

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES  
E INGENIERÍA METALÚRGICA**

**TESIS DOCTORAL**

**OPTIMIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS Y  
FUNDICIONES DE ALTO CROMO UTILIZADOS EN LA  
FABRICACIÓN DE CILINDROS DE LAMINACIÓN**

**Autora: Inés Fernández Pariente  
Director: Francisco Javier Belzunce Varela**

**Noviembre 2004**



Reservados todos los derechos  
© El autor

Edita: Universidad de Oviedo  
Biblioteca Universitaria, 2009  
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 44  
ISBN 978-84-691-7824-9  
D.L.: AS. 05362-2008

**Tratamiento térmico de la  
fundición blanca con alto  
contenido en cromo**



## **6. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA FUNDICIÓN BLANCA CON ALTO CONTENIDO EN CROMO**

Al igual que en el caso del acero con alto contenido en cromo, se irán mostrando los resultados obtenidos tras los tratamientos térmicos realizados a las probetas, con el fin de mejorar las propiedades finales de los cilindros de laminación de fundición blanca con alto contenido en cromo.

### **6.1 PROBETAS EN ESTADO BRUTO DE MOLDEO**

En el caso del material en estado bruto de moldeo, el estudio se realizó sobre muestras extraídas de la zona de la capa de un cilindro de fundición blanca alta en cromo.

#### **6.1.1 RECUENTO DEL PORCENTAJE DE CARBUROS EUTÉCTICOS**

Para realizar el recuento del porcentaje de carburos eutécticos se han considerado cinco zonas pertenecientes a una parte representativa de la muestra. Por tanto, según el método explicado en el capítulo anterior, se han estudiado un total de 2.000 puntos por muestra. El porcentaje total de carburos ha sido la media muestral de las cinco medidas, resultando un valor de un 23% con una desviación típica del 1,8%.

#### **6.1.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

La fracción de austenita retenida se calculó siguiendo el método indicado en el capítulo de técnicas experimentales. Es importante destacar que este porcentaje se obtuvo únicamente en relación a la cantidad total de austenita y martensita presentes en la muestra, es decir, sin tener en cuenta la presencia de carburos eutécticos y los pequeños carburos precipitados en las zonas dendríticas, ya que la proporción de estos últimos resulta de muy difícil valoración y difiere significativamente de unas probetas a otras.

Bajo estas consideraciones, la fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo, muestra una proporción de austenita retenida respecto a martensita del 74 %.

El espectro de difracción de rayos X de la fundición de alto contenido en cromo en estado bruto de moldeo ha revelado además que los carburos presentes en la misma son del tipo  $M_7C_3$ .

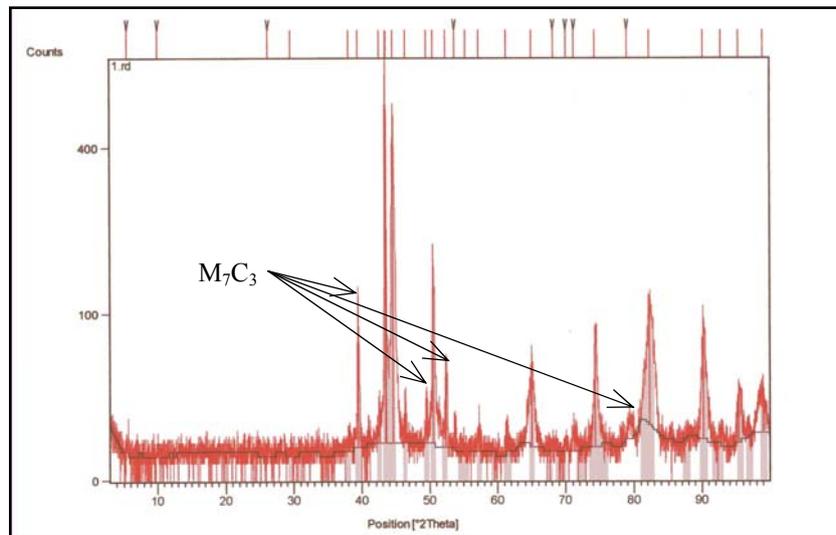


Figura 6.1 Picos de difracción del ensayo realizado a la fundición blanca alta en cromo

### 6.1.3 MICROESTRUCTURA

La micrografía de la figura 6.2 muestra la microestructura de la fundición blanca alta en cromo de la zona de la capa del cilindro en estado bruto de moldeo.

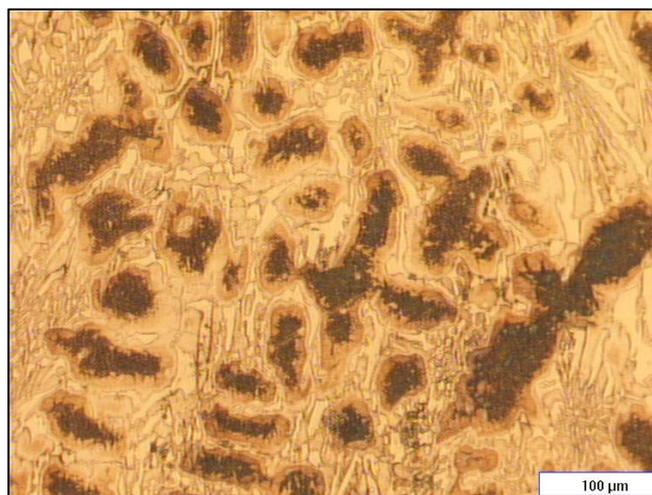
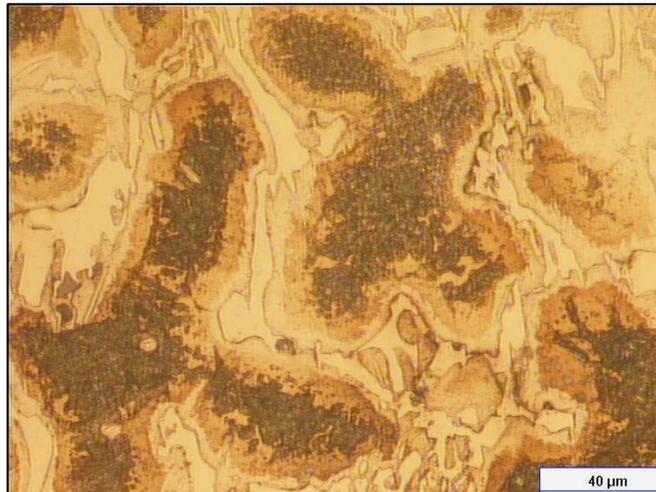


Figura 6.2 Fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo (200x)

Se observan, en principio, cuatro fases diferenciadas. En la micrografía siguiente (figura 6.3), realizada sobre una zona de la anterior a un mayor número de aumentos, se podrán distinguir mejor



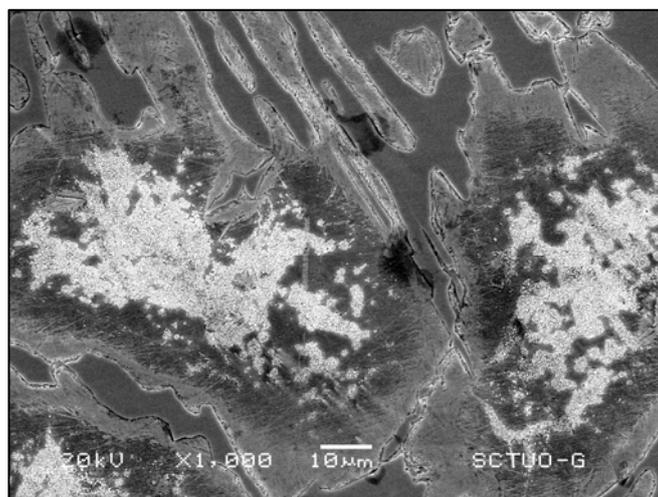
las fases constituyentes: carburos eutécticos, pequeños carburos precipitados, martensita y austenita retenida.



*Figura 6.3 Fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo (500x)*

Con la ayuda del microscopio electrónico se pueden ver con más detalle las zonas descritas en la figura anterior.

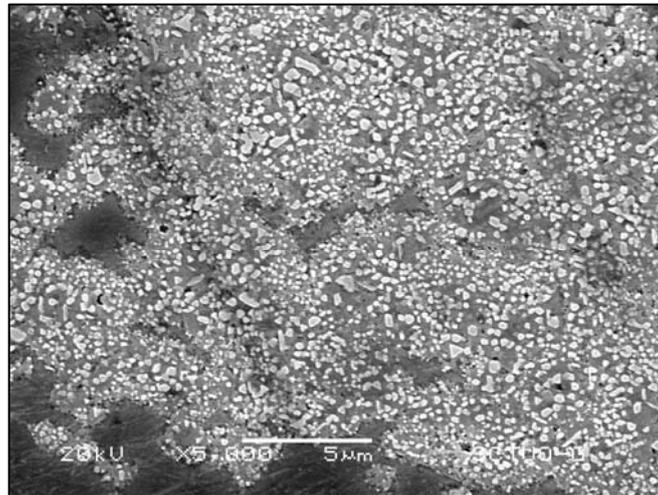
La figura 6.4 muestra a 1.000 aumentos, las diferentes regiones ya descritas, constitutivas de la fundición de alto cromo en estado bruto de moldeo.



*Figura 6.4 Fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo (1.000x)*

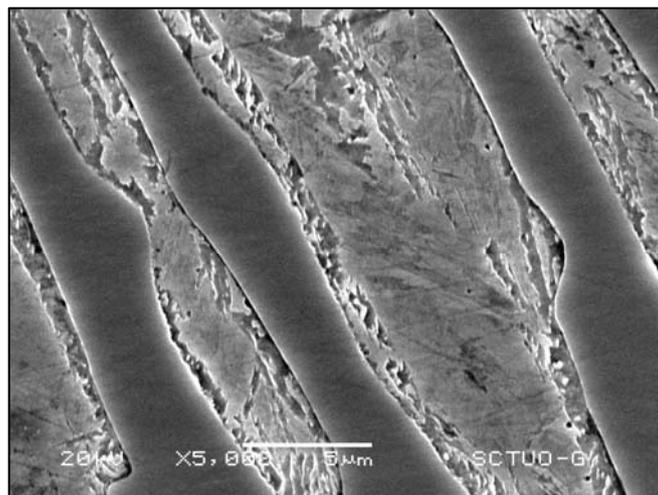


En la figura 6.5 se aprecia un detalle de la intensa precipitación de carburos (supuestamente de cromo), que ha tenido lugar en el curso del enfriamiento.



*Figura 6.5 Región dendrítica con pequeños carburos precipitados en una fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo ( 5.000x)*

Las figuras 6.6 (región eutéctica) y 6.7 (límite de la zona dendrítica) muestran la presencia de dos fases (martensita y austenita retenida) en las proximidades de los carburos eutécticos.



*Figura 6.6 Región eutéctica: carburos de cromo, martensita y austenita retenida en una fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo (5.000x)*

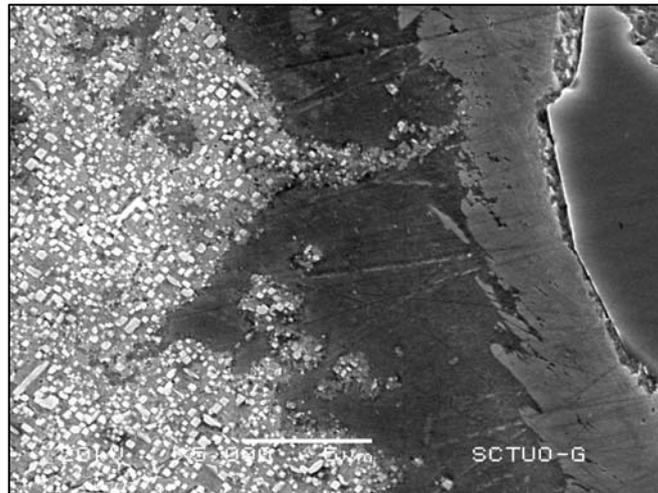


Figura 6.7 Límite de la región dendrítica con carburos precipitados (izquierda), y los carburos eutécticos (derecha) en una fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo (5.000x)

#### 6.1.4 DUREZA Y MICRODUREZA

La macrodureza media que se ha medido en la capa del cilindro en estado bruto de moldeo es 611 HV, con una desviación típica de 18 unidades.

Se ha medido también la microdureza Vickers de las distintas fases visualizadas en la capa del cilindro de la muestra en estado bruto de moldeo: carburos eutécticos, región con martensita y austenita retenida y zonas dendríticas con carburos precipitados.

Los valores de microdureza obtenidos en cada fase se exponen en la tabla 6.1. Dichos valores representan el valor medio de 10 medidas realizadas sobre cada una de las fases anteriormente mencionadas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	MICRODUREZA ( $\mu$ HV)		
	Carburos eutécticos	Zonas dendríticas con pequeños carburos precipitados	Austenita retenida y martensita
ESTADO BRUTO DE MOLDEO	1.110 $\pm$ 191	580 $\pm$ 36	723 $\pm$ 24

Tabla 6.1 Microdureza de las distintas fases del material de la capa del cilindro en estado bruto de moldeo



## 6.2 TRATAMIENTOS DE REVENIDO SIMPLES

El material en estado bruto de moldeo se ha sometido directamente a tratamientos de revenido durante 5 horas a las temperaturas de 450°C, 475°C, 500°C, 525°C, 550°C y 575°C. Posteriormente se realizaron sobre las muestras ensayos de difracción de rayos X, dureza, microdureza y se estudió la microestructura de cada una de ellas.

### 6.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Con los datos obtenidos en los ensayos de difracción de rayos X, se han calculado los porcentajes de austenita retenida en cada una de las muestras revenidas a cada temperatura, para el pico correspondiente a la distancia  $d=1,27\text{Å}$ . El espectro de picos de la probeta revenida a 500°C durante 5 horas se muestra en la figura 6.8. Los porcentajes de austenita retenida obtenidos se recogen en la tabla 6.2.

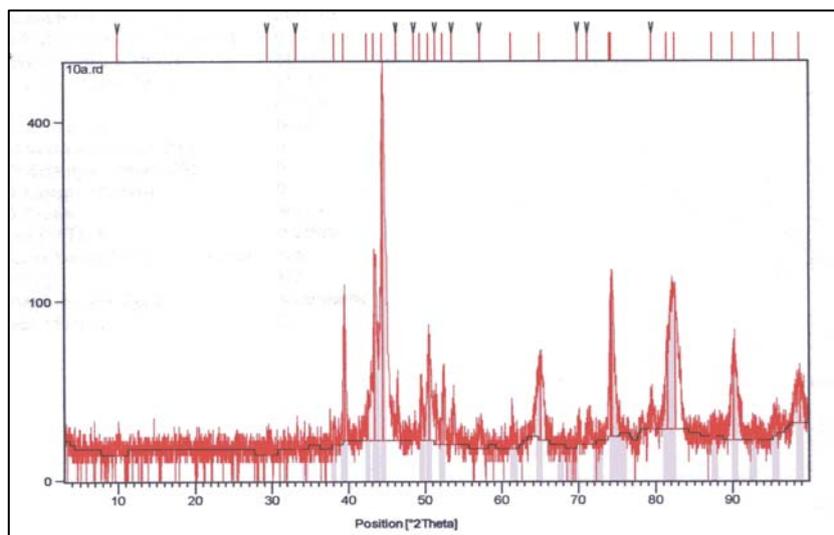


Figura 6.8 Picos de difracción en la probeta de fundición alta en cromo sometida a un revenido de 5 horas a 500°C



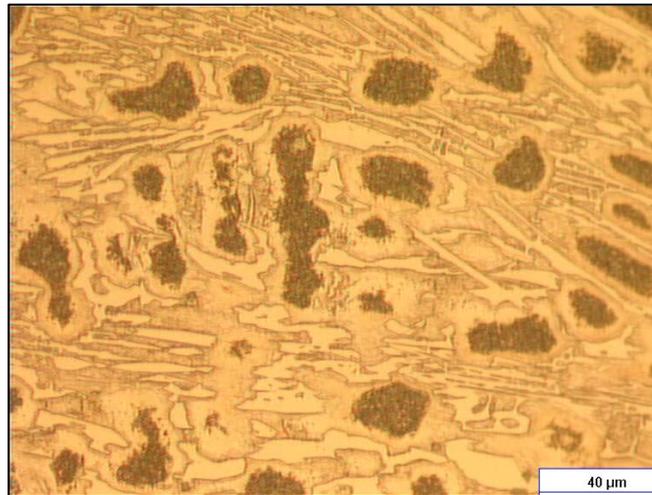
TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Revenido simple a 450°C-5h	-
Revenido simple a 475°C-5h	-
Revenido simple a 500°C-5h	78%
Revenido simple a 525°C-5h	-
Revenido simple a 550°C-5h	45%
Revenido simple a 575°C-5h	54%

*Tabla 6.2 Fracciones volumétricas de austenita en probetas revenidas durante 5 horas a diferentes temperaturas*

Parece observarse una cierta disminución de la fracción de austenita retenida a medida que se incrementa la temperatura de revenido, aunque de cualquier forma el contenido de esta fase sigue siendo en todos los casos bastante elevado.

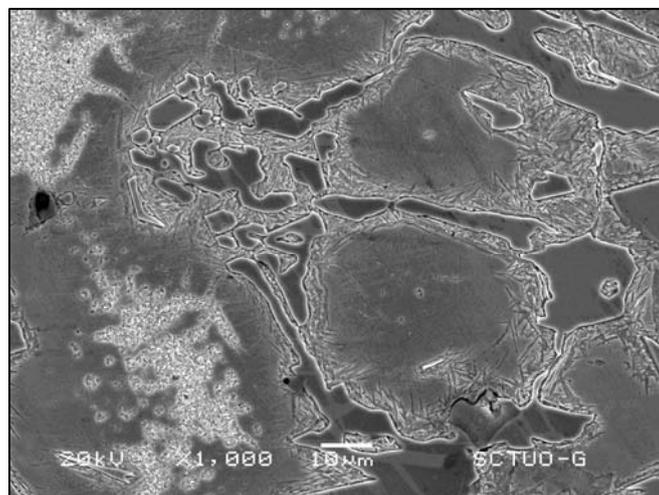
### **6.2.2 MICROESTRUCTURA**

Se analizaron las estructuras de las probetas extraídas de la zona de la capa de la fundición alta en cromo en estado bruto de moldeo y revenidas durante 5 horas a las temperaturas de 450°C, 475°C, 500°C, 525°C, 550°C y 575°C, mediante microscopía óptica y electrónica. En todas ellas se pueden identificar las mismas zonas que aparecían en las probetas en estado bruto de moldeo sin tratamiento térmico posterior: carburos eutécticos, región con una intensa precipitación de pequeños carburos precipitados, austenita retenida y martensita (apartado 6.1.3). La figura 6.9 muestra la microestructura óptica típica de esta serie de probetas.



*Figura 6.9 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de revenido a 450°C (500x)*

Las figuras 6.10 y 6.11 recogen micrografías realizadas con el microscopio electrónico de barrido sobre esta serie de probetas.



*Figura 6.10 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de revenido a 500 °C (1.000x)  
Vista general*

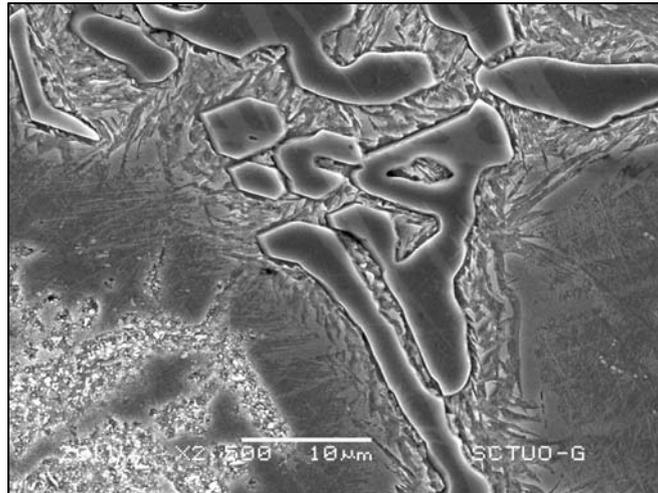


Figura 6.11 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de revenido 500 °C (2.500x)  
Detalle de la región eutéctica.

La única diferencia que parece observarse al variar la temperatura de revenido, es que al aumentar dicha temperatura disminuye la fracción de austenita retenida.

### 6.2.3 DUREZA

La medida de la dureza correspondiente a cada una de las temperaturas de revenido aplicadas, se ha calculado mediante ensayos Vickers como la media muestral de diez medidas de dureza realizadas en cada una de las muestras tratadas. En la figura 6.12 se recogen los resultados obtenidos.

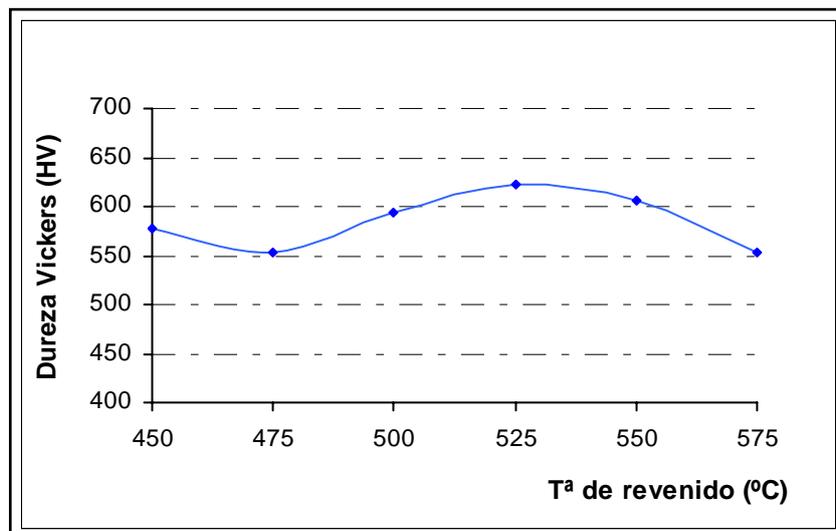


Figura 6.12 Variación de la dureza del material de la capa del cilindro en función de la temperatura de revenido



Se observa un ligero endurecimiento que alcanza el máximo valor a los 525°C, siendo la dureza tras este tratamiento de revenido algo superior a la del estado bruto de moldeo (623 frente a 611HV), lo que debe atribuirse a la transformación parcial de la austenita retenida en martensita.

#### 6.2.4 MICRODUREZA

Puesto que tanto los tratamientos de revenido, como todos los demás que fueron realizados en este proyecto, se realizan a temperaturas que no afectan previsiblemente a la microestructura de los carburos eutécticos, se omitirá calcular la microdureza de esta fase en el caso de las muestras tratadas térmicamente, ya que se considera que es la misma que la de la muestra en estado bruto de moldeo. Igualmente, la fracción volumétrica de estos carburos no se modifica con el tratamiento térmico, tal y como se ha puesto de manifiesto en el estudio que se ha realizado en el capítulo 5 sobre el acero alto en cromo.

Así pues, para el caso de las probetas de la capa del cilindro sometidas a tratamientos térmicos de revenido, se ha medido la microdureza de las siguientes fases constituyentes de su microestructura: zonas dendríticas con carburos precipitados, austenita retenida y martensita.

En la tabla 6.3 se recogen los resultados de microdureza obtenidos en cada fase dependiendo de la temperatura de revenido empleada, junto con la desviación típica correspondiente a cada uno de ellos.

TRATAMIENTO TÉRMICO	MICRODUREZA VICKERS		
	Carburos precipitados	Austenita retenida	Martensita
Revenido simple a 450°C-5h	612 ± 52	630 ± 38	-
Revenido simple a 500°C-5h	861 ± 50	484 ± 28	816 ± 29
Revenido simple a 550°C-5h	701 ± 32	-	1062 ± 91

Tabla 6.3 Microdureza y desviación típica de las probetas sometidas a distintas temperatura de revenido durante 5 horas

Las variaciones observadas en los valores de las microdurezas medidas sobre los distintos constituyentes deben atribuirse a la dispersión propia de estas determinaciones, justificada por el pequeño tamaño de los mismos.



