

Solidificación de una aleación empleada en la industria automotriz

E. Velasco*, S. Cano*, J. Talamantes*
R. Colás**, S. Valtierra* y J.F. Mojica*

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados encontrados al estudiar la solidificación de una aleación de aluminio empleada en la manufactura de componentes automotrices. La aleación solidifica en forma unidireccional sobre una placa de acero instrumentada para capturar en forma automática tanto su evolución térmica como la del lingote de aluminio formado. La modelación del flujo de calor en la placa permite encontrar que los coeficientes de transferencia de calor entre el lingote y la placa dependen de los mecanismos y cinética de solidificación del aluminio.

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz se encuentra entre las más desarrolladas, tecnológicamente hablando, en nuestro país gracias a la apertura de los mercados y la imposición de normas y estándares de fabricación y desempeño cada vez más altos. En este sector destaca la participación de Nemak, S.A. de C.V., que compite exitosamente en el mercado mundial de cabezas y blocks vaciados en aluminio, habiendo alcanzado a ser en la actualidad la mayor planta en su tipo en el Continente Americano. La competencia de esta compañía la constituyen un buen número de empresas establecidas alrededor del mundo, lo que fuerza al continuo desarrollo de productos y procesos.

Esta búsqueda por la mejora continua ha propiciado el acercamiento entre la mencionada empresa y el Postgrado en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, que ha dado como resultado la colaboración en diversos proyectos de investigación, entre los cuales se encuentra el presente, que tiene como objetivo describir los

resultados y conclusiones que se han encontrado al estudiar las condiciones de transferencia de calor presentes durante la solidificación de la aleación de aluminio empleada por la empresa.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los estudios de solidificación de la aleación de aluminio se llevaron a cabo con un dispositivo experimental que consiste en una placa de acero sobre la que se coloca una lingotera en la que se vacía la aleación de aluminio que solidifica en forma unidireccional. La solidificación de la pieza, así como la evolución térmica de la placa se registran mediante la inserción de termopares a diferentes alturas. La superficie superior de la placa de acero fue recubierta con pinturas a base de grafito o de mica y se dispuso de enfriamiento por agua o al aire en su superficie inferior. La fuerza electromotriz generada por los termopares se capturó con un sistema computacional especialmente diseñado para el caso. En la Fig. 1 se muestra, en forma esquemática, el arreglo experimental.

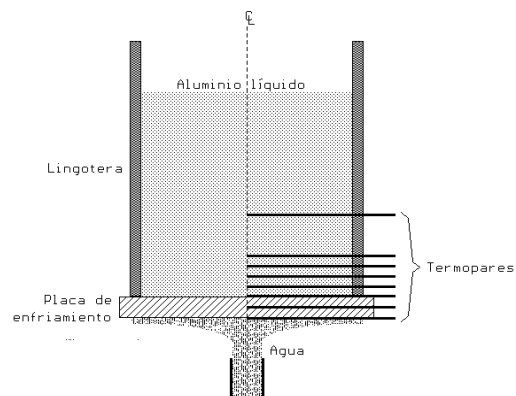


Fig. 1. Diagrama esquemático del dispositivo experimental en que se muestra la posición en que se insertaron los termopares.

*

Corporativo Nemak, S.A. de C.V.

**

Doctorado en Ingeniería de Materiales, FIME-UANL.

Tabla I. Composición química (% en peso) de la aleación de aluminio.

Prueba	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr
I	7.79	3.76	0.859	0.491	0.376	0.749	0.172	0.0127
II	7.93	3.68	0.912	0.540	0.378	0.663	0.183	0.0175
III	8.08	3.63	0.843	0.438	0.353	0.668	0.191	0.0102

Tabla II. Condiciones de prueba.

Prueba	Enfriamiento	Temperaturas [C]			Tiempo [seg]	
		vaciado	agua	ambiente	vaciado	total
I	Aire	635	-	35	12	1650
II	Agua	649	35	31	11	2800
III	Agua	696	30	30	11	3100

La composición química de las aleaciones se reporta en la Tabla I en tanto que las condiciones de prueba aparecen en la Tabla II.

La cinética de solidificación fue estudiada por medio de la tasa instantánea de enfriamiento (dT/dt) [1-3], suponiéndola igual a la primera derivada de una serie de polinomios de segundo grado ajustados por mínimos cuadrados a un número no de puntos experimentales [4]. Los puntos críticos de transformación se dedujeron al graficar la tasa de enfriamiento en función del tiempo y de la temperatura [4].

La conducción de calor dentro de la placa de acero se calculó por medio de un modelo de diferencias finitas, método explícito, que divide a la placa en m elementos o nodos de igual volumen

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2 muestra la evolución térmica durante la prueba identificada como **II**, ver Tablas I y II; dos de las ocho curvas (aquellas por debajo de los 150°C) corresponden a las registradas por los termopares colocados al centro y en contacto con

la superficie inferior de la placa de acero, en tanto que los otros seis corresponden a los datos tomados por los que fueron colocados en la lingotera (en contacto con la superficie de la placa y a 10, 20, 40, 80 y 120 mm de ésta). Cabe mencionar que el termopar en contacto con la superficie inferior de la placa se protegió del enfriamiento directo del agua mediante la colocación de una arandela.

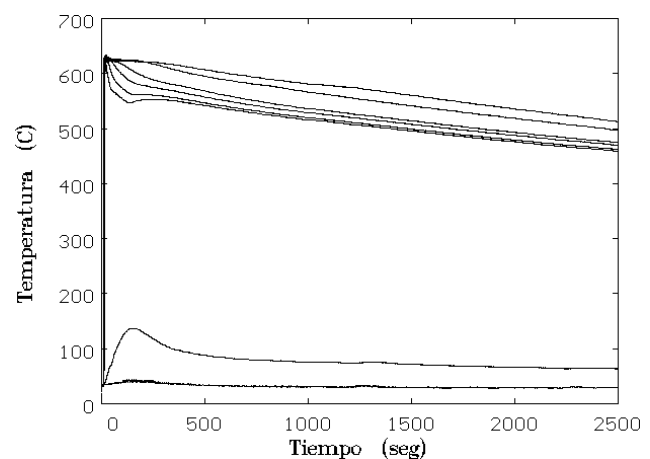


Fig. 2. Temperaturas registradas durante la ejecución de la prueba identificada como **II** en las Tablas II y III.

La Fig. 3 muestra la evolución térmica en la superficie inferior y al centro de la placa de acero en las tres pruebas realizadas. Es interesante observar como la temperatura de la superficie inferior prácticamente no cambia cuando se enfría con agua (curvas **c** y **e**), en contraste con el ascenso que se aprecia en la prueba dejada al aire (curva **a**).

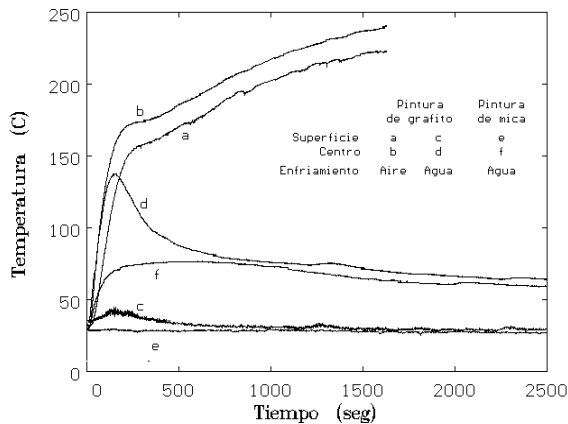


Fig. 3. Temperaturas registradas por los termopares localizados al centro y en contacto con la superficie de la placa.

En la Fig. 4 se muestran las temperaturas registradas por el termopar localizado sobre la superficie superior de la placa en las tres pruebas realizadas. La curva de la primera prueba (**a**) se grafica solamente hasta los 600 segundos puesto que el termopar falló durante el transcurso del experimento.

Se observa claramente como la solidificación transcurre a mayor velocidad en la prueba **II** en comparación con la **I** y **III**, debido al enfriamiento al aire en el primer caso y al empleo de un recubrimiento de menor conductividad térmica en el segundo.

