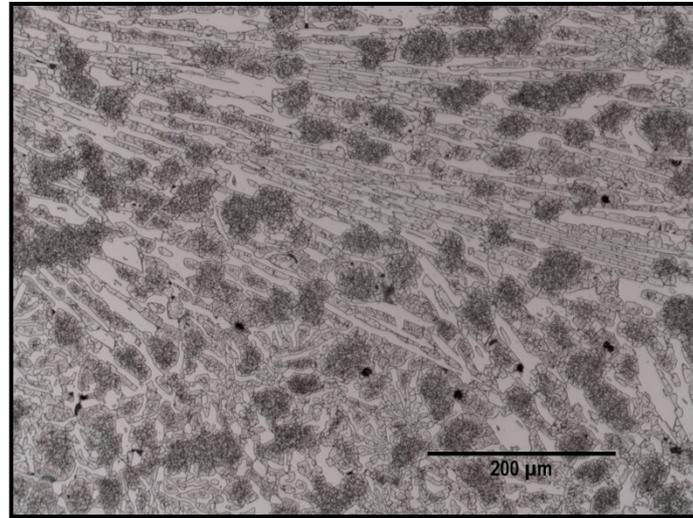


Figura 16: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple x20.

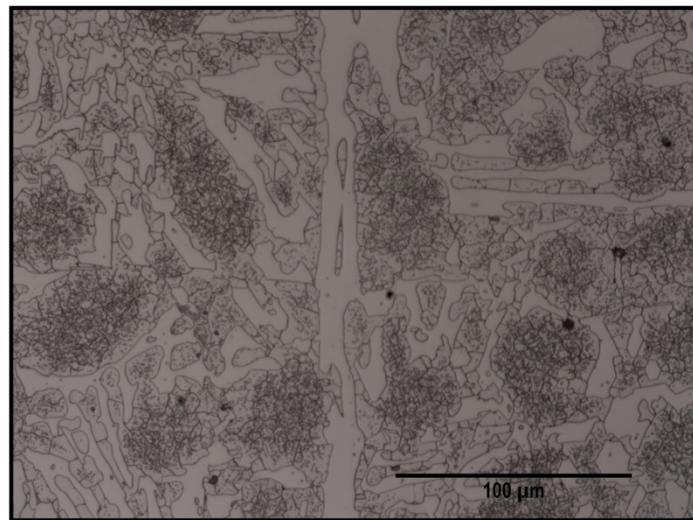


Figura 17: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple x50.

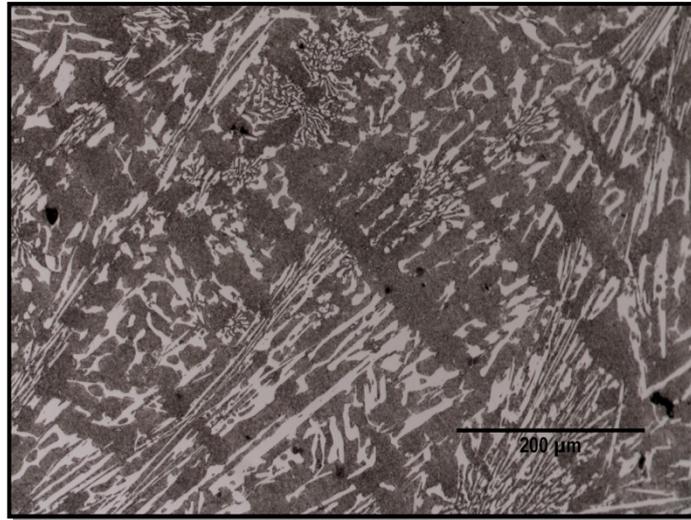


Figura 18: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple y un revenido x20.

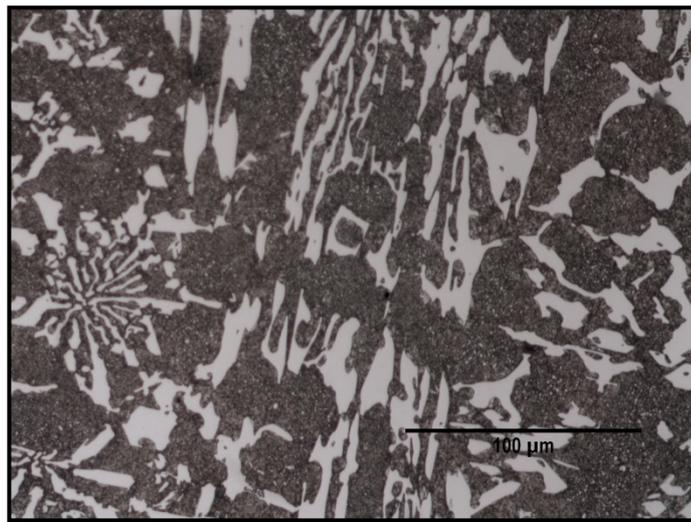


Figura 19: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple y un revenido x50.

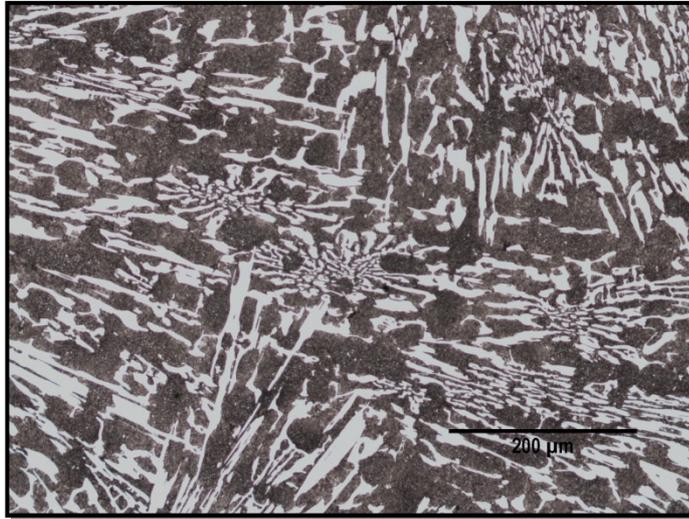


Figura 20: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple y dos revenidos x20.

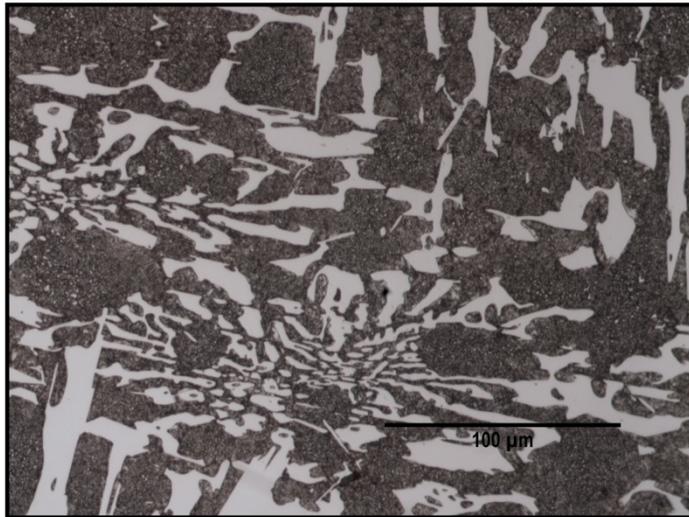


Figura 21: Fundición blanca FED18 tras tratamiento de temple y dos revenidos x50.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Las imágenes capturadas en el caso de la **fundición blanca FED25** son las siguientes:

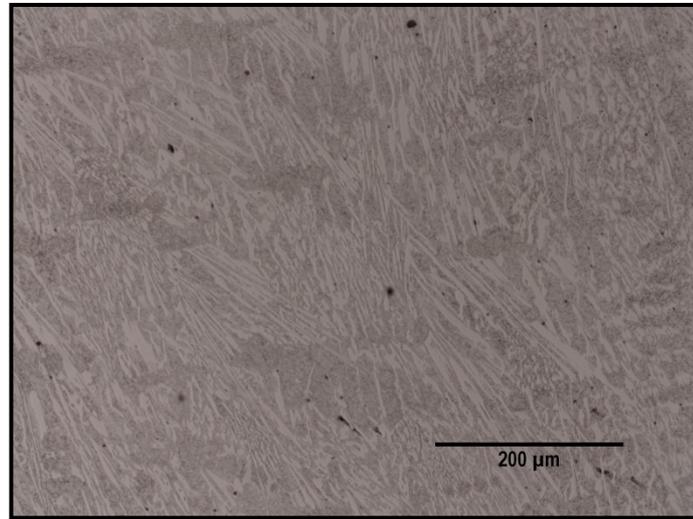


Figura 22: Fundición blanca FED25 tras tratamiento térmico de ablandamiento x20.

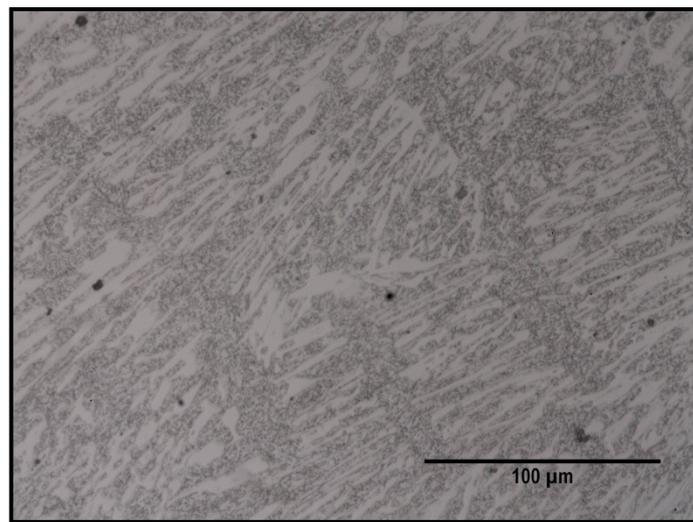


Figura 23: Fundición blanca FED25 tras tratamiento térmico de ablandamiento x50.

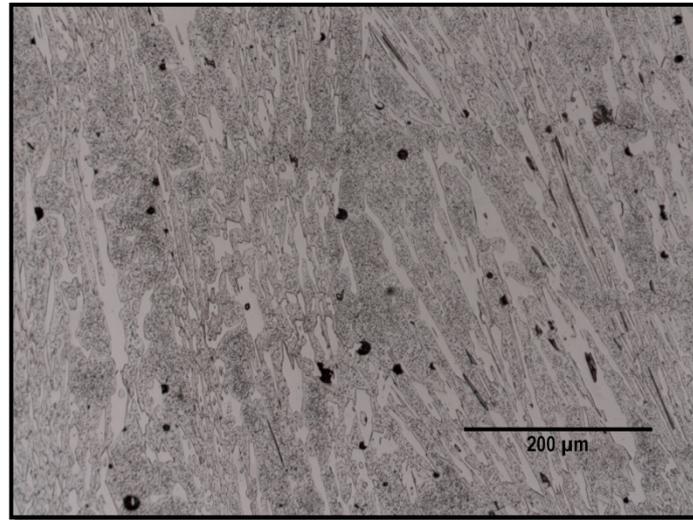


Figura 24: Fundición blanca FED25 tras tratamiento de temple x20.

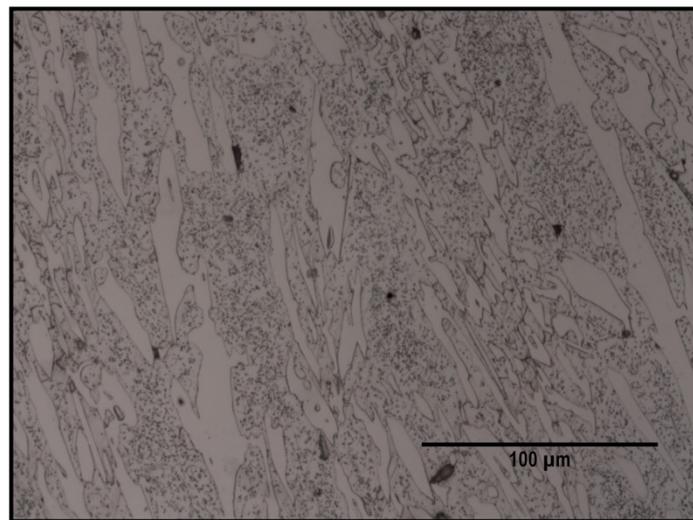


Figura 25: Fundición blanca FED25 tras tratamiento de temple x50.

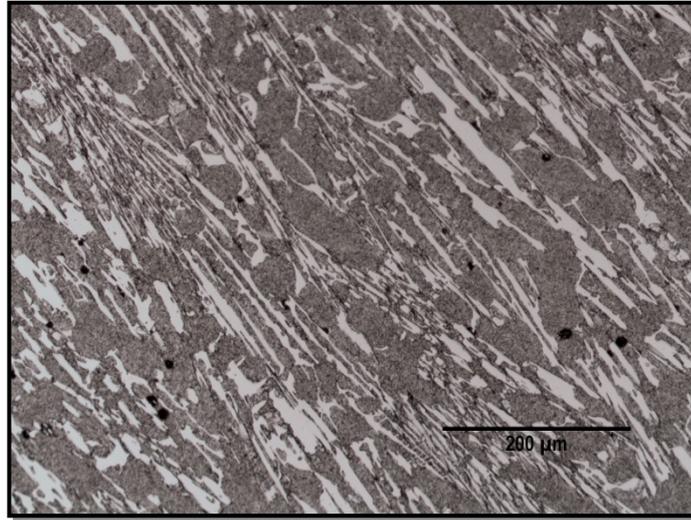


Figura 26: Fundición blanca FED25 tras temple y un revenido x20.

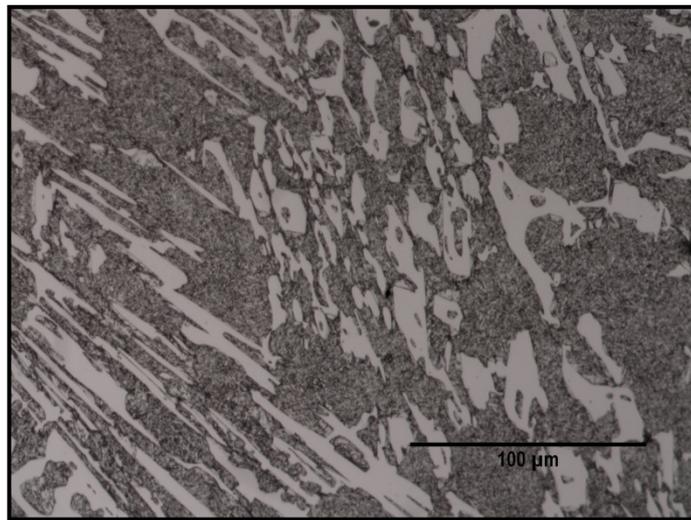


Figura 27: Fundición blanca FED25 tras temple y un revenido x50

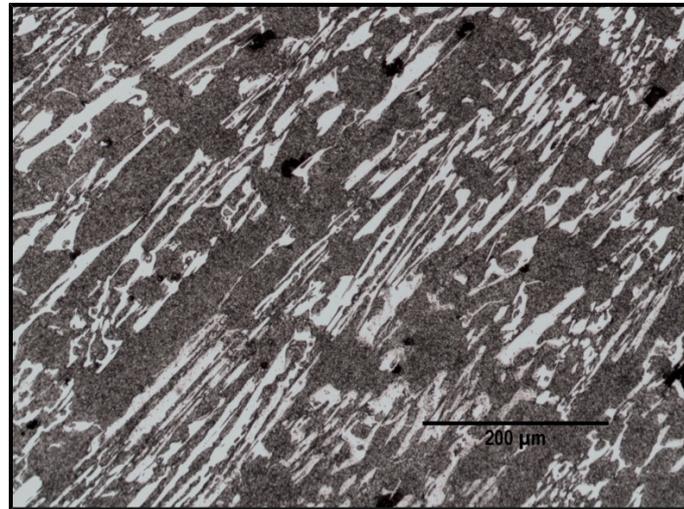


Figura 28: Fundición blanca FED25 tras temple y dos revenidos x20.

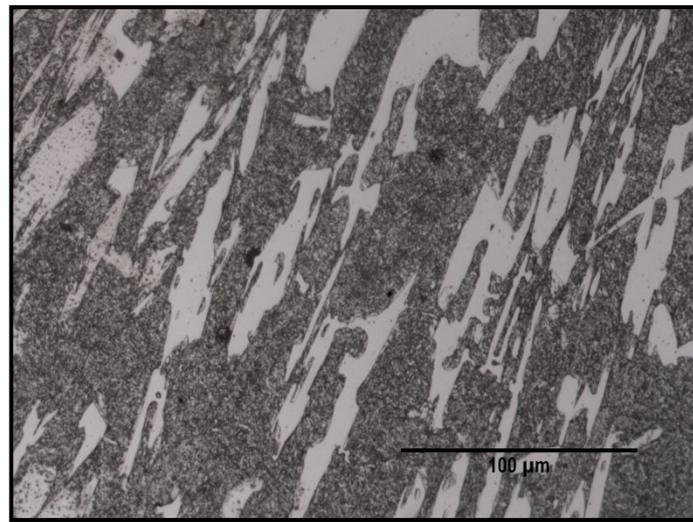


Figura 29: Fundición blanca FED25 tras temple y dos revenidos x50

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

En las Figuras 15 y 23 se observa que tras ser sometidas a tratamiento térmico de ablandamiento ambas presentan una fase blanca como constituyente disperso formada por carburos de cromo. El constituyente matriz es la fase más oscura, formada por perlita, obtenida gracias a la transformación de la austenita mediante un enfriamiento isotérmico a 700° durante 10 horas. Esto hace que la fundición se vuelva mecanizable al reducir su dureza debido a la transformación de la matriz.

Tras haber recibido el tratamiento de temple, ambas poseen un constituyente disperso formado por los carburos y una matriz que ha sido transformada parcialmente en martensita, existiendo aún austenita residual. En el temple se han reaustenizado las piezas a 1000°C durante 4 horas para así desestabilizar la austenita por precipitación de carburos. En el enfriamiento posterior esta austenita empobrecida en carbono y cromo se transforma en martensita.

En la Figura 17 que muestra la fundición FED18 tras el temple, se observa la matriz formada por martensita (procedente de la transformación de la austenita) y los carburos K_2 que aparecen como constituyente disperso de la eutéctica. Sin embargo en la Figura 25, que muestra la fundición FED25 tras el temple, aparecen carburos proeutéticos K_2 que se han formado al inicio de la solidificación, apresados en una matriz eutéctica constituida por martensita (procedente de la transformación de la austenita en el temple) y carburos de tipo también K_2 . Por ello es por lo que aparece un constituyente disperso de mayor tamaño en la fundición FED25, correspondiente a estos carburos primarios. Esta diferencia en la solidificación entre ambas fundiciones blancas es debida al grado de aleación que provoca que la FED18 por estar menos aleada se comporte como hipoeutéctica, al contrario que la FED25 que se clasificaría como hipereutéctica.

En ambas fundiciones los tratamientos de revenido tienen como objetivo la conversión de la austenita residual presente en la matriz en martensita, lo cual se aprecia en las micrografías de ambas fundiciones como una fase acicular oscura. Esta transformación implica el recrecimiento de los carburos eutécticos debido a que la austenita se empobrece en Carbono y Cromo al convertirse en martensita, precipitando estos elementos en forma de pequeños carburos de Cromo.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

FRACCIÓN DE ÁREA DE CARBUROS:

En todas las fotografías tomadas para las fundiciones en los diferentes estados de tratamiento térmico, se observa una fase blanca que se presume esté formada por carburos de Cromo y Hierro. Resulta de interés el cálculo de la proporción de área que pertenece a la fase de carburos en cada caso de estudio. Para ello, se aplica una "rutina" con el analizador de imagen a 20x, que nos facilita en porcentaje de área perteneciente a los carburos. Esto se calcula para ambas fundiciones blancas en cada uno de los estados de tratamiento térmico que se han descrito anteriormente. Se toman 10 medidas en zonas aleatorias de la probeta, obteniéndose los resultados presentes en las Tablas 11 y 12.

<i>FED 18 (20x)</i>				
MEDIDA	FED 18 TRAS ABLANDAMIENTO	FED18 TRAS TEMPLE	FED18 TRAS TEMPLE Y UNA REVENIDO	FED18 TRAS TEMPLE Y DOS REVENIDOS
1	27,83	24,89	30,63	31,76
2	27,08	30,96	32,35	30,29
3	28,46	32,57	28,26	30,72
4	29,02	30,08	29,7	31,43
5	28,15	30,03	31,26	32,03
6	26,49	27,22	31,78	30,87
7	27,27	28,6	33,97	29,65
8	26,43	25,72	36,18	30,3
9	27,27	25,08	29,06	30,88
10	27,2	27,04	29,37	30,57

Tabla 11: Porcentaje de carburos en fundición blanca FED18 (x20)

<i>FED 25 (20x)</i>				
MEDIDA	FED 18 TRAS ABLANDAMIENTO	FED18 TRAS TEMPLE	FED18 TRAS TEMPLE Y UNA REVENIDO	FED18 TRAS TEMPLE Y DOS REVENIDOS
1	24,6	25,41	27,76	30,85
2	29,34	24,32	25,51	30,81
3	28,41	23,69	25,5	30,14
4	30,45	25,13	25,83	30,95
5	34,84	24,25	26,1	31,29
6	32,44	29,27	25,87	30,42
7	32,51	23,46	24,73	31,82
8	28,67	24,81	27,12	31,51
9	31,21	22,22	25,65	30,84
10	31,8	23,47	25,29	30,57

Tabla 12: Porcentaje de carburos en fundición blanca FED25(x20)

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Con el objetivo de obtener valores representativos de estas fracciones de área, se realiza un estudio estadístico de los mismos. Los resultados del análisis estadístico llevado a cabo son representados en la gráfico de barras propuesto a continuación.

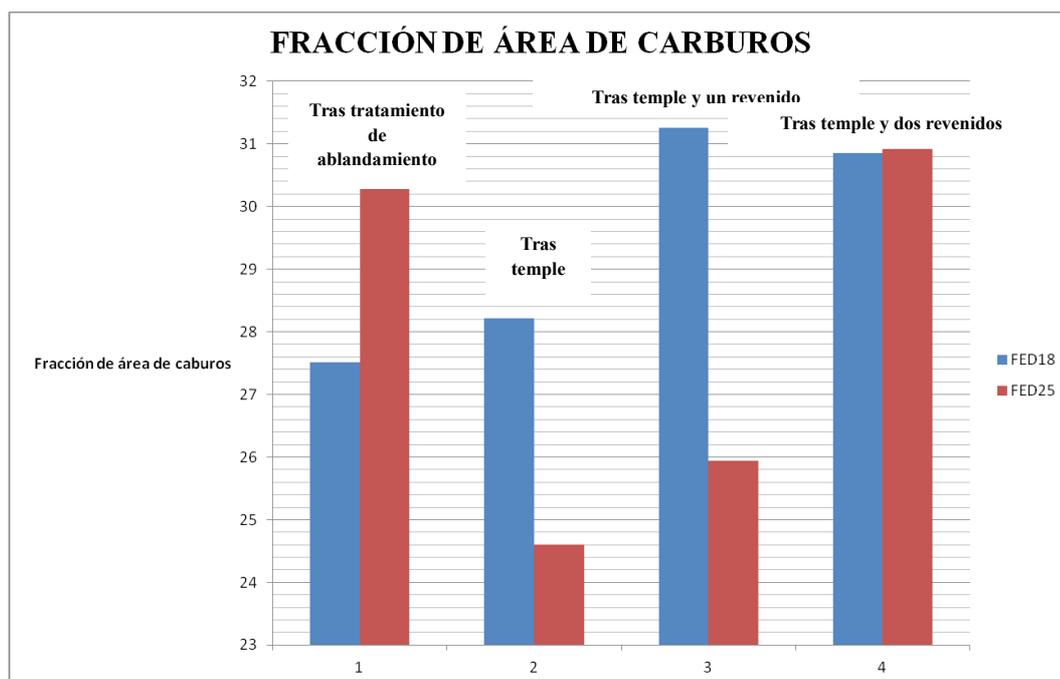


Figura 30: Estudio estadístico del porcentaje de carburos en las fundiciones blancas.

En el gráfico de la Figura 30 se advierte que para ambas fundiciones, la fracción de área de carburos va en aumento conforme se le van aplicando los tratamiento térmicos. Esto se debe a que la conversión de la austenita en martensita que se produce en ellos implica el empobrecimiento de la primera en Carbono y Cromo, los cuales precipitarán en forma de carburos. En general, se aprecia una mayor fracción de carburos en la fundición FED18 en comparación con la FED25, si bien tras temple y dos revenidos adquieren valores similares.

4.3.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

En el microscopio electrónico de barrido se analizan diferentes muestras con el fin de discernir la composición química de cada una de ellas tanto cualitativa como cuantitativamente. Se analizan mediante esta técnica las muestras que mejores resultados han arrojado en los ensayos de dureza y desgaste, las cuales son:

- Acero (material de partida)
- Fundición blanca FED 18 tras tratamiento de temple
- Fundición blanca FED 18 tras temple y dos revenidos
- Fundición blanca FED 25 tras tratamiento de temple
- Fundición blanca FED 25 tras temple y dos revenidos

Para llevar a cabo un correcto análisis de todas las muestras, se han tomado fotografías a diferentes aumentos y se han realizado análisis químicos de las diferentes fases presentes. Además, se ha hecho un "mapping" composicional, que presenta las fases ricas en Cromo en color verde y las fases ricas en Hierro de color rojo.

ACERO:

Primeramente, se analiza en acero utilizado actualmente como blindaje de los revestimientos de las prensas de compresión uniaxiales, tomándose las siguientes fotografías:

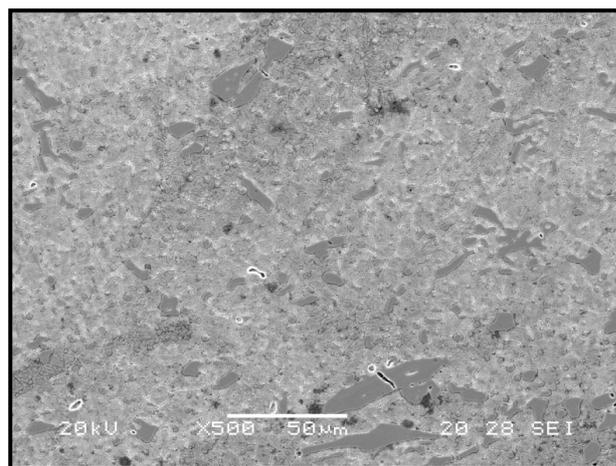


Figura 31: Acero x500.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

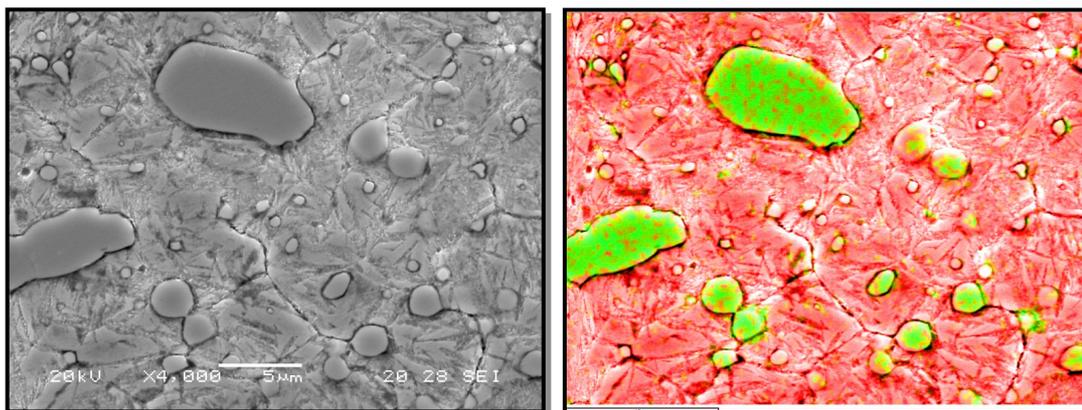


Figura 32: Acero x4.000

La solidificación de este tipo de aceros para herramientas da lugar a una matriz eutéctica de austenita y carburos primarios. En la Figura 32, pueden observarse carburos como constituyente disperso, embebidos en una matriz martensítica obtenida a partir de la austenita inicial mediante temple. En esta misma zona de la muestra se lleva a cabo un "mapping" químico para discernir las diferencias composicionales entre el constituyente disperso y la matriz. Aparecen en color verde los elementos más ricos en Cromo, es decir, los carburos, mientras que la fase de color rojo corresponde con la matriz, mucho más rica en Hierro.

Se analiza la composición química de los carburos, focalizando el haz de electrones sobre uno de ellos, obteniéndose los siguientes datos:

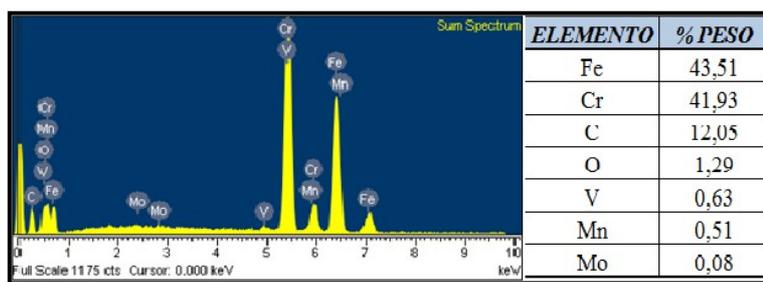


Figura 33: Análisis químico elemental de un carburo en el acero.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Se lleva a cabo la misma operación con la matriz:

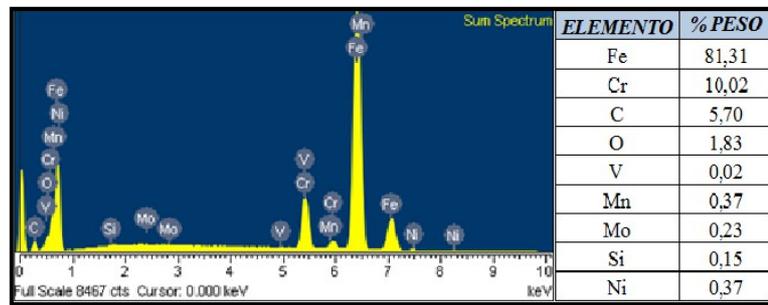


Figura 34: Análisis químico elemental de la matriz en el acero.

Los datos arrojados por el análisis químico elemental tanto de uno de los carburos como de la matriz corroboran las diferencias composicionales que había mostrado anteriormente el "mapping", siendo los carburos mucho más ricos en Cromo que la matriz y estando en cambio más empobrecidos en Hierro.

FUNDICIÓN BLANCA FED 18:

Para el caso de la fundición blanca FED 18 tras tratamiento térmico de temple, se procede de manera análoga al caso anterior, comenzando por la toma de fotografías.

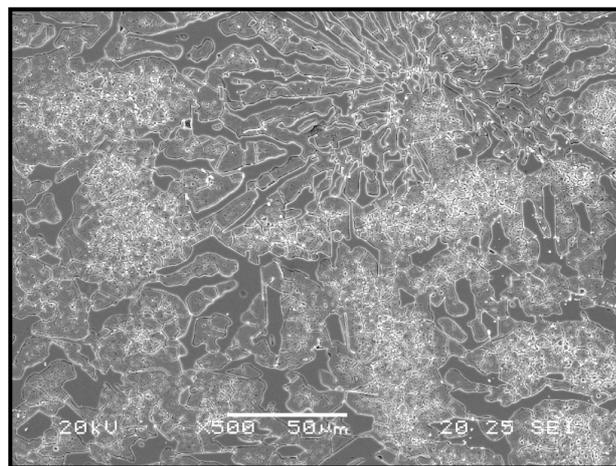


Figura 35: Fundición blanca FED18 tras tratamiento térmico temple x500

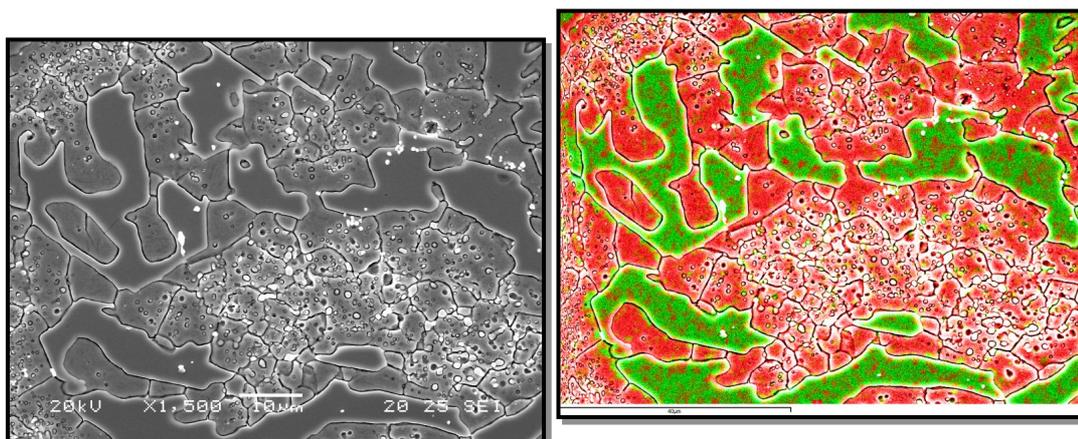


Figura 36: Fundición blanca FED18 tras tratamiento térmico temple $\times 1.500$

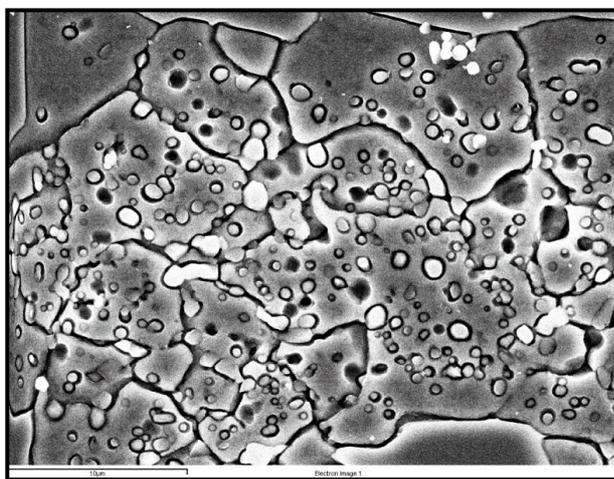


Figura 37: Fundición blanca FED18 tras tratamiento térmico temple $\times 4.000$

En las imágenes tomadas a diferentes aumentos podemos distinguir dos fases principales, un constituyente disperso formado por carburos y un constituyente matriz formado por martensita. En la instantánea tomada a $\times 4.000$ se aprecian una serie de precipitados contenidos en la matriz martensítica, provenientes de la transformación de austenita en martensita, que implica el empobrecimiento en Carbono y Cromo de la matriz.

Se realiza un "mapping" químico, obteniéndose el resultado que aparece en la Figura 36. Los precipitados aparecen en color verde debido a que presentan una proporción mucho más alta en cromo. Sin embargo, la fase matriz aparece de color rojo, ya que es mucho más rica en hierro. Al realizar un análisis químico elemental tanto en los carburos como en la matriz, se corroboran los resultados que muestra el "mapping". Los resultados del análisis se muestran en las Figuras 38 y 39.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

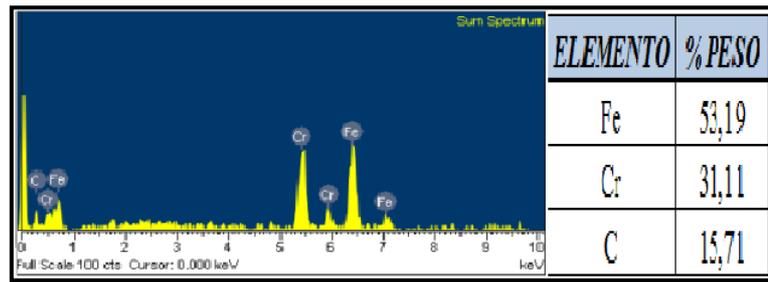


Figura 38: Análisis químico elemental de un carburo en la fundición FED18 tras temple

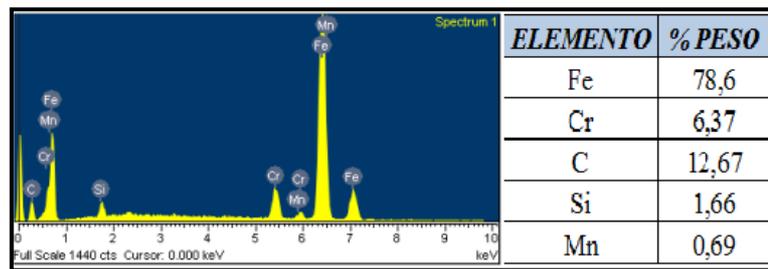


Figura 39: Análisis químico elemental de la matriz en la fundición FED18 tras temple.

Para el caso de la fundición blanca FED 18 tras temple y dos revenidos se comienza por la toma de fotografías.

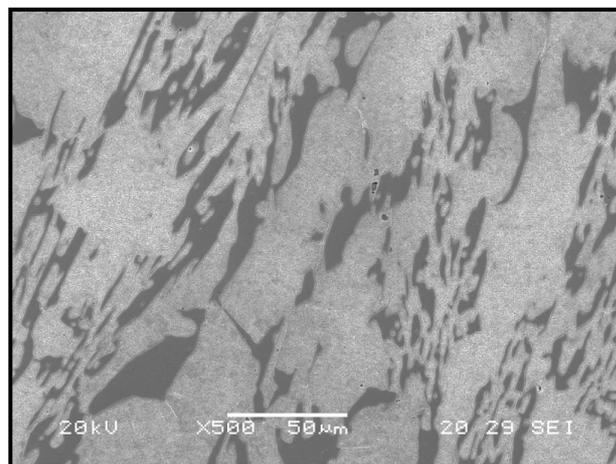


Figura 40: Fundición blanca FED18 tras temple y dos revenidos x50.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

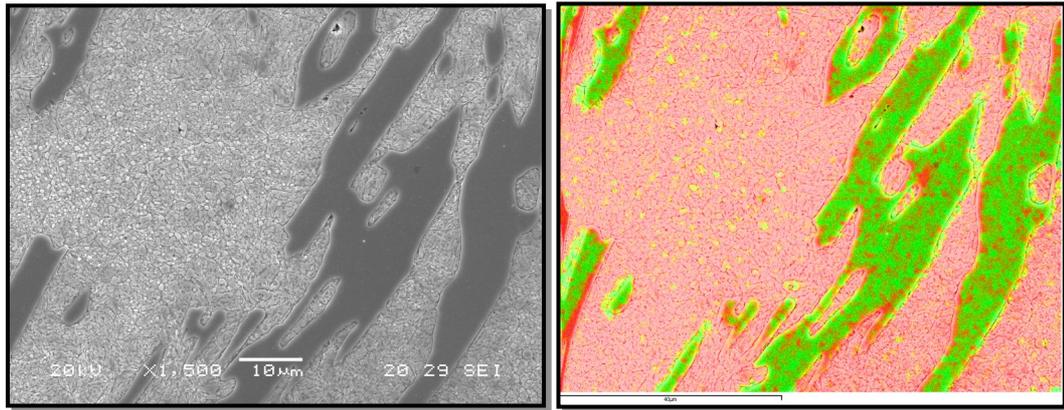


Figura 41: Fundición blanca FED18 tras temple y dos revenidos x1.500

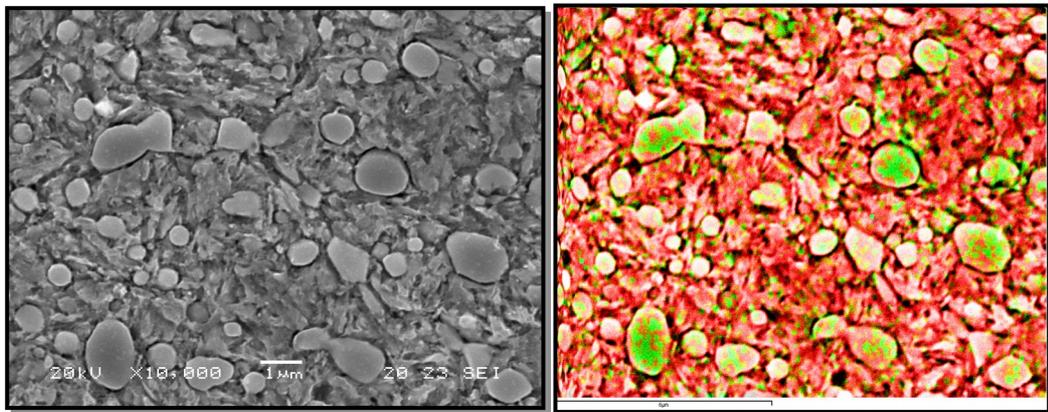


Figura 42: Fundición blanca FED18 tras temple y dos revenidos x10.000

En estas imágenes se observa que tras haber sido sometida a dos revenidos la fase matriz ha cambiado. La matriz se ha convertido casi totalmente en martensita, eliminándose en gran medida la austenita residual que pudiese estar presente tras el temple. En esta transformación se han generado carburos mucho más pequeños (Figura 42) embebidos dentro de la matriz.

Para averiguar las diferencias composicionales, se realizan dos "mappings", siguiendo el mismo patrón de colores que en el caso anterior. En la Figura 41 se aprecia una clara distinción, los precipitados que actúan como constituyente disperso son muy ricos en Cromo, sin embargo la matriz martensítica posee una mayor riqueza en hierro. Por otro lado, la Figura 42 muestra con más detalle la fase matriz, pudiendo advertirse la presencia de carburos de tamaño reducido pero altamente concentrados en cromo.

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

Tras el "mapping" se realiza un análisis químicos elemental, cuyos resultados se muestran a continuación.

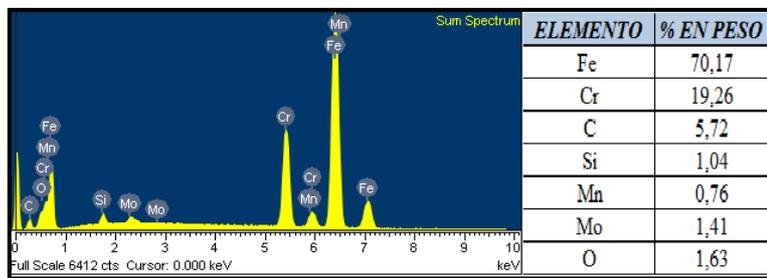


Figura 43: Análisis químico elemental general en la fundición FED18 tras temple y dos revenidos.

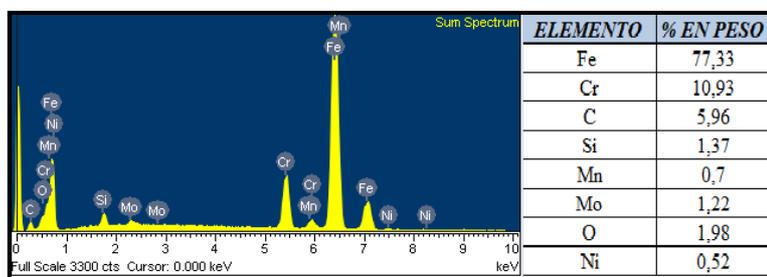


Figura 44: Análisis químico elemental de la matriz en la fundición FED18 tras temple y dos revenidos.

FUNDICIÓN BLANCA FED 25:

Para el caso de la fundición blanca FED 25 tras tratamiento térmico de temple, se procede de manera análoga al caso anterior, comenzando por la toma de fotografías.

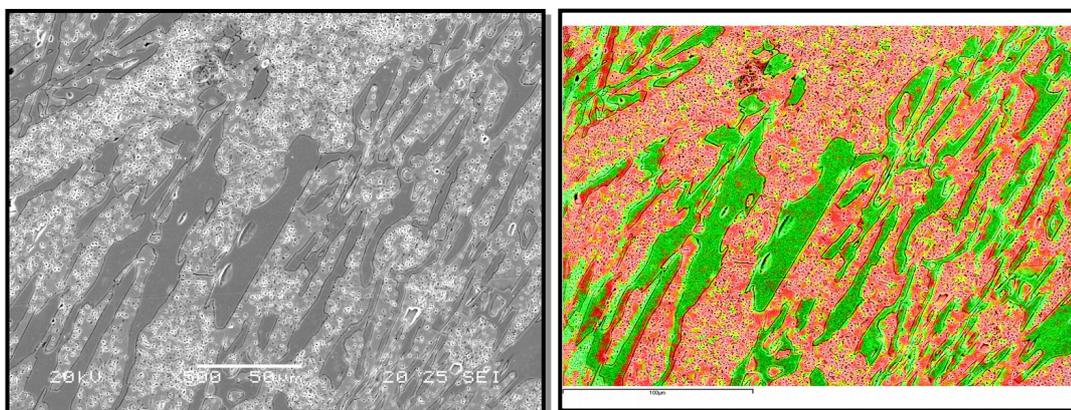


Figura 45: Fundición blanca

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

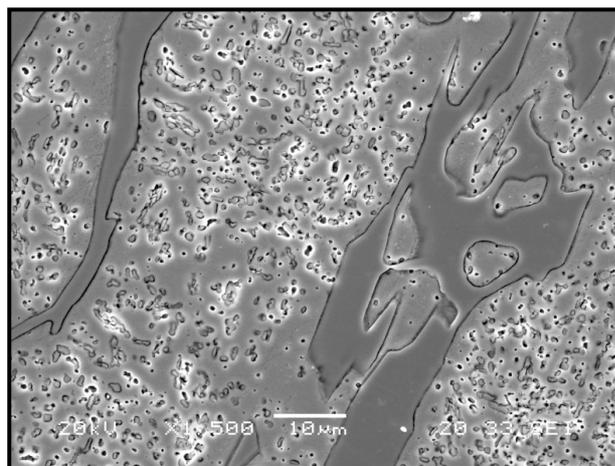


Figura 46: Fundición blanca FED25 tras temple x1.500

En el caso de la fundición FED25 tras tratamiento de temple, se aprecian un constituyente disperso formado por carburos de gran tamaño, que son los carburos primarios o proeutéctoides. La matriz está compuesta por martensita y carburos eutécticos embebidos en la misma.

Para conocer la composición química de la muestra se lleva a cabo un análisis elemental cuyo resultado se resume en la Figura 47. Se ha realizado también un "mapping" (Figura 45) en el que se aprecia cómo los carburos primarios están enriquecidos en Cromo (verde), en comparación con la matriz mucho más rica en Hierro (rojo).

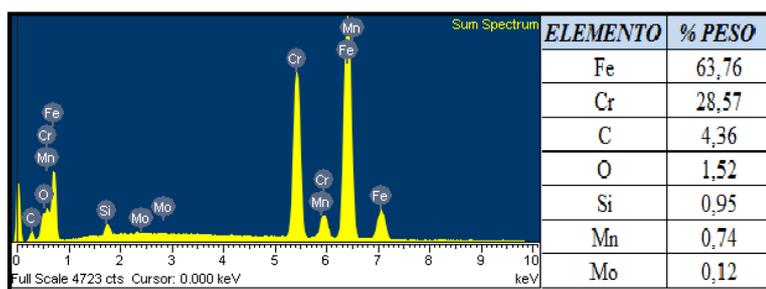


Figura 47: Análisis químico elemental de un carburo en la fundición FED25 tras temple.

Para el caso de la fundición FED25 tras temple y dos revenidos se tomaron las siguientes fotografías:

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA
REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL
EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

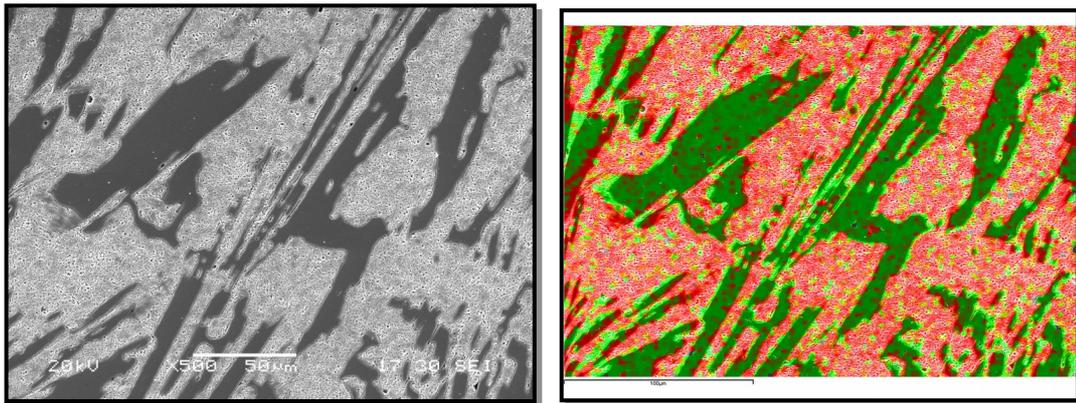


Figura 48: Fundición blanca FED25 tras temple y dos revenidos x500

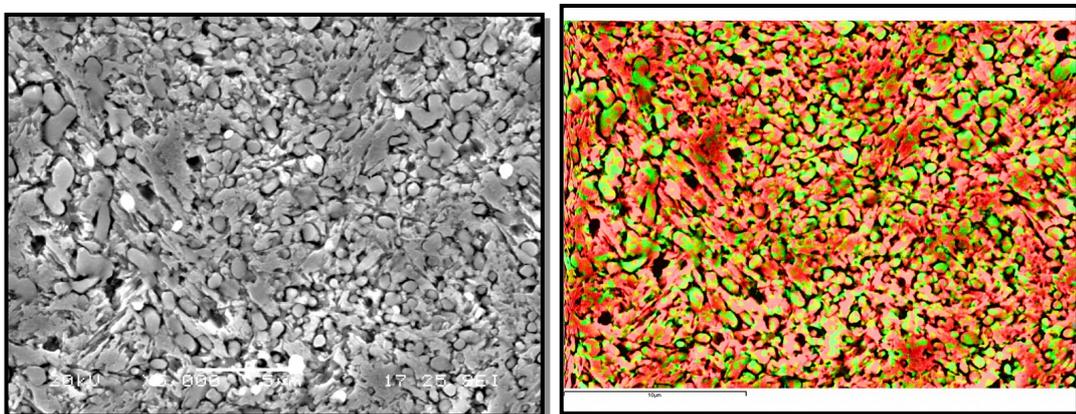


Figura 49: Fundición blanca FED25

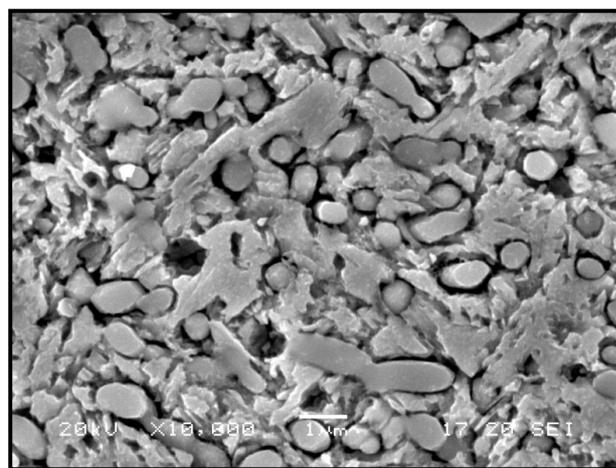


Figura 50: Fundición blanca FED25 tras temple y dos revenidos x10.000

OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE BLINDAJES PARA REVESTIMIENTOS EN PRENSAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE MATERIAL REFRACTARIO

El constituyente disperso formado por los carburos proeutéticos no se ha visto alterado, sino que son idénticos a los mostrados en el caso anterior (tras temple). Sin embargo la matriz se ha visto modificada en tanto que aparece un mayor número de carburos eutéticos presentes en la matriz de martensita. Esto se debe al empobrecimiento sufrido por la austenita residual en Carbono y Cromo a medida que se va transformando en martensita con la aplicación de los tratamientos de revenido.

Para conocer la composición química se llevan a cabo "mappings" tanto a x500 como a x5.000 aumentos, además de un análisis elemental cuyos resultados se resumen en las Figuras 51 y 52.

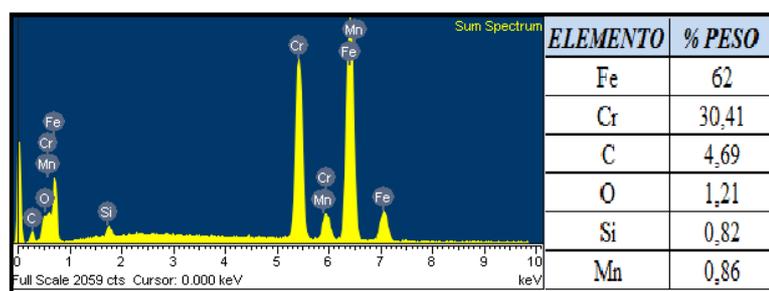


Figura 51: Análisis químico elemental en la fundición FED25 correspondiente a Figura 48.

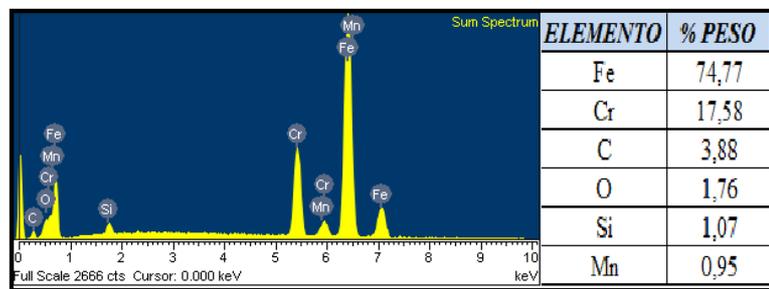


Figura 52: Análisis químico elemental de la matriz en la fundición FED25 correspondiente a Figura 50.

Con ello queda patente la existencia de dos fases claramente diferenciadas en cuanto a composición química: carburos ricos en Cromo (verde) y matriz rica en Hierro (rojo). Así mismo, la matriz posee gran número de carburos eutéticos de pequeño tamaño con alta proporción en Cromo que aparece resaltados en color verde en la Figura 49.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio comparativo de un acero y dos tipos de fundición blanca en cuanto a su aptitud como revestimiento en prensas uniaxiales para la fabricación de material refractario. Para ello, se han realizado ensayos de dureza y desgaste, así como un estudio metalográfico y químico.

Tras analizar y correlacionar todos los resultados obtenidos se concluye que el mejor material candidato a sustituir al acero utilizado actualmente es la fundición blanca con 18% en Cromo tras haber sido sometido a un tratamiento de temple a 1000°C durante 4 horas y dos revenidos consecutivos de 6 horas a 500°C. Este material ha destacado con los mejores resultados en los ensayos de dureza y resistencia a desgaste.

Estas óptimas características son derivadas de una microestructura formada por un constituyente disperso formado por carburos eutécticos de Cromo y una matriz martensítica, en la que aparecen gran cantidad de carburos de Cromo de pequeño tamaño embebidos en la misma formados a consecuencia de la transformación de la austenita residual en martensita a lo largo de los dos revenidos. Además del tipo de microestructura, la proporción de fase carburos ha resultado ser mayor que en el resto de los casos.

Todo lo anterior implica que la fundición blanca altamente aleada denominada en el presente proyecto como FED18 es un material que ofrece mejores características para su empleo como revestimiento de prensas de compresión uniaxial, pues debido a su alta dureza y excelente comportamiento a desgaste ampliaría la vida útil del blindaje permitiendo mantener inalteradas el resto de variables de las condiciones de trabajo.

6. REFERENCIAS

De Damborenea González J.J., Vazquez Vaamonde A.J. Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos.

De máquinas y herramientas. Herramientas de medición y control. Introducción al durómetro.

<http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/durometro-tipos>

F. Blanco. Fabricación de materiales refractarios conformados. Lección III. Universidad de Oviedo

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Refractarios.Lecccion3.FabricacionProductosREFRACTARIOS.pdf>

I. Fernández-Pariente y F.J. Belzunce-Varela. Influencia de diversos tratamientos térmicos en la microestructura de una fundición blanca con alto contenido en cromo.

Ingemecánica. Escalas de medición de la dureza de materiales

http://ingemecanica.com/tutoriales/tabla_dureza.html

Kansert S.L. Dureza Rockwell y Rockwell Superficial

<http://www.kansert.es/Rockwell.swf>

L. Ferreiro, A. García, A. Varela, C. Camba, J.L. Mier, F. Barbadillo. Correlación entre los resultados obtenidos mediante diversas técnicas de ensayo de desgaste. Dpto. Ingeniería Industrial II. Universidad de A Coruña
agd@cdf.udc.es

Monografías. Ensayos de dureza.

<http://www.monografias.com/trabajos70/ensayo-durezas/ensayo-durezas2.shtml>

Monografías. Matemáticas, Estadística, Asimetría y Curtosis.

<http://www.monografias.com/trabajos87/medidas-forma-asimetria-curtosis/medidas-forma-asimetria-curtosis.shtml>

N. Candela, A. López, O.A. Ruanoy J,A Jiménez. Estudio del desgaste de aceros rápidos pulvimetalúrgicos M3/2 reforzados con carburo de niobio mediante el ensayo pin-on-disk.

Nutriserver. Bioestadística. Coeficientes de asimetría y curtosis.

http://nutriserver.com/cursos/bioestadistica/Asimetria_Curtosis.html

Pero-Sanz Erolz, José Antonio.2004. Aceros. Metalurgia Física, Selección y Diseño.

Pero-Sanz Erolz, José Antonio.2006. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Estructura, Transformaciones, Propiedades y Selección.

Pero-Sanz Erolz, José Antonio.1994. Materiales para Ingeniería. Fundiciones Férrreas.

Wikispaces. Estadística. Unidad III. Clase nº 4: Medidas de Forma.

<http://eae0213.wikispaces.com/clase+4.III>