### 6.2.5 CUADRO DE RESULTADOS

La tabla 6.4 resume el conjunto de resultados obtenidos con las muestras de fundición blanca alta en cromo, tras ser sometidas a tratamientos térmicos de revenido a distintas temperaturas durante 5 horas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	%AUSTENITA RETENIDA	DUREZA (HV)	MICRODUREZA ( $\mu$ HV)		
			Carburos precipitados	Austenita retenida	Martensita
ESTADO BRUTO MOLDEO		$611 \pm 18$	$580 \pm 36$	$723 \pm 24$	—
REVENIDO A 450°C-5h	—	$577 \pm 8$	$612 \pm 52$	$630 \pm 6.0$	—
REVENIDO A 475°C-5h	—	$553 \pm 7$	—	—	—
REVENIDO A 500°C-5h	78	$594 \pm 9$	$861 \pm 50$	$484 \pm 5.7$	$816 \pm 29$
REVENIDO A 525°C-5h	—	$623 \pm 11$	—	—	—
REVENIDO A 550°C-5h	45	$607 \pm 8$	$701 \pm 32$	—	$1062 \pm 91$
REVENIDO A 575°C-5h	54	$554 \pm 8$	—	—	—

Tabla 6.4 Resumen de resultados de las probetas revenidas a distintas temperaturas durante 5 horas

## 6.3 TRATAMIENTOS DE REVENIDO DOBLES

También se han realizado tratamientos térmicos de doble revenido en ciclos de 5 horas de duración sobre la fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo a las mismas temperaturas que las utilizadas en los tratamientos de revenido estudiados en el apartado anterior.

### 6.3.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El contenido de austenita retenida después de los diferentes tratamiento térmicos de doble revenido se presentan en la tabla 6.5.



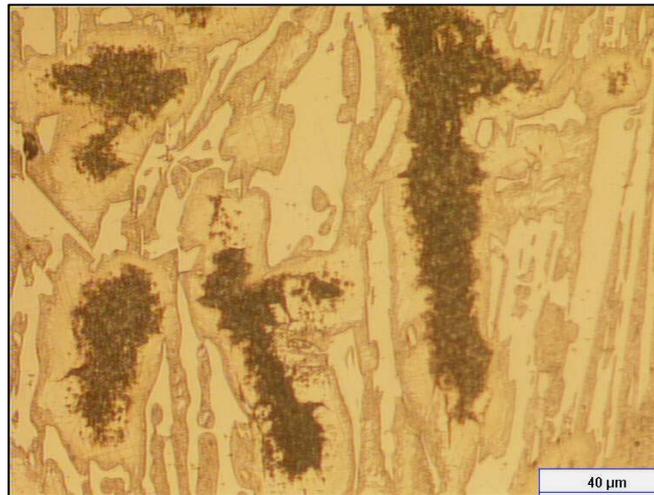
TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Revenido doble a 450°C-5h+5h	-
Revenido doble a 475°C-5h+5h	60%
Revenido doble a 500°C-5h+5h	-
Revenido doble a 525°C-5h+5h	54%
Revenido doble a 550°C-5h+5h	32%
Revenido doble a 575°C-5h+5h	0

*Tabla 6.5 Fracciones volumétricas de austenita en probetas sometidas a dos ciclos revenido de 5 horas a diferentes temperaturas*

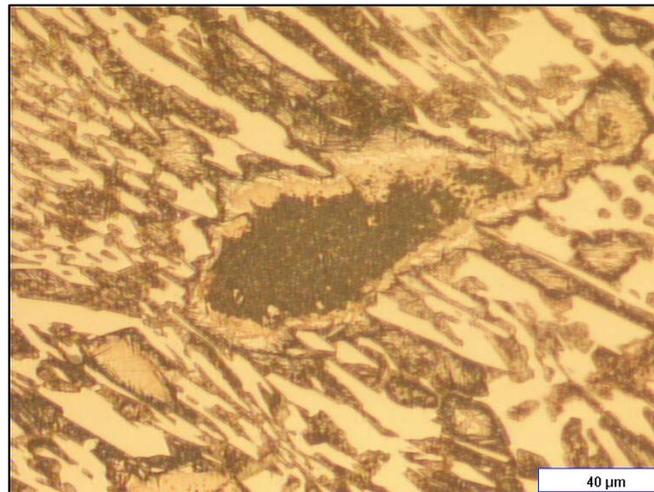
Se observa un claro descenso de la cantidad de austenita retenida al incrementar la temperatura del doble tratamiento de revenido, llegando a desaparecer solo tras el doble revenido a 575 °C.

### **6.3.2 MICROESTRUCTURA**

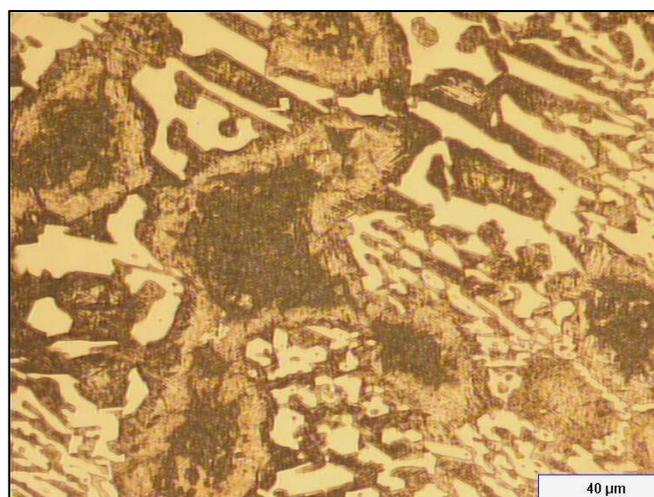
Tras observar microscópicamente las probetas de la fundición de alto contenido en cromo en estado bruto de moldeo, sometidas a un doble tratamiento de revenido a diferentes temperaturas, no se observa ninguna variación significativa de las fases constitutivas de estos productos respecto a los estados bruto de moldeo y bruto de moldeo con un solo revenido. La única diferencia que cabe destacar, es una disminución en la fracción volumétrica de austenita residual al aumentar la temperatura del doble tratamiento de revenido, tal y como se refleja en la secuencia de figuras 6.13, 6.14 y 6.15 y aún con más claridad en los detalles recogidos utilizando un mayor número de aumentos en las micrografía electrónicas de las figuras 6.16, 6.17 y 6.18.



*Figura 6.13 Fundición alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 450 °C (500x)*



*Figura 6.14 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 500 °C (500x)*



*Figura 6.15 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 550 °C (500x)*

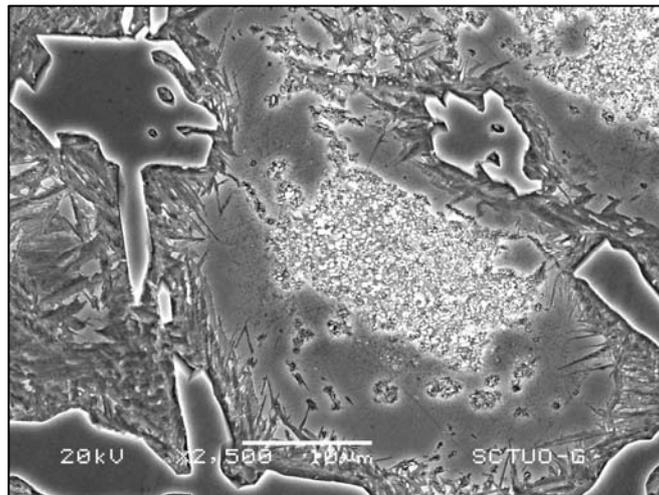


Figura 6.16 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 500 °C (2.500x) Región dendrítica.

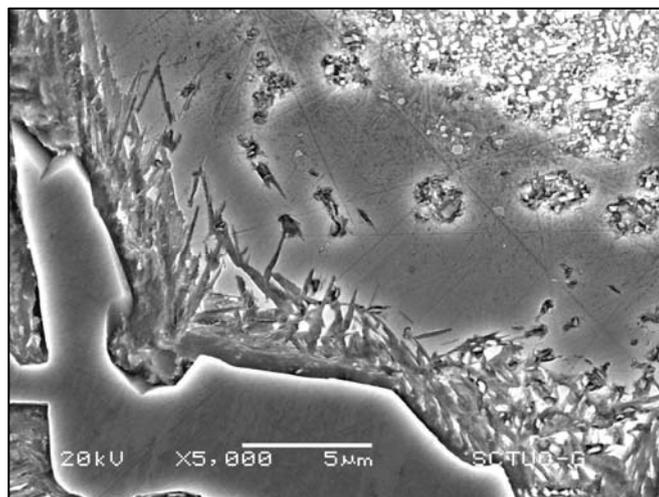


Figura 6.17 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 500 °C (5.000x) Región dendrítica próxima a carburos eutécticos.

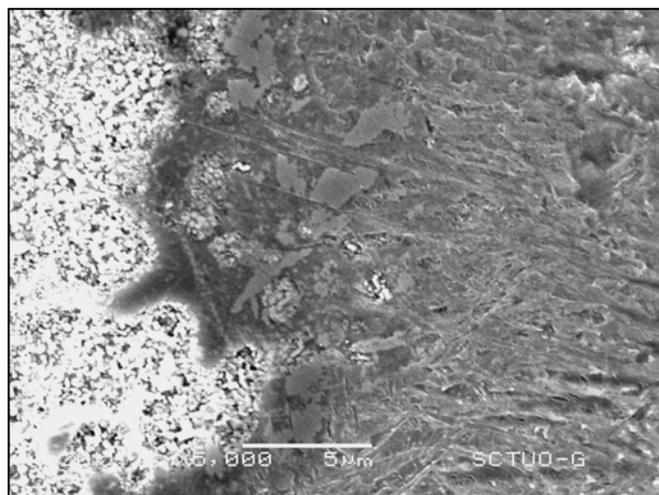


Figura 6.18 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de doble revenido a 550 °C (5.000x)



### 6.3.3 DUREZA

La media muestral de los valores de dureza Vickers de las probetas sometidas a los diferentes tratamientos de doble revenido y se recogen en la tabla 6.6.

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA VICKERS
Estado Bruto de Moldeo	611 ± 18
Revenido doble a 450°C-5h+5h	584 ± 13
Revenido doble a 475°C-5h+5h	597 ± 13
Revenido doble a 500°C-5h+5h	612 ± 10
Revenido doble a 525°C-5h+5h	610 ± 10
Revenido doble a 550°C-5h+5h	575 ± 8
Revenido doble a 575°C-5h+5h	493 ± 10

Tabla 6.6 Dureza y desviación típica de las probetas sometidas a distintas temperatura de revenido durante 5h+5h

La dureza aumenta progresiva y lentamente hasta los 500°C, y a partir de esta temperatura disminuye. El aumento inicial de la dureza con las temperaturas de revenido más bajas debe atribuirse a la misma causa que ya se había expuesto a propósito de los tratamientos de revenido simples, es decir, a la transformación de la austenita retenida en martensita.

En la figura 6.19 se comparan los tratamientos térmicos de revenido simple y doble revenido, para lo que se ha representado gráficamente los valores de dureza obtenidos para cada temperatura de revenido en ambos casos. Se observan tendencias bastante similares en los valores de dureza para ambos tratamientos, alcanzándose los valores máximos en los dos casos en torno a los 500-525°C. En esta gama de temperaturas, el valor de dureza coincide con la dureza del material en estado bruto de moldeo (611HV). Para temperaturas de revenido superiores, la dureza empieza a decaer, obteniéndose siempre mayores valores de dureza en el caso del revenido simple.

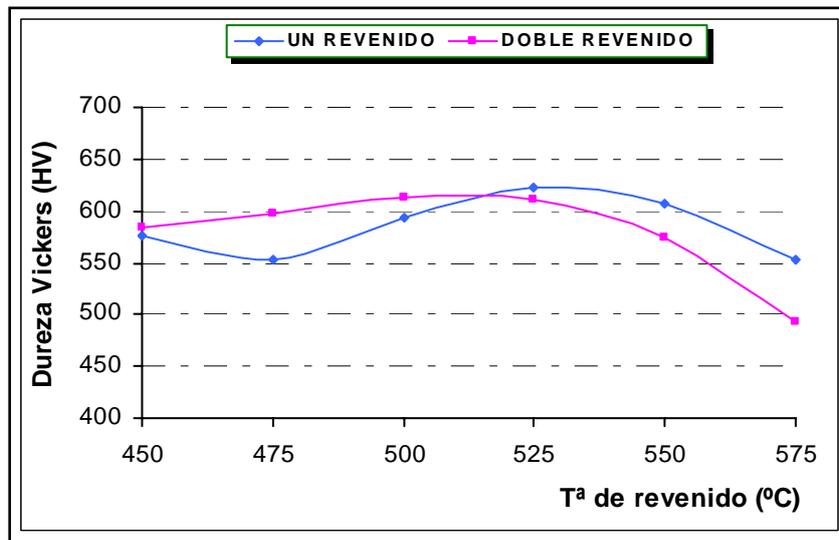


Figura 6.19 Comparación de la dureza en muestras sometidas a tratamientos de revenido simple y doble en función de la temperatura

### 6.3.4 MICRODUREZA

Para el cálculo de la microdureza de cada fase después de los tratamientos de doble revenido aplicados, se ha seguido el mismo procedimiento que ha sido explicado en el caso de los tratamientos térmicos de revenido simple. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.7.

TRATAMIENTO TÉRMICO	MICRODUREZA VICKERS		
	Carburos precipitados	Austenita retenida	Martensita
Revenido simple a 450°C-5h	608 ± 30	603 ± 32	-
Revenido simple a 500°C-5h	647 ± 33	632 ± 35	965 ± 60
Revenido simple a 550°C-5h	717 ± 16	-	1266 ± 91

Tabla 6.7 Microdureza y desviación típica de las probetas sometidas a tratamientos de doble revenido durante 5h+5h a distintas temperaturas

En este caso se han obtenido valores de microdureza más consistentes para los diferentes constituyentes.



### 6.3.5 CUADRO DE RESULTADOS

La tabla 6.8 resume el conjunto de resultados obtenidos en las probetas de fundición blanca alta en cromo en estado bruto de moldeo, tras ser sometidas a tratamiento térmico de doble revenido a diferentes temperaturas en ciclos de 5 horas de duración.

TRATAMIENTO TÉRMICO	% AUSTENITA RETENIDA	DUREZA	MICRODUREZA		
			Carburos precipitados	Austenita retenida	Martensita
REVENIDO A 450°C-5h+5h	-	584 ± 13	608 ± 30	603 ± 32	-
REVENIDO A 475°C-5h+5h	60	597 ± 13	-	-	-
REVENIDO A 500°C-5h+5h	-	612 ± 10	647 ± 33	632 ± 35	965 ± 60
REVENIDO A 525°C-5h+5h	54	610 ± 10	-	-	-
REVENIDO A 550°C-5h+5h	32	575 ± 8	717 ± 16	-	1266 ± 91
REVENIDO A 575°C-5h+5h	0	493 ± 10	-	-	-

Tabla 6.8 Resumen de resultados de probetas con ciclos de revenido doble a distintas temperaturas durante 5h+5h

## 6.4 TRATAMIENTOS DE TEMPLE DURANTE 5 HORAS

A continuación se realizaron tratamientos de temple a la fundición con alto contenido en cromo, durante un tiempo de 5 horas a distintas temperaturas de austenización (900°C, 950°C, 1.000°C, 1.050°C y 1.100 °C), seguidos de un enfriamiento rápido hasta 450°C, mantenimiento durante 6 horas a esta temperatura para terminar con un enfriamiento final al aire (enfriamiento industrial).

En los siguientes apartados, se detallan los resultados obtenidos con esta serie de probetas.

### 6.4.1 RECUENTO DEL PORCENTAJE DE CARBUROS EUTÉCTICOS

Se ha calculado el porcentaje de carburos correspondiente a la probeta templada a 1.000 °C, resultando un 28% con una desviación típica de un 1.2%. Comparado este resultado con el obtenido en el caso de la fundición en estado bruto de moldeo (23%), se ve que ambos valores, como cabría esperar, no difieren demasiado, ya que los carburos eutécticos no van a verse afectados por el



tratamiento térmico. Por este motivo se ha omitido el cálculo de la fracción de carburos en el resto de las muestras tratadas en esta serie.

A la vista de estos resultados, el valor medio de la fracción volumétrica de carburos eutécticos de la fundición alta en cromo corresponde a un 25%.

#### 6.4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la figura 6.20 se muestran los porcentajes de austenita retenida respecto de la martensita, obtenidos en las muestras de fundición blanca alta en cromo, tras ser sometida a tratamiento térmico de temple a diferentes temperaturas.

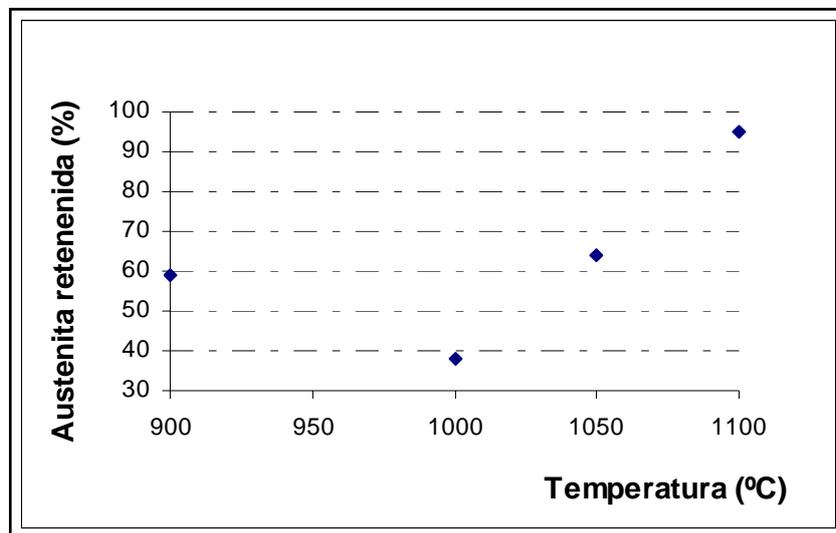


Figura 6.20 Porcentajes de austenita retenida en la fundición alta en cromo en función de la temperatura de austenización

Se aprecia un mínimo en el contenido de austenita retenida a la temperatura de 1.000°C, y un aumento fuerte a partir de esta temperatura. Mientras que al calentar la muestra en estado bruto de moldeo a temperaturas inferiores a 1.000°C se produce sin duda una precipitación de carburos que contribuye a favorecer la transformación de la austenita en el enfriamiento subsiguiente, (mayor Ms), para las temperaturas superiores a los 1.000°C ocurre ya lo contrario, la puesta en solución de los carburos precipitados; la austenita aumenta su contenido en carbono y aleantes y se estabiliza. Este razonamiento se comprobará al llevar a cabo el análisis microestructural. Por otro lado variaciones en la solubilidad de los carburos con la temperatura y también con el tiempo de austenización ha sido igualmente constatado por otros investigadores (Bedolla-Jacuinde, 2.003) sobre productos análogos.



### 6.4.3 MICROESTRUCTURA

Con la ayuda del microscopio óptico se han estudiado las microestructuras de las probetas templadas a distintas temperaturas durante 5 horas. El aspecto de la probeta austenizada a 900 °C (figura 6.21) es bastante similar al correspondiente a su estado bruto de moldeo.

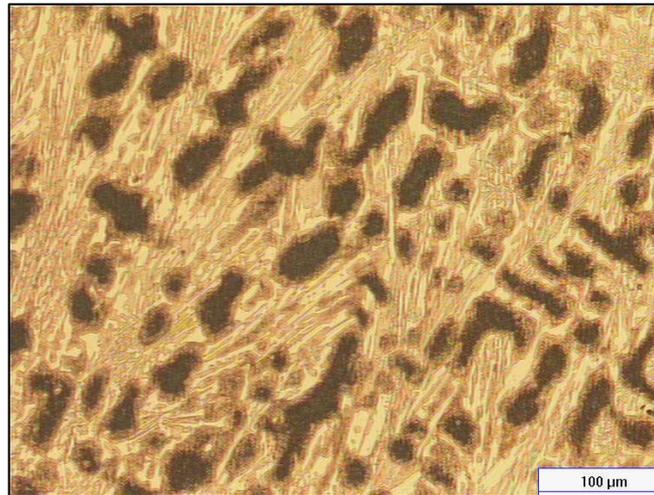


Figura 6.21 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 900 °C (200x)

Sin embargo, tras el temple a temperaturas más altas (950°C y 1.000 °C), se incrementa la fracción volumétrica de carburos precipitados (zonas oscuras de las micrografías), a costa de la disminución de las fracciones de austenita retenida y martensita (figura 6.21 y 6.22).

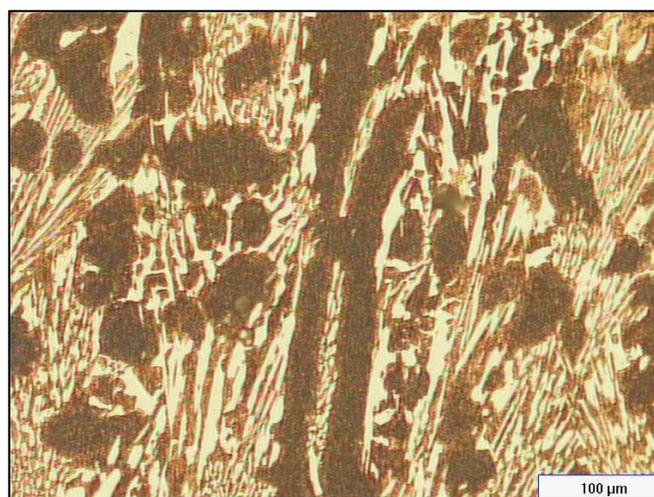
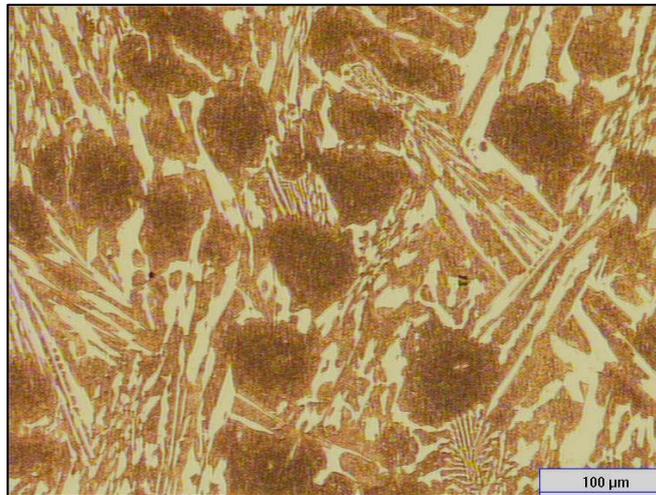


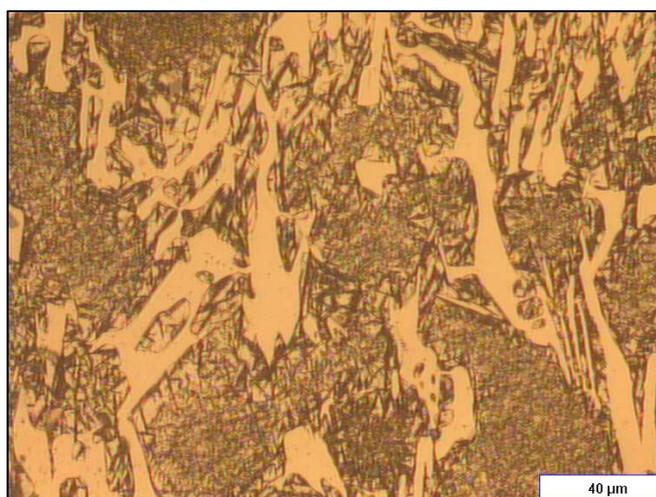
Figura 6.22 Fundición blanca alta en cromo austenizada a 950 °C durante 5 horas (200x)



*Figura 6.23 Fundición blanca alta en cromo austenizada a 1.000 °C durante 5 horas (200x)*

Por otro lado, al continuar incrementando la temperatura de temple (1.050°C y especialmente 1.100°C), se observa la desaparición de la región caracterizada por la presencia de abundantes carburos dispersos, a expensas del incremento del porcentaje de austenita retenida (figuras 6.24 y 6.25).

Todas estas apreciaciones se han estudiado con más profundidad con ayuda de la microscopía electrónica y son expuestas a continuación.



*Figura 6.24 Fundición blanca alta en cromo austenizada a 1.050 °C durante 5 horas (500x)*

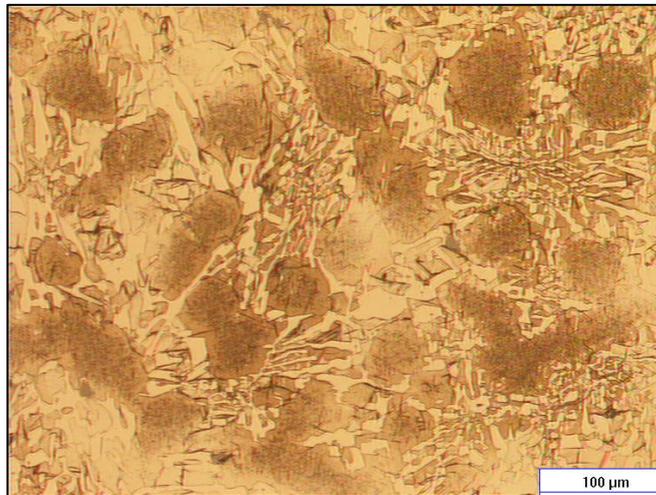


Figura 6.25 Fundición blanca alta en cromo austenizada a 1.100 °C durante 5 horas (200x)

Las figuras 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31 muestran detalles de las probetas templadas desde 1.000°C y 1.100°C. Ponen de manifiesto la variación en la presencia de carburos precipitados y austenita retenida entre estas dos temperaturas.

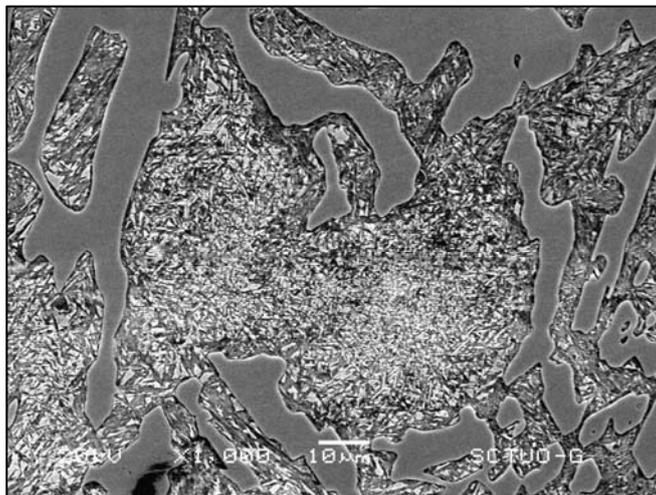


Figura 6.26 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C (1.000x)

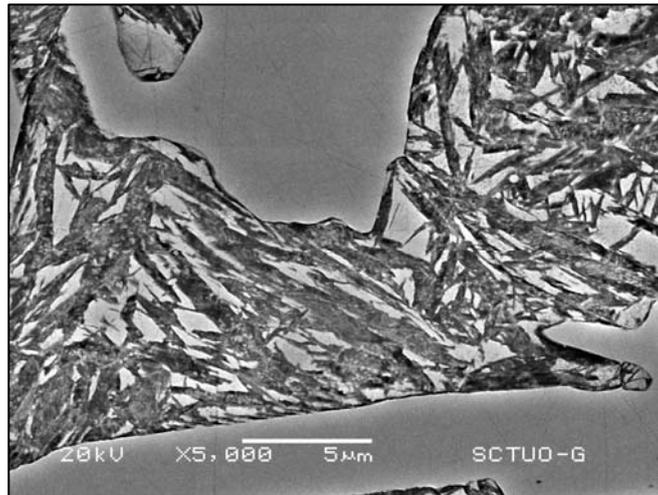


Figura 6.27 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C (5.000x)



Figura 6.28 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C (5.000x)  
Región dendrítica con abundante precipitación de carburos



Figura 6.29 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1100 °C (1.000x)

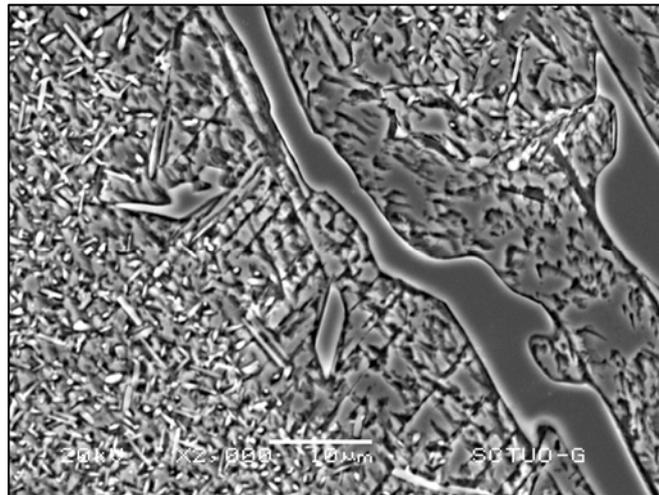


Figura 6.30 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1.100 °C (2.000x)

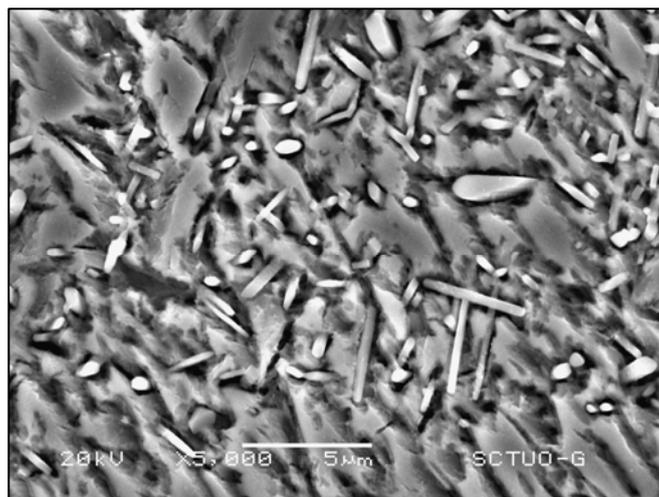


Figura 6.31 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1.100 °C (5.000x)

Al aumentar la temperatura de austenización se favorece la redisolución de los pequeños carburos precipitados en las regiones dendríticas; la austenita se enriquece en carbono y en cromo, su temperatura ‘Ms’ de inicio de transformación martensítica disminuye y en consecuencia la fracción de austenita retenida aumenta.

#### 6.4.4 DUREZA

Los resultados obtenidos en los ensayos de dureza Vickers, con una carga de 31.25kg en las probetas tratadas térmicamente a distintas temperaturas de austenización durante 5 horas, se recogen en la figura 6.32:

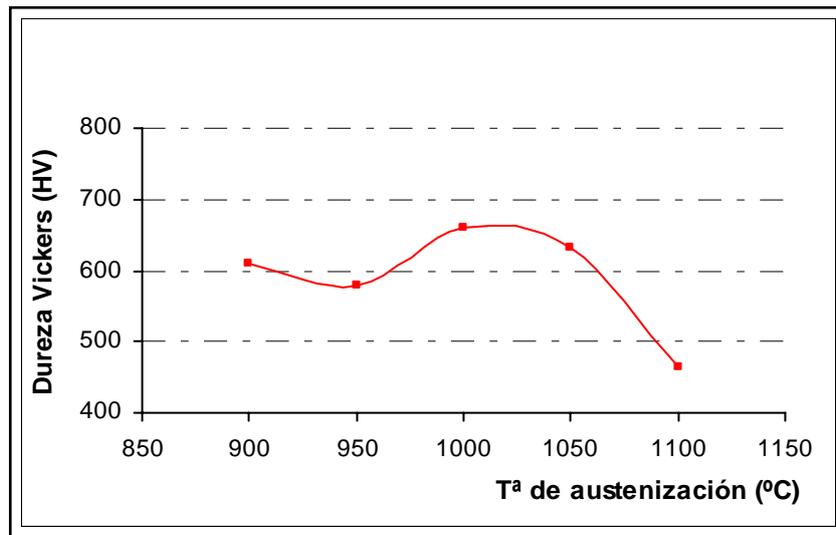


Figura 6.32 Variación de la dureza de la fundición alta en cromo en función de la temperatura de austenización

Se pone de manifiesto un aumento de la dureza hasta la temperatura de austenización de 1.000 °C (659 HV, frente al valor de 611 HV que se había medido en la fundición en estado bruto de moldeo) para luego caer rápidamente al utilizar temperaturas de austenización mayores.

### 6.4.5 MICRODUREZA

En la tabla 6.9 se reflejan los valores de microdureza obtenidos tanto sobre los carburos como sobre las regiones dendríticas de las muestras tratadas con temple industrial a las citadas temperaturas de austenización.

TRATAMIENTO TÉRMICO	MICRODUREZA VICKERS	
	Carburos eutécticos	Regiones dendríticas
Estado bruto de moldeo	1.110 ± 191	580 ± 36
Austenización a 900°C-5h	1.015 ± 64	615 ± 17
Austenización a 950°C-5h	1.126 ± 175	636 ± 28
Austenización a 1.000°C-5h	1.312 ± 95	712 ± 58
Austenización a 1.050°C-5h	978 ± 189	560 ± 58
Austenización a 1.100°C-5h	986 ± 215	423 ± 19

Tabla 6.9 Microdureza en probetas de fundición alta en cromo austenizada durante 5 h a distintas temperaturas (valor medio ± desviación típica)



Como cabría esperar, la dureza de los carburos eutécticos no varía prácticamente con la temperatura de austenización, siendo estos resultados similares a los que se habían medido sobre la probeta en estado bruto de moldeo (1.110 HV). La dureza de estos productos depende entonces predominantemente de la microdureza de las regiones dendríticas. Ésta sigue el mismo patrón que la macrodureza y de nuevo se observa que los mayores valores de la microdureza de las regiones dendríticas corresponden también a la probeta austenizada a 1.000°C. La figura 6.33 pone de manifiesto que la disminución de la microdureza de las regiones dendríticas se debe al aumento de la fracción de austenita retenida.

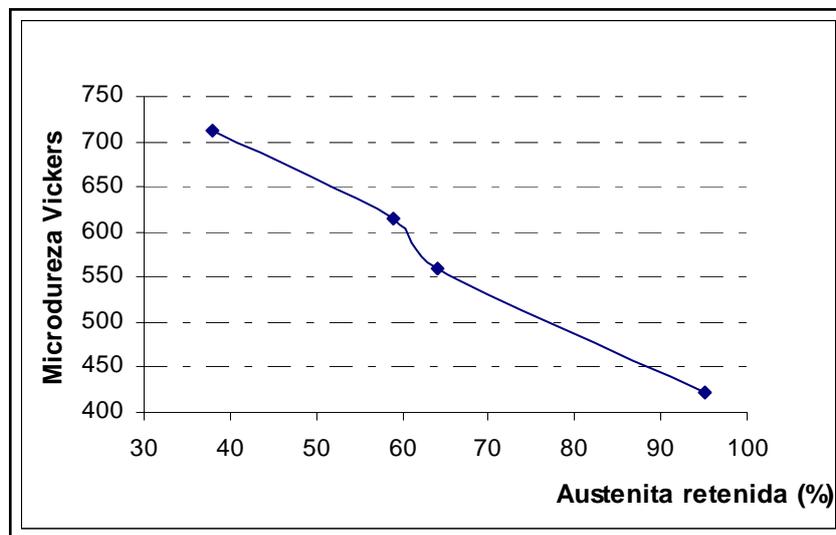


Figura 6.33 Relación entre la austenita retenida y la microdureza en las regiones dendríticas

#### 6.4.6 CUADRO DE RESULTADOS

La tabla 6.10 resume los resultados obtenidos en los ensayos efectuados con este tipo de probetas.



TRATAMIENTO TÉRMICO	% CARBUROS EUTÉCTICOS	% AUSTENITA RETENIDA	DUREZA	MICRODUREZA	
				Carburos eutécticos	Regiones Dendríticas
ESTADO BRUTO MOLDEO	23 ± 1,8%	74	611 ± 18	1110 ± 191	580 ± 36
AUSTENIZACIÓN A 900°C-5H	--	59	609 ± 8	1.015 ± 64	615 ± 17
AUSTENIZACIÓN A 950°C-5H	--	--	578 ± 10	1.126 ± 175	636 ± 28
AUSTENIZACIÓN A 1.000°C-5H	28 ± 1.2%	38	659 ± 17	1.312 ± 95	712 ± 58
AUSTENIZACIÓN A 1.050°C-5H	--	64	632 ± 12	978 ± 189	560 ± 58
AUSTENIZACIÓN A 1.100°C-5H	--	95	465 ± 8	986 ± 215	423 ± 19

Tabla 6.10 Resumen de los resultados para las probetas de fundición alta en cromo austenizadas durante 5 horas a distintas temperaturas

De todos los tratamiento de temple aplicados a las probetas de fundición alta en cromo, el que proporciona una mayor dureza y microdureza es el de 1.000°C. Esto es debido como ya se ha explicado a la existencia de una menor proporción final de austenita retenida al austenizar a esta temperatura. De todos modos, teniendo en cuenta que una austenita más aleada previsiblemente se transformaría en los tratamientos de revenido se pensó que aplicando previamente un temple a 1.050 °C, también se podría conseguir una alta dureza final. Por ello, se estudiaron ambas posibilidades (temple a 1.000 y a 1.050°C), y los resultados obtenidos para cada una de ellas se detallan en los siguientes apartados.

## 6.5 TRATAMIENTOS DE TEMPLE CON AUSTENIZACIÓN A 1.000°C MÁS REVENIDO SIMPLE

Tras el tratamiento de temple a 1.000°C durante 5h, seguido de enfriamiento industrial, se realizaron tratamientos de revenido simple a distintas temperaturas (450°C, 475°C, 500°C, 525°C, 550°C y 575°C) durante 5 horas. En ellas se analizaron las proporciones de austenita retenida, la microestructura y los valores de dureza.



### 6.5.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la tabla 6.11 se muestran los porcentajes de austenita retenida respecto de la martensita, obtenidos en las muestras de fundición blanca alta en cromo, tras ser sometida a tratamiento térmico de temple a 1.000°C seguido de un revenido a diferentes temperaturas durante 5h.

TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Revenido simple a 450°C-5h	-
Revenido simple a 475°C-5h	-
Revenido simple a 500°C-5h	36%
Revenido simple a 525°C-5h	0
Revenido simple a 550°C-5h	-
Revenido simple a 575°C-5h	-

Tabla 6.11 *Fracciones volumétricas de austenita retenida en probetas sometidas a un ciclo de revenido durante 5 horas a diferentes temperaturas*

Aunque sólo se han medido dos probetas, se constata la desaparición de la austenita retenida a partir del revenido realizado a 525 °C.

### 6.5.2 MICROESTRUCTURA

Tras estudiar las microestructuras de las probetas revenidas a distintas temperaturas mediante microscopía óptica y electrónica, cabe mencionar como única variación respecto a las simplemente templadas la precipitación de carburos finos en el curso del tratamiento de revenido y la dificultad en la apreciación de la presencia de austenita retenida en estas microestructuras. En las figuras 6.34 y 6.35 se muestran imágenes electrónicas de una probeta templada a 1.000°C y revenida a 500°C durante 5h.

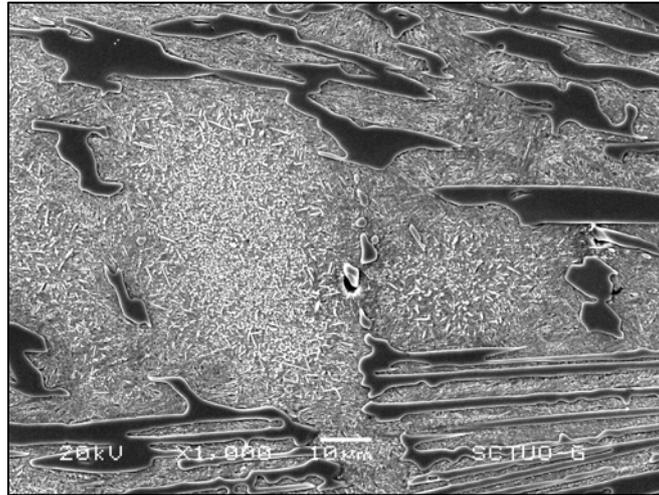


Figura 6.34 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C y revenido a 500°C (1.000x)

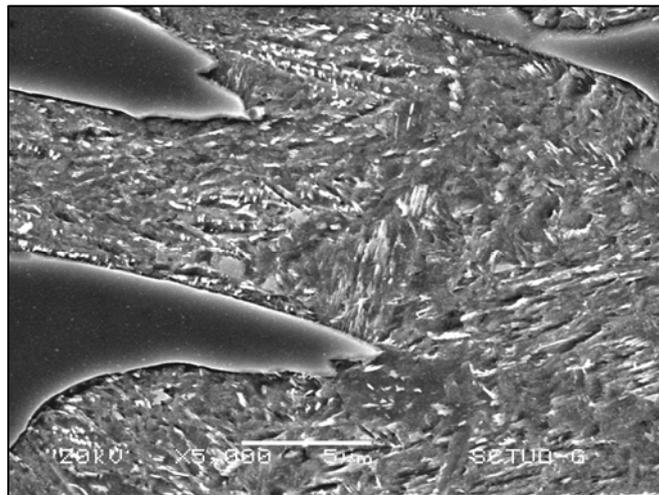


Figura 6.35 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C y revenido a 500 °C (5.000x)

### 6.5.3 DUREZA

En la tabla 6.12 se recogen los valores de dureza Vickers, calculados tras los ensayos correspondientes bajo carga de 31.25kg, para las muestras de fundición blanca alta en cromo sometida a tratamiento térmico de temple a 1.000 °C más revenido a diferentes temperaturas.



TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA VICKERS
Austenización a 1.000°C-5h	659 ± 17
Revenido simple a 450°C-5h	709 ± 14
Revenido simple a 475°C-5h	704 ± 24
Revenido simple a 500°C-5h	749 ± 9
Revenido simple a 525°C-5h	712 ± 8
Revenido simple a 550°C-5h	609 ± 6
Revenido simple a 575°C-5h	525 ± 9

*Tabla 6.12 Dureza de las probetas de fundición alta en cromo austenizadas a 1.000°C cinco horas y revenidas a distintas temperaturas durante 5h (valor medio ± desviación típica)*

Se observa un claro endurecimiento respecto a las probetas simplemente templadas (excepto para las temperaturas más altas, 550 y 575 °C ), justificado por la precipitación de finos carburos durante los tratamientos de revenido, principalmente a la temperatura de 500°C (749 HV) y a la transformación de la austenita retenida en martensita en el enfriamiento subsiguiente.

## **6.6 TRATAMIENTOS DE TEMPLE CON AUSTENIZACIÓN A 1.050°C MÁS REVENIDO SIMPLE**

Tras el tratamiento de temple a 1.050°C durante 5h, seguido de enfriamiento industrial, se realizaron tratamientos de revenido simple a distintas temperaturas (450°C, 475°C, 500°C, 525°C, 550°C y 575°C) durante 5 horas. En ellas se analizaron las proporciones de austenita retenida, la microestructura, y los valores de dureza.

### **6.6.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Los resultados de la fracción de austenita retenida respecto de la martensita, obtenidos en esta serie de ensayos se muestran en la tabla 6.13.



TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Revenido simple a 450°C-5h	-
Revenido simple a 475°C-5h	-
Revenido simple a 500°C-5h	57%
Revenido simple a 525°C-5h	44%
Revenido simple a 550°C-5h	-
Revenido simple a 575°C-5h	-

Tabla 6.13 Fracciones volumétricas de austenita retenida en probetas sometidas a un ciclo de revenido durante 5 horas a diferentes temperaturas tras temple a 1.050°C

Comparando estos datos con los correspondientes al temple a 1.000°C (tabla 5.39), se aprecian los mayores valores de austenita retenida medidos en esta última serie de probetas, que se justifican en virtud de la mayor estabilidad de la austenita, más aleada, presente en estas muestras.

### 6.6.2 MICROESTRUCTURA

Al igual que en el caso anterior, se aprecian zonas con carburos precipitados en el curso del tratamiento de revenido. En la figura 6.36 se muestra este fenómeno, en una probeta templada a 1.050°C durante 5h y revenida a 525°C otras 5 horas. La figura 6.37 corresponde a una vista general de esta misma probeta.

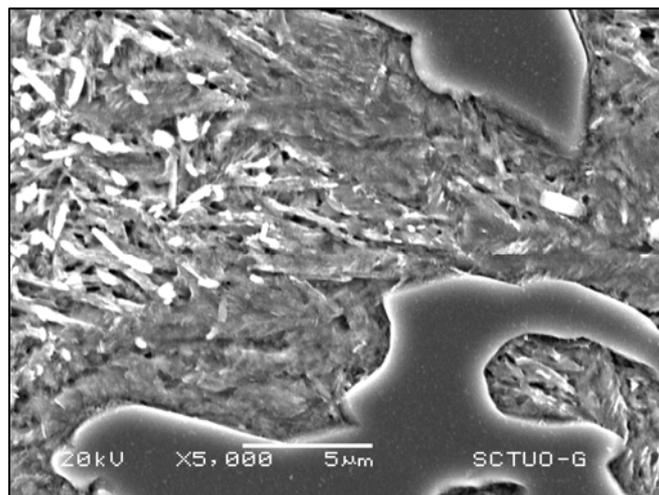


Figura 6.36 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1050 °C y revenido a 525 °C (5.000x)

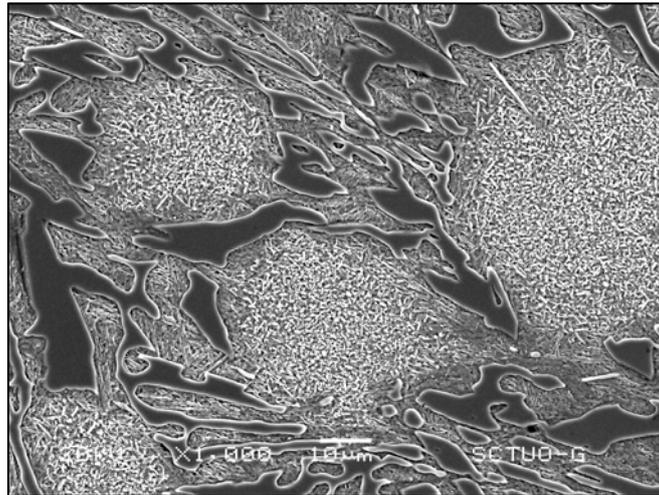


Figura 6.37 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1050 °C y revenido a 525°C (1.000x)

### 6.6.3 DUREZA

Los valores de dureza Vickers obtenidos en estas probetas se muestran en la tabla 6.14.

A partir de estos ensayos, se ve que al igual que en el caso del revenido tras el temple a 1.000°C, se produce un claro endurecimiento en el curso de los tratamientos de revenido, pero en este caso en toda la gama de temperaturas ensayadas. Todas las probetas revenidas tienen una dureza mayor que las templadas. La mayor dureza se alcanza tras el temple a 1.050 °C más revenido a 500 °C (742 HV).

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA VICKERS
Austenización a 1.050°C-5h	632 ± 12
Revenido simple a 450°C-5h	665 ± 13
Revenido simple a 475°C-5h	668 ± 9
Revenido simple a 500°C-5h	742 ± 6
Revenido simple a 525°C-5h	730 ± 5
Revenido simple a 550°C-5h	716 ± 19
Revenido simple a 575°C-5h	647 ± 3

Tabla 6.14 Dureza de las probetas de fundición alta en cromo templadas a 1.050°C 5 h y revenidas a distintas temperaturas durante 5h (valor medio ± desviación típica)



En la figura 6.38 se comparan los valores de dureza obtenidos tras el tratamiento térmico de temple más revenido, considerando las dos temperaturas de austenización que se están analizando (1.000 y 1.050 °C).

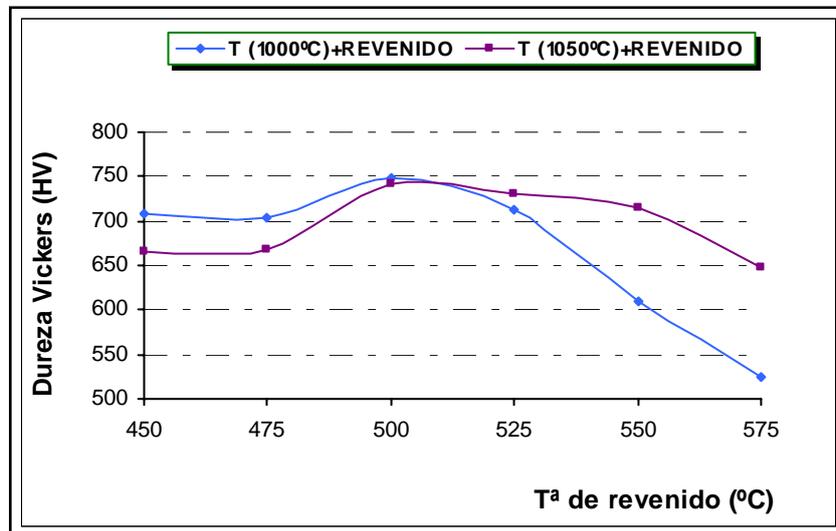


Figura 6.38 Comparación de durezas tras tratamientos de temple a 1.000 y a 1.050 °C más revenido a distintas temperaturas

Se observa que el máximo de dureza es prácticamente coincidente en ambos casos, y la principal diferencia estriba en el descenso más acentuado de la dureza con las temperaturas de revenido más altas que tiene lugar con el temple a 1.000 °C. Es decir, la austenita retenida, tras el correspondiente temple a 1.050 °C es más estable; tiene más carbono y está más aleada, la precipitación de carburos durante el revenido es mayor y sigue ocurriendo a temperaturas superiores de manera que la dureza del producto se mantiene hasta temperaturas más altas.

## 6.7 TRATAMIENTOS DE TEMPLE CON AUSTENIZACIÓN A 1.000°C MÁS DOBLE REVENIDO

Se han realizado tratamientos de doble revenido de 5 horas de duración cada uno a las muestras sometidas previamente a tratamiento de temple, con austenización a 1.000°C durante 5h, seguido de enfriamiento industrial. En ellas se analizaron las proporciones de austenita retenida, la microestructura, los valores de dureza y microdureza.



### 6.7.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la tabla 6.15 se muestran los porcentajes de austenita retenida respecto de la martensita, obtenidos en las muestras de fundición blanca alta en cromo, inicialmente en estado bruto de colada, tras ser sometida a tratamiento térmico de temple a 1.000 °C seguido de doble revenido a diferentes temperaturas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Doble Revenido a 450°C-5h+5h	-
Doble Revenido a 475°C-5h+5h	-
Doble Revenido a 500°C-5h+5h	0
Doble Revenido a 525°C-5h+5h	0
Doble Revenido a 550°C-5h+5h	-
Doble Revenido a 575°C-5h+5h	-

Tabla 6.15 *Fracciones volumétricas de austenita retenida en probetas sometidas dos ciclos de revenido durante 5 horas + 5 horas a diferentes temperaturas*

Se constata la desaparición completa de la austenita retenida después de los dos tratamientos de revenido.

### 6.7.2 MICROESTRUCTURA

La microestructura de esta serie de probetas se muestra en las figuras 6.39, 6.40 y 6.41 a diferentes temperaturas. La microestructura observada apenas difiere de la que se había obtenido tras el temple y primer revenido, excepto que parece confirmarse la desaparición completa de la austenita retenida.

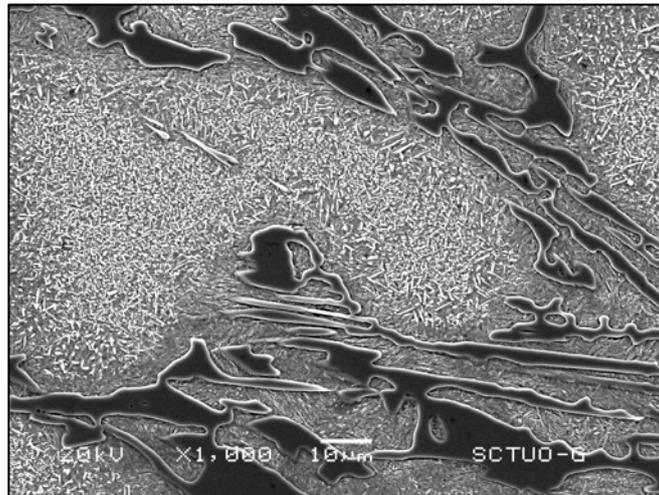


Figura 6.39 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C 5h y doble revenido a 500°C (1.000x)

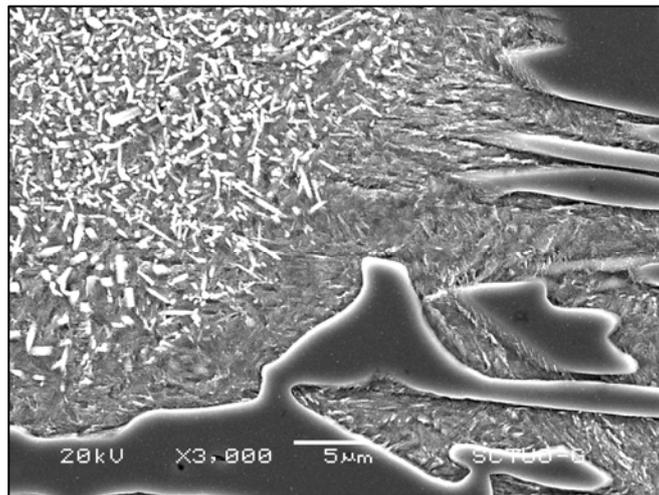


Figura 6.40 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C 5h y doble revenido a 500°C (3.000x)

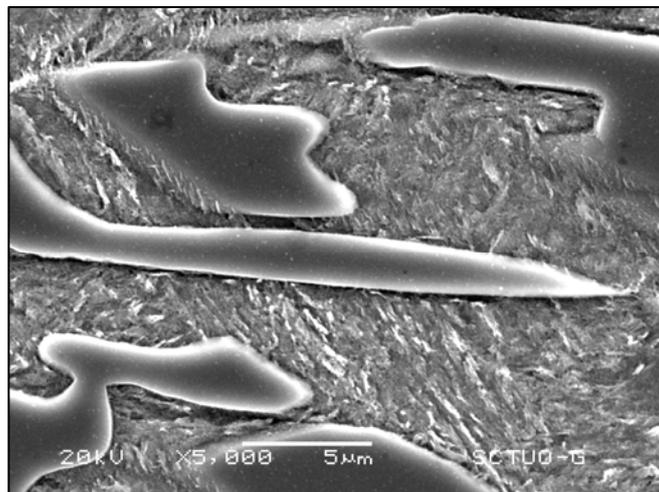


Figura 6.41 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1000 °C y doble revenido a 500 °C (5000x)



### 6.7.3 DUREZA

En la tabla 6.16 se muestran los valores de dureza Vickers obtenidos en esta serie de probetas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA VICKERS
Austenización a 1.000°C-5h	659 ± 17
Doble Revenido a 450°C-5h	735 ± 1
Doble Revenido a 475°C-5h	759 ± 8
Doble Revenido a 500°C-5h	733 ± 8
Doble Revenido a 525°C-5h	650 ± 29
Doble Revenido a 550°C-5h	565 ± 6
Doble Revenido a 575°C-5h	516 ± 1

Tabla 6.16 Dureza de las probetas de fundición alta en cromo templadas a 1.000°C, 5h y revenidas a distintas temperaturas durante 5h+ 5h (valor medio ± desviación típica)

Tras dos tratamientos de revenido, se vuelve a observar un claro endurecimiento respecto a la probeta templada mientras la temperatura de este tratamiento no supera los 500 °C. Se ha obtenido una dureza máxima de 759HV a 475 °C, partiendo de una dureza tras el temple de 659HV y una dureza en estado bruto de moldeo de 611HV. La figura 6.42 compara los valores de dureza que proporcionan al producto los tratamientos de temple a 1.000°C tras simple y doble revenido.

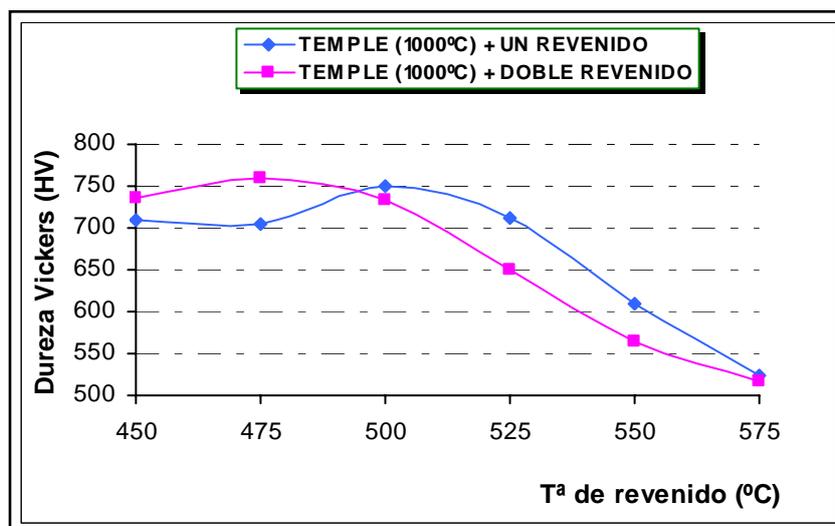


Figura 6.42 Comparación de la dureza de la fundición alta en cromo tras tratamiento de temple a 1.000°C en función de los ciclos de revenido



A la vista de la gráfica de la figura 6.42, se observa que hasta temperaturas cercanas a 500°C, los tratamientos de temple a 1.000°C más doble revenido aportan una mayor dureza al producto que los tratamientos de temple a 1.000°C más un solo revenido (por ejemplo, 759 HV frente a 668 HV, para 475°C), mientras que para temperaturas de revenido superiores a 500°C sucede lo contrario. Recuérdese que para las temperaturas de revenido más bajas, tras el primer tratamiento queda todavía una cierta fracción de austenita retenida que se transforma en el curso del segundo revenido, lo que justifica el incremento de dureza observado en estos casos. El comportamiento observado a temperaturas superiores a los 500°C es ya el habitual, de manera que el segundo revenido ablanda ligeramente la estructura de la fundición.

### 6.7.4 MICRODUREZA

Se realizaron medidas de microdureza sobre las regiones dendríticas de las micrografías anteriores, que se identificaron como martensita revenida.

Los valores de microdureza obtenidos en la martensita revenida de cada probeta, se recogen en la figura 6.43.

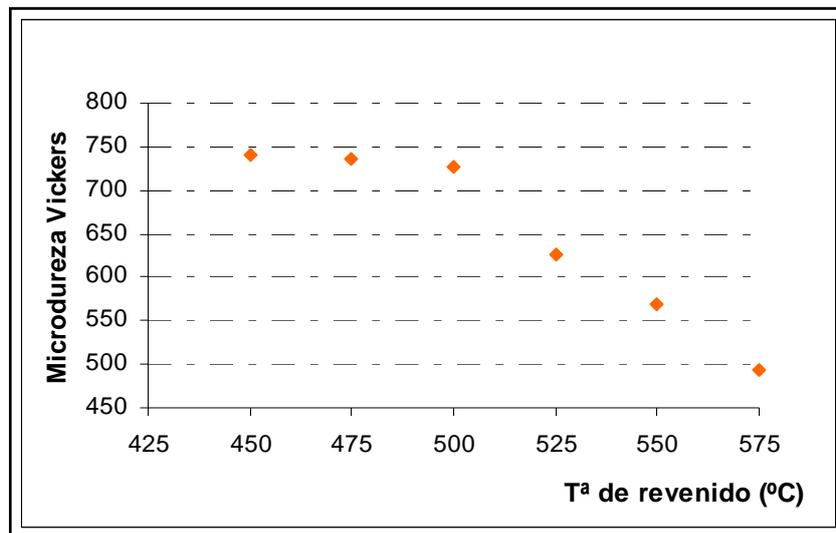


Figura 6.43 Microdureza de las probetas de fundición alta en cromo templadas a 1.000°C, 5h en función de la temperatura del doble revenido (5h+5h)

Se observa una progresiva disminución de la microdureza de la martensita revenida con la temperatura del doble tratamiento de revenido que resulta casi inapreciable hasta los 500°C y cae ya fuertemente para las temperaturas superiores.



## 6.8 TRATAMIENTOS DE TEMPLE CON AUSTENIZACIÓN A 1.050°C MÁS DOBLE REVENIDO

Finalmente se han realizado tratamientos de doble revenido de 5 horas de duración cada uno sobre las muestras sometidas previamente a tratamiento de temple a 1.050°C durante 5h, seguido de un enfriamiento industrial. En ellas se analizaron las proporciones de austenita retenida, la microestructura, los valores de dureza y microdureza.

### 6.8.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la tabla 6.17 se muestran los porcentajes de austenita retenida respecto de la martensita, obtenidos en las muestras de fundición blanca alta en cromo, tras ser sometida a tratamiento térmico de temple a 1.050°C más doble revenido a diferentes temperaturas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE AUSTENITA
Doble Revenido a 450°C-5h	-
Doble Revenido a 475°C-5h	-
Doble Revenido a 500°C-5h	0
Doble Revenido a 525°C-5h	0
Doble Revenido a 550°C-5h	-
Doble Revenido a 575°C-5h	-

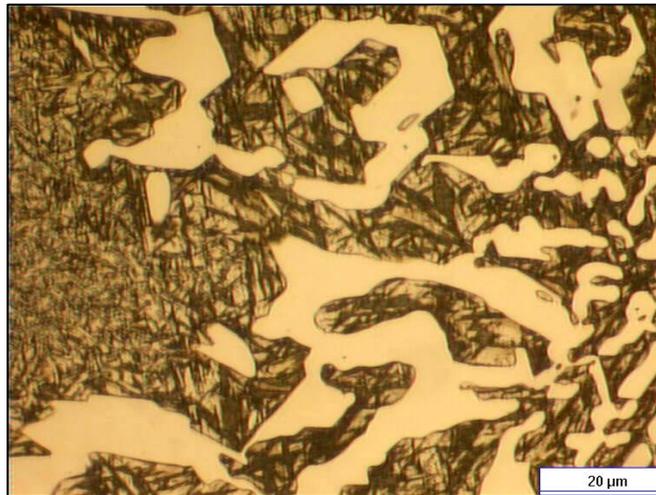
Tabla 6.17 Fracciones volumétricas de austenita retenida en probetas templadas a 1.050°C posteriormente sometidas a dos ciclos de revenido durante 5 horas+ 5 horas a diferentes temperaturas

Se constata la ausencia de austenita retenida en estas microestructuras después de dos tratamientos de revenido.

### 6.8.2 MICROESTRUCTURA

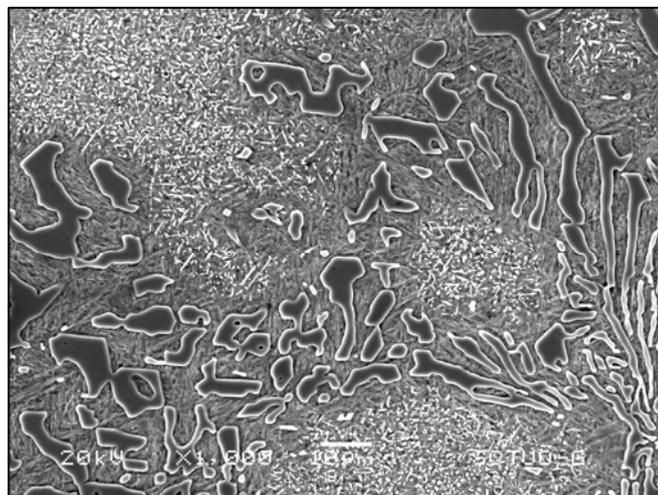
Las figuras siguientes muestran las microestructuras de las probetas obtenidas tras el temple a 1.050°C seguido de doble revenido a diferentes temperaturas.

A diferencia de lo que ocurría tras el temple a 1.000°C, ahora se observa la presencia clara de austenita retenida tras el doble revenido a 450°C (figura 6.44).



*Figura 6.44 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1050 °C más doble revenido a 450°C (1.000x)*

Las micrografías electrónicas de la figuras 6.45 y 6.46 dan muestra de las estructuras totalmente transformadas que se obtienen en estos productos cuando se revienen por encima de 500°C.



*Figura 6.45 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1050 °C y doble revenido a 525 °C (1.000x)*

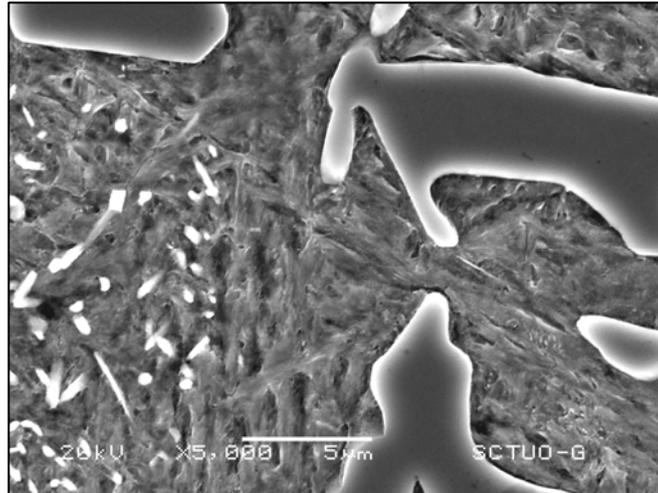


Figura 6.46 Fundición blanca alta en cromo con tratamiento de temple a 1050 °C y doble revenido a 525°C (5.000x)

### 6.8.3 DUREZA

En la tabla 6.18 se muestran los valores de dureza Vickers, tras tratamiento térmico de temple a 1.050°C seguido de tratamiento de doble revenido a diferentes temperaturas.

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA VICKERS
Austenización a 1.050°C-5h	632 ± 12
Doble Revenido a 450°C-5h+5h	661 ± 10
Doble Revenido a 475°C-5h+5h	707 ± 22
Doble Revenido a 500°C-5h+5h	788 ± 9
Doble Revenido a 525°C-5h+5h	714 ± 16
Doble Revenido a 550°C-5h+5h	698 ± 6
Doble Revenido a 575°C-5h+5h	596 ± 9

Tabla 6.18 Dureza de las probetas de fundición alta en cromo austenizadas a 1.050°C, 5h y revenidas a distintas temperaturas durante 5h+ 5h (valor medio ± desviación típica)

De nuevo se pone de manifiesto el fuerte endurecimiento producido por los tratamientos de revenido realizados hasta 550 °C en relación a la muestra templada. La dureza máxima obtenida ha sido 788HV a la temperatura de 500°C, mientras que la dureza tras el temple desde 1.050°C era de 632HV y la de la fundición en estado bruto de moldeo era de 611HV.



En la figura 6.47 se comparan los valores de dureza obtenidos en la fundición blanca alta en cromo, después de uno y dos revenidos (tratamiento de temple a 1.050°C).

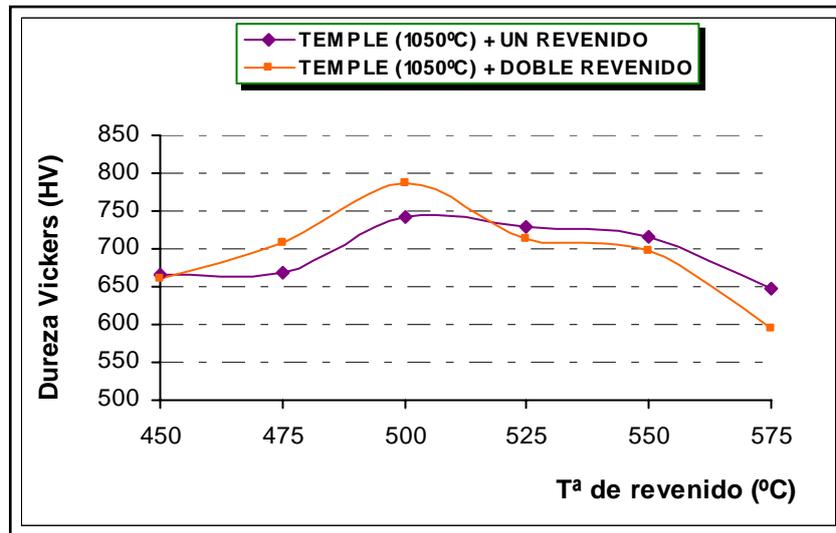


Figura 6.47 Comparación de la dureza de la fundición alta en cromo tras tratamiento de temple a 1.050°C seguido de uno y dos revenidos

Al igual que ocurría tras el temple a 1.000°C, pero aún más claramente, se observa que para temperaturas inferiores a los 500°C, los tratamientos de temple seguidos de doble revenido proporcionan mayores durezas que cuando se realiza un único revenido, mientras que para temperatura superiores ya sucede lo contrario. Igual que se había justificado en el anterior apartado, el comportamiento anómalo que tiene lugar a las temperaturas de revenido inferiores está motivado por la transformación de las últimas fracciones de austenita retenida que tiene lugar en estos casos en el curso del segundo revenido.

La figura 6.48, compara los valores de dureza obtenidos tras los tratamientos térmicos de temple más doble revenido, considerando las dos temperaturas de austenización que se están estudiando (1.000°C y 1.050°C).

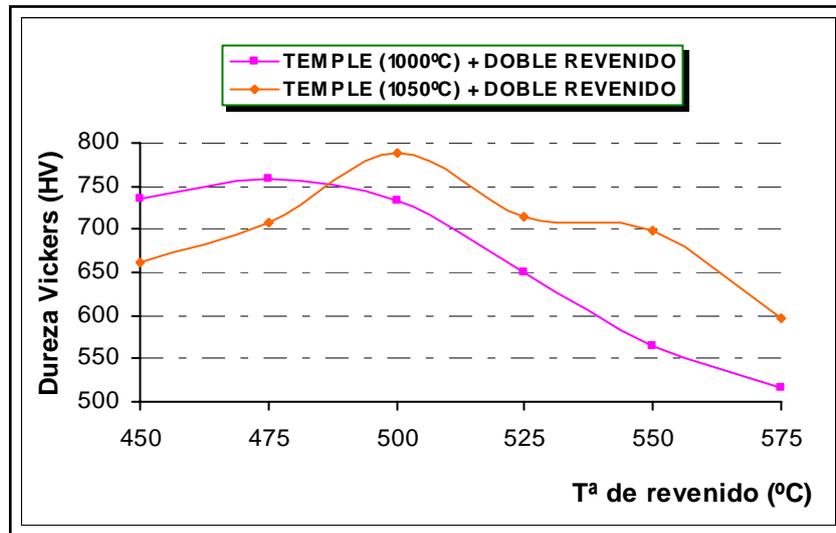


Figura 6.48 Comparación de la dureza de la fundición alta en cromo tras tratamiento de temple a 1.000°C y 1.050°C seguidos de dos revenidos a distintas temperatura

Como se puede ver en la figura 6.48, se consiguen productos ligeramente más duros con el tratamiento de temple a 1.050°C más doble revenido que con el tratamiento de temple a 1.000°C más doble revenido, y es también interesante destacar que la dureza evoluciona más lentamente cuando la temperatura de austenización es más alta, y la caída de la dureza con la temperatura es también más suave tras el temple desde 1.050°C, lo que sin duda se justifica porque al estar la austenita más aleada, es más estable y la variación microestructural en el curso del revenido exige temperaturas mayores.

#### 6.8.4 MICRODUREZA

Procediendo de forma análoga a la explicada en el caso de los tratamientos de temple a 1.000°C seguidos de doble tratamiento de revenido, se determinaron los valores de microdureza de las regiones dendríticas de martensita revenida.

La tabla 6.49 muestra los valores obtenidos en estos ensayos. La microdureza máxima, al igual que ocurría con la dureza, tiene lugar tras el revenido a 500°C.

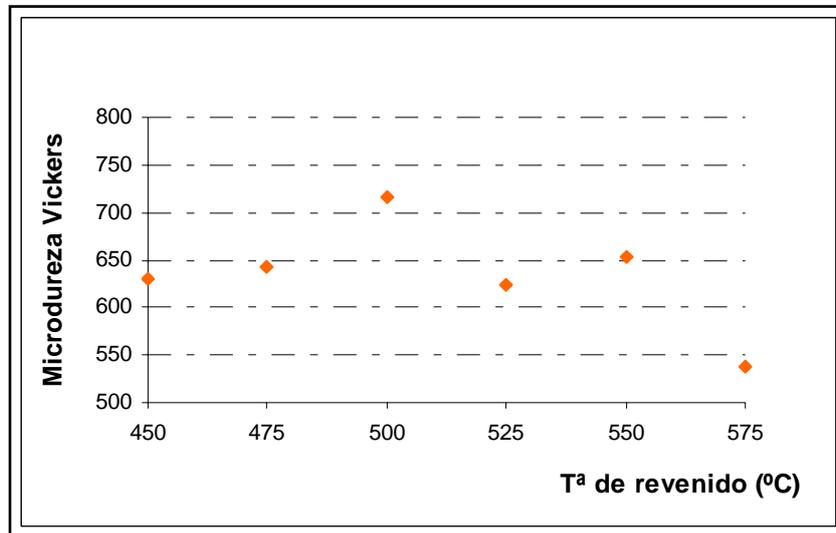


Figura 6.49 Microdureza de las probetas de fundición alta en cromo templadas a 1.050°C, 5h en función de la temperatura del doble revenido (5h+5h)

Como consecuencia de todos estos resultados se ha definido como tratamiento más adecuado para la fundición alta en cromo una austenización a 1.050°C durante 5 horas, seguido de enfriamiento industrial (mantenimiento durante 6 horas a 400°C y enfriamiento final al aire) y un doble revenido a 500°C durante 5 horas cada uno, por ser el que proporciona la mayor dureza. Este tratamiento térmico sería apropiado siempre que en el curso del servicio del cilindro, su superficie no se calentara nunca por encima de los 500°C, en cuyo caso habría que elevar la temperatura de los revenidos para asegurar la estabilidad microestructural a costa de la consiguiente disminución de la dureza.