Un aspecto digno de tomar en cuenta en la Fig. 4 es el cambio en pendiente y curvatura en las

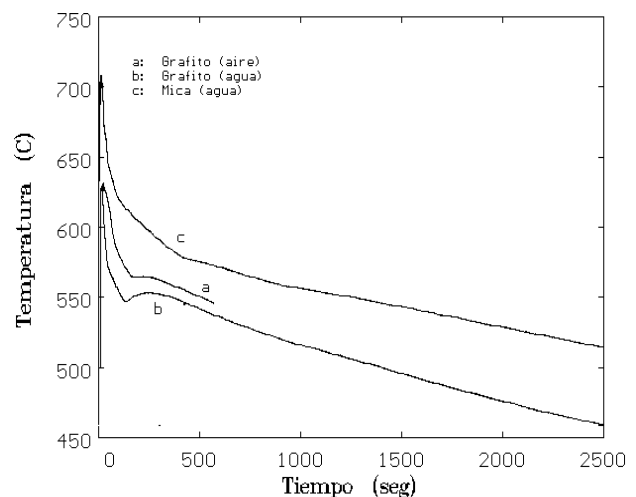


Fig. 4. Temperaturas registradas por el termopar localizado sobre la placa.

diferentes curvas, especialmente en la marcada como **b**, que exhibe el incremento característico de la reacción correspondiente a la formación del eutéctico de aluminio y silicio [1,3].

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor en la interfase placa y la aleación de aluminio se llevó a cabo por medio de un modelo de diferencias finitas, encontrándose la dependencia que se muestra en la Fig. 5 y que es capaz de reproducir en forma exitosa las temperaturas registradas por los termopares insertos y en contacto con la placa. Los valores recomendados por un desarrollador de modelos comerciales [7] se incluyen a forma de comparación.

El modelo de transferencia de calor supone que el coeficiente en la interfase depende de la cinética de solidificación, puesto que su valor se mantiene constante mientras la aleación se encuentra líquida, incrementando su valor tan pronto las dendritas de aluminio primario empiezan a crecer. Se supone que el coeficiente se reduce al momento de que se detecta el inicio de la formación del eutéctico y, aún más, al concluir ésta.

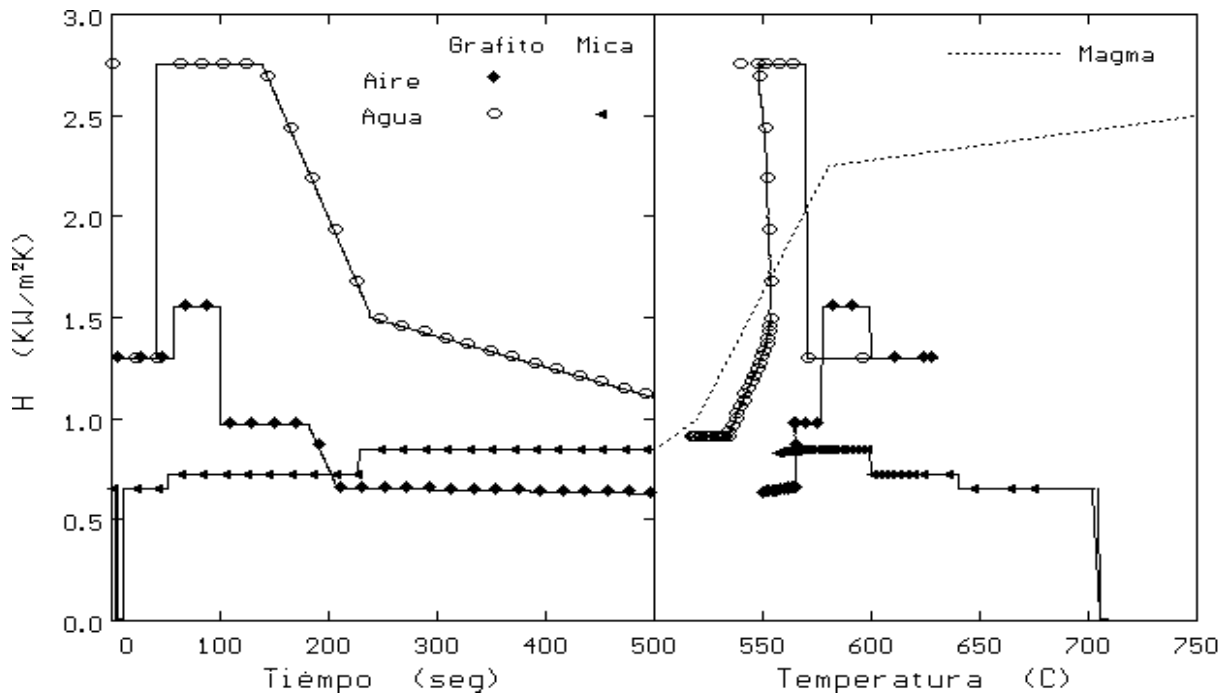


Fig. 5. Coeficientes de transferencia de calor requeridos para reproducir las temperaturas

Las suposiciones mencionadas en el párrafo anterior se pueden justificar con ayuda del diagrama que se presenta en la Fig. 6.

Las bajas tasas de transferencia de calor encontradas en los períodos iniciales pueden ser debidas a la menor conductividad térmica del líquido [8] en comparación con la del sólido (a). La transferencia de calor se incrementa conforme se genera la red dendrítica (b) dado que la nucleación acontece en la interfase y, a medida que crecen los brazos secundarios, la tasa de transferencia de calor se incrementa. La reducción en el coeficiente a medida que solidifica el eutéctico (c) puede deberse a la contracción de la porción solidificada, a la generación de una capa de menor conductividad térmica (puesto que el Si

es peor conductor que el Al) o al calor desprendido por la reacción. El coeficiente disminuye aún más una vez que solidifica la interfase completa y el metal se ha contraído, lo que da origen a una capa aislante de aire [9].

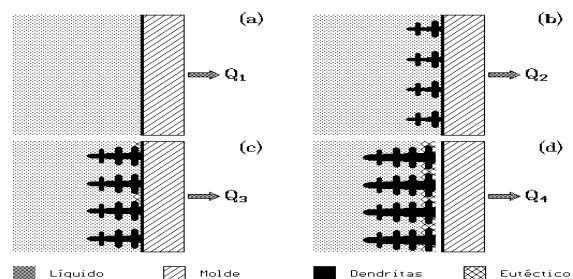


Fig. 6. Mecanismos de solidificación que afectan la tasa de transferencia de calor al molde.

CONCLUSIONES

El diseño experimental realizado permite estudiar la solidificación de aleaciones de aluminio en condiciones unidireccionales. Estas condiciones se aseguran al aislar por completo las paredes laterales de la lingotera, con lo que se permite que el calor fluya a través de una placa de acero, previamente instrumentada mediante la inserción de una serie de termopares.

Se concluye que la cinética de solidificación afecta la tasa de extracción de calor, encontrándose que los valores más elevados coinciden con la formación de la red dendrítica de aluminio primario. Los valores del coeficiente disminuyen conforme la solidificación del eutéctico toma lugar y, aún más, cuando la superficie de la pieza vaciada solidifica por completo.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el CONACYT y las facilidades otorgadas por la empresa Nematik, S.A. de C.V.

REFERENCIAS

1. L. Backerud y E. Krol, Solidification Characteristics of Aluminum Alloys. Vol. 2: Foundry alloys, Skan Aluminum, Oslo, 1990.
2. E. Fras, W. Kapturkiewicz, A. Burbielko y H.F. López, AFS Trans., 101, 505 (1993).
3. J.H. Beynon y R. Colás, Metal. Mater., 1 (3), (mar. 1994).
4. R.L. Burden y J.D. Faires, Numerical Analysis, PWS, Boston, 1985.
5. C.M. Sellars y J.A. Whiteman, Met. Techn., 8, 10 (1981).
6. L.A. Leduc, Tesis Doctoral, Universidad de Sheffield, GB, 1980.
7. Magmasoft User's Guide, Magma Foundry Technologies, Inc., Arlington Heights, IL.
8. R.W. Powell, C.Y. Ho y P.E. Liley, J. Phys. Chem. Ref. Data, 1, 279 (1972).
9. D. Argo, R.A.L. Drew y J.E. Gruzleski, AFS Trans., 95, 455 (1987).