

MAT

Serie 

Conferencias, seminarios
y trabajos de Matemática

ISSN: 1515-4904



*VI Seminario sobre
Problemas de
Frontera Libre y
sus Aplicaciones.*

Tercera Parte

Departamento
de Matemática,
Rosario,
Argentina
2001

UNIVERSIDAD AUSTRAL

FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES



MAT

SERIE A : CONFