



## DESARROLLO DE FUNDICIONES ATRUCHADAS RESISTENTES A LA ABRASIÓN

Jessica.V. Giacchi

**GRUPO TRIBOLOGÍA – FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Av. J. B. Justo 4302 – B7608FDQ Mar del Plata - Argentina  
e-mail: [jessica\\_giacchi@hotmail.com](mailto:jessica_giacchi@hotmail.com)

### RESUMEN

En trabajos previos se estudió el comportamiento frente al desgaste abrasivo y la resistencia al impacto de fundiciones nodulares parcialmente acoquilladas, las que mostraron una excelente resistencia a la abrasión en las zonas cercanas al enfriador, gracias al alto porcentaje de fase carburo, mientras que la resistencia al impacto resultó baja, como era de esperar, pero permitiendo disponer de valores de referencia para su utilización.

En el presente trabajo se estudió la resistencia a la abrasión y al impacto de fundición de hierro con grafito laminar atruchada o acoquillada mediante el uso de un enfriador de Cu. También, se realizó un exhaustivo análisis de la macro y microestructura mediante el estudio de las fases presentes, el relevamiento de los perfiles de contenido de carburos y de dureza en función de la distancia al enfriador. Los resultados del presente trabajo, son comparados con los obtenidos para fundición nodular acoquillada, permitiendo evaluar la influencia de la morfología de grafito, por un lado, en el mecanismo de abrasión y, por otro lado, en la resistencia al impacto en matrices con un contenido elevado de carburos.

Las coladas estudiadas, denominadas C4 y C5, presentaron contenidos máximos de carburo del 45 y 55%, respectivamente. La resistencia al impacto de las aleaciones estudiadas fue del orden de los 3 Joules, resultando inferior a las coladas con grafito nodular, aún en zonas próximas al enfriador y sin grafito libre. La profundidad de la zona acoquillada, para una caída del 30% en el contenido promedio de carburos, fue del orden de los 35 mm, resultando de interés para su aplicación en piezas de sacrificio, que pierden un gran volumen por desgaste. La presencia del carburo como fase de refuerzo resultó en un considerable aumento de la resistencia a la abrasión.

**Palabras claves:** Fundición de hierro, Enfriamiento Rápido, Carburos, Impacto, Desgaste, Abrasión



## INTRODUCCIÓN

Los elementos de máquina contruidos en fundición de hierro que sufren abrasión severa, a menudo son sometidos a tratamientos superficiales, con el objetivo de mejorar su resistencia al desgaste.

La tecnología actual, permite la práctica de tratamientos superficiales por refusión mediante láser, GMAW, arco transferido por plasma (PAW), etc., los que promueven la precipitación de carburos a la vez que eliminan total o parcialmente el grafito libre. El uso de la refusión mediante PAW en la fundición laminar fue estudiada por Dai, et al. [1], observando que el volumen de carburos de hierro, la dureza y la resistencia al desgaste aumentan con la disminución del contenido de Si. También se utilizó el proceso GMAW de refusión [2] para obtener el endurecimiento superficial de fundición de hierro con grafito laminar, observándose que la tasa de desgaste por abrasión se reduce al ~25%. El estudio de la resistencia al desgaste por abrasión, en un sistema pin-on-disk, para una Fundición Nodular (FN) acoquillada [3], mostró que la resistencia aumenta con el contenido de Ni y con la velocidad de enfriamiento, es decir con el contenido de la fase carburo.

Si bien estas técnicas son efectivas frente a determinados tribosistemas, la profundidad afectada por el tratamiento es limitada y a menudo poseen un costo elevado. Además, como sucede con el aporte de recubrimientos duros, pueden ser difíciles de controlar e inducir la aparición de fisuras.

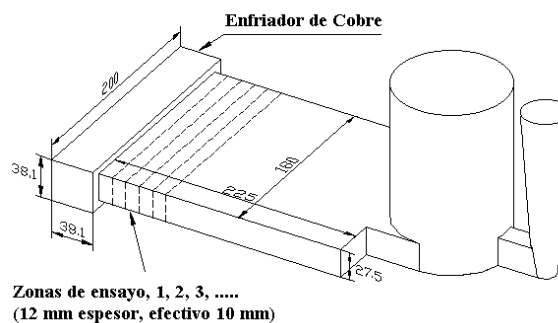
El mismo principio utilizado para promover la eliminación total o parcial del grafito libre y la precipitación de carburos en el tratamiento superficial, es decir la presencia de un fuerte gradiente térmico en la solidificación, puede ser utilizado en la fabricación por colada de una pieza. Mientras que en la refusión el sustrato sólido actúa como sumidero de calor para promover la precipitación de carburos, en la fabricación por colada de una pieza pueden utilizarse enfriadores metálicos insertos en el molde de arena, con el objetivo de promover la precipitación de carburos en las superficies de interés.

El uso de enfriadores permite obtener una profundidad de acoquillamiento, muy superior a la observada en los procesos de refusión [5-7], siendo ventajoso su uso en piezas de sacrificio que sufren una importante pérdida de volumen por desgaste, gracias a una excelente resistencia a la abrasión [7].

En el presente trabajo se evaluó la resistencia al desgaste e impacto de dos aleaciones de fundición gris (grafito laminar) acoquillada hipoeutéctica, una sin alear y otra aleada. Los resultados obtenidos permitirán determinar la influencia de la morfología del grafito sobre la resistencia al impacto y sobre la resistencia a la abrasión. Además, la colada de fundición gris puede no requerir del tratamiento en cuchara, permitiendo obtener un material que, a escala industrial posee un costo del orden de 60 a 75% el de la fundición con grafito esferoidal..

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Las coladas empleadas fueron obtenidas en la Planta Piloto de la Div. Metalurgia - INTEMA, con un horno de inducción de 3 KHz y 50 kg de capacidad. La totalidad del silicio fue incorporado al metal base. En la Figura 1 se muestra el diseño del modelo de placa empleado [4-6] para la obtención de probetas, donde se incluye un enfriador de cobre de 37x37x200 mm en el extremo, para aumentar la velocidad de enfriamiento.



**Figura 1.** Esquema del modelo y enfriador de cobre utilizados, mostrando los cortes realizados para la extracción de muestras, zonas 1 a 7.

La placa obtenida permite la extracción de secciones paralelas al enfriador de 25x180x11 mm de espesor, identificadas desde 1 contra el enfriador y como 2, 3, 4, 5, 6 y 7 a medida que se alejan del mismo.

La composición química de las coladas, denominadas en adelante C4 y C5, se verificó mediante un espectrómetro de emisión óptica con excitación por chispa. Los valores medidos se listan en la Tabla I.

	C	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Ni	S	P	CE
<b>C4</b>	3,22	1,68	0,28	--	---	---	---	0,28	0,04	3,78
<b>C5</b>	3,18	2,04	0,58	---	0,69	0,56	0,63	0,04	0,04	3,86

**Tabla I.** Composición química de las coladas C4 y C5. CE, carbono equivalente.

Para el estudio macro y microscópico de las muestras, las mismas fueron preparadas aplicando técnicas convencionales de corte, desbaste y pulido mecánicos y atacadas químicamente con nital al 2%. La cuantificación de los carburos se realizó con ayuda de software para análisis de imágenes. El contraste entre la fase carburo y la matriz se obtuvo mediante el ataque con persulfato de amonio al 10%. El perfil de dureza [HRC] fue relevado en función de la distancia al extremo acoquillado (d).

Los ensayos de abrasión se llevaron a cabo en el laboratorio del Grupo Tribología, de acuerdo a la norma ASTM G 65, mediante el procedimiento A. El desgaste relativo,  $E$ ,

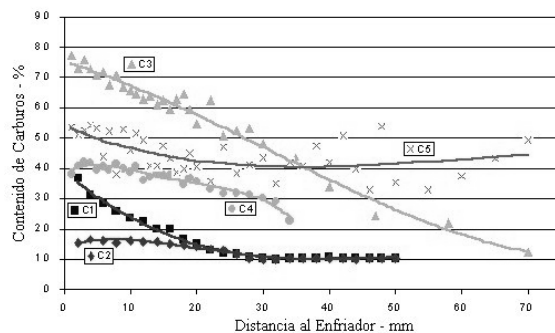
fue calculado como el cociente entre las variaciones de peso del material de referencia (acero SAE 1010) y la del material estudiado.

Para evaluar la resistencia al impacto, se prepararon cuatro probetas prismáticas sin entalla de 10x10x55 mm por zona. Los ensayos se realizaron con un péndulo Charpy, de acuerdo a la norma ASTM E 23.

## RESULTADOS Y DISCUSION

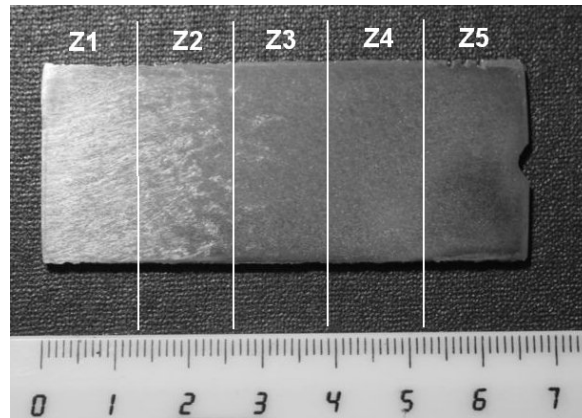
El análisis de la microestructura muestra que para la colada denominada C4, la precipitación de carburos asciende a 42% sobre la superficie acoquillada, Figura 2, disminuyendo hasta un valor estable (~10%) más allá de los 30 mm. La matriz resultó perlítica en las zonas Z1-Z3, observando un incremento gradual de ferrita a partir de la zona Z4. La Fig.2, muestra además los contenidos de carburo para las coladas C1, C2 y C3, correspondientes a composiciones de FN hipoeutéctica sin alear, eutéctica aleada e hipoeutéctica aleada, respectivamente.

La colada C5 mostró un contenido máximo de carburos de ~55% contra el enfriador sobre la superficie, mientras que lejos del enfriador se observó una gran dispersión de los valores. La precipitación de carburos debida a la presencia del enfriador, disminuye con la distancia al mismo; pasando a tener relevancia los carburos formados por la presencia de elementos de aleación (Cr y Mn), aproximadamente 40%. En la colada C5 la matriz resultante fue de tipo perlítica en todas las zonas debido a la presencia de elementos perlitizantes, tales como Cu y Ni.

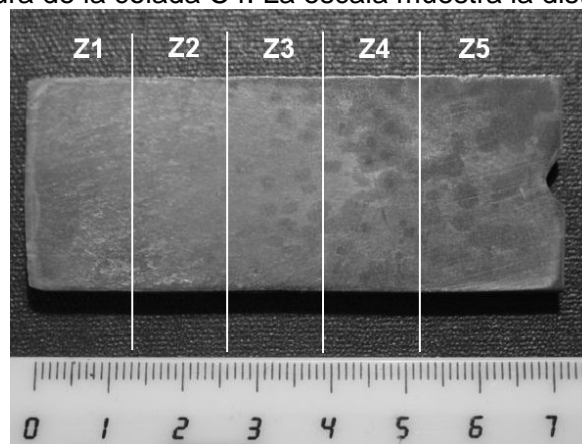


**Figura 2.** Porcentaje de carburos en función de la distancia al enfriador.

En la Figura 3, se observa la macrografía correspondiente a la colada C4, mostrando en la zona Z1 un crecimiento columnar, por influencia del enfriador de Cu. En la zona Z2 se observa la aparición gradual de la estructura perlítica de la matriz (si bien en la micro-estructura esta fase está presente desde la zona próxima al enfriador) acompañando la disminución de carburos (Fig.2). La macro-estructura muestra a la zona Z2 como una región de transición entre el enfriamiento gobernado por el enfriador con una importante precipitación de carburos y el enfriamiento gobernado por el molde de arena y menor velocidad de enfriamiento, donde la microestructura resultó perlítica, mientras que en C5, la transición se observó en Z3 y Z4, Figura 4.



**Figura 3.** Macroestructura de la colada C4. La escala muestra la distancia desde el enfriador.

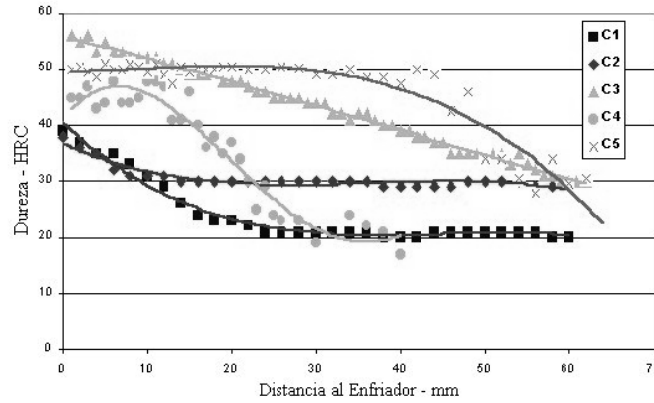


**Figura 4.** Macroestructura de la colada C5. La escala muestra la distancia desde el enfriador.

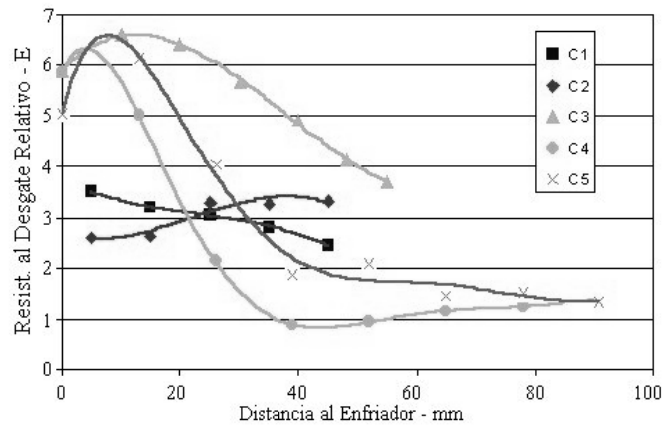
La Figura 5 muestra los perfiles de “dureza vs. d”. El porcentaje de carburos y las macrografías observadas en las Figs.3 y 4, son consecuentes con las curvas de dureza, donde se observan valores máximos del orden de ~44 y ~54 HRC, para las coladas C4 y C5, respectivamente.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de desgaste por abrasión, expresados como la resistencia al desgaste relativo (E) en función de “d”. La colada C4, muestra un comportamiento frente al desgaste dependiente de la distribución de la fase carburo, tanto en Z1 como en la zona de transición Z2 hasta estabilizarse en la zona Z3 y las más alejadas.

Para la colada C5, se observó un mejor comportamiento frente al desgaste influenciado por la presencia de elementos formadores de carburos, así como de elementos perlitizantes, los que le otorgan a la microestructura un mejor comportamiento frente a la abrasión.



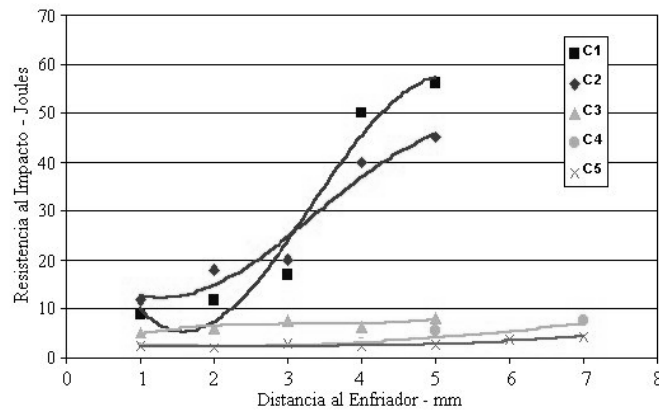
**Figura 5.** Dureza HRC de las diferentes coladas vs. la distancia al enfriador.



**Figura 6.** Resist. al desgaste relativo (E) vs. distancia al enfriador. Ensayo según norma ASTM G 65.

Los valores de energía absorbida en ensayos de impacto (resiliencia) son mostrados en la Figura 7, donde se observan valores que resultaron en todos los casos inferiores a los obtenidos para las coladas C1, C2 y C3, todas con morfología de grafito nodular. Este comportamiento está motivado por dos razones: en las zonas cercanas al enfriador, por la alta presencia de carburos; en las zonas alejadas, por la interconexión de las láminas de grafito.

Esta respuesta frente al impacto deberá ser tenida en cuenta a la hora de seleccionar el material para aplicaciones que estén expuestas a sollicitaciones severas de impacto, sobre todo en aquellas piezas que se utilizan en movimiento de tierras.



**Figura 7.** Resist. al impacto en función de la distancia al enfriador. Ensayo Charpy, probeta sin entalla.

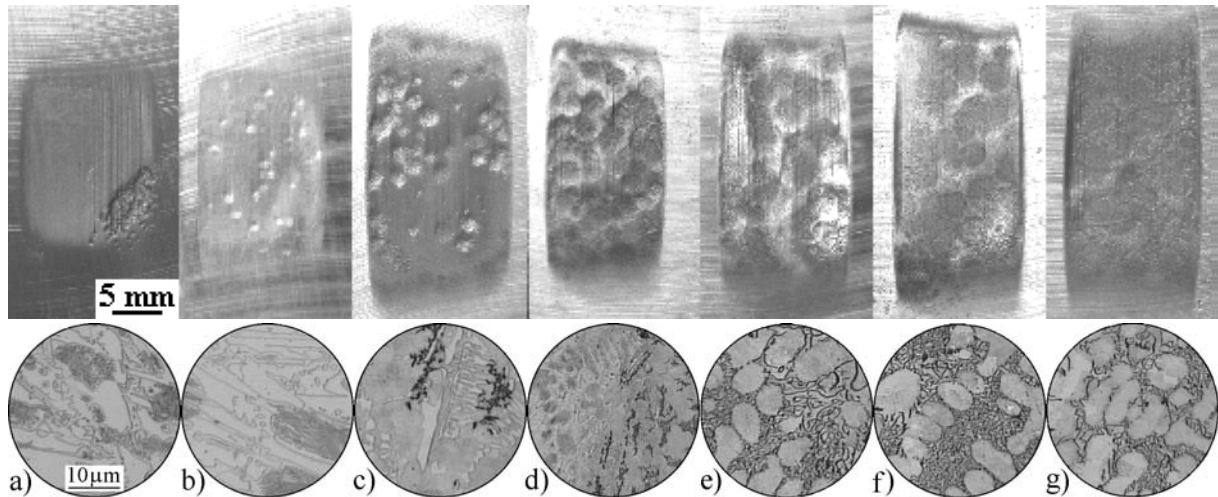
Las superficies de fractura de las probetas Charpy, fueron organizadas según se obtuvieron de la placa colada, Figura 8. Se observa a la izquierda de la figura las superficies brillantes correspondientes a la fractura por clivaje de las zonas acoquilladas, Z1 y Z2. La apariencia de la fractura cambia gradualmente a una de tipo opaca y fibrosa con la disminución del contenido de carburos, zona Z3 en adelante.



**Figura 8.** Aspecto de las superficies de fractura, mostrando un mapa de comportamiento para diferentes distancias al enfriador.

La heterogeneidad en la macroestructura y en la superficie de fractura del material, se observa también en las huellas de desgaste, Figura 9. Esta característica resulta de importancia para explicar los resultados de la Fig.6, donde se observa que las coladas C4 y C5 presentan una resistencia al desgaste relativamente baja, inclusive inferior al

material de referencia, ( $E \sim 1$ ) debido a un efecto concentrador del desgaste producido por la morfología del grafito. No obstante, debe considerarse que este fenómeno se vuelve importante para  $d > 20$  mm.



**Figura 9.** Aspecto de las huellas de desgaste y su correlación con la microestructura de las distintas zonas evaluadas. Colada C5.

## CONCLUSIONES

Las fundiciones laminares hipoeutécticas presentan un buen comportamiento frente al desgaste por abrasión, cuando el contenido de carburos es elevado. Es interesante observar que la resistencia al desgaste relativo fue inferior a la unidad ( $E < 1$ ) para  $d > 20$  mm debido a la influencia que la morfología del grafito posee en el micro-mecanismo de abrasión.

Si bien el comportamiento frente al impacto no es elevado, como es de esperar para este tipo de microestructura, se obtuvieron valores de referencias que permiten determinar el campo de aplicación de este material. No obstante, se observa que cuando el contenido de carburo es elevado, la morfología de grafito influye poco en la resistencia al impacto.

Considerando que la fundición de hierro con grafito laminar es de menor costo que la esferoidal, esta variante de material puede resultar de gran interés en aplicaciones que requieran resistencia a la abrasión y un volumen importante de material de sacrificio.



## REFERENCIAS

1. Dai, W. S., Lui, T. S., Chen, L. H., International Journal on Cast Metals, 12, 1999, pp. 119-125.
2. Dai, W. S.; Lui, T. S.; Chen, L. H.; International Journal on Cast Metals, 12, 1999, pp.233-240.
3. Chithambaram, S.; Chinnathambi, K.; Krishna Kumar, R.; Prabhakar, O.; AFS Transactions, 1987, pp.401-410.
4. Hemanth, J.; Wear, 21, 2000, pp.139-148.
5. Distéfano, A., Martínez Gamba, M., Dommarco, R., 2000, Jornadas Metalúrgicas SAM 2000, Univ. Nac. del Comahue, Neuquén, Argentina.
6. Hemanth, J., Materials Science and Technology, 15, 1999, pp.878-884.
7. Ceccarelli, B.; Dommarco, R.; Martinez, R.; Martinez Gamba, M.; Wear 256 (2004) 49-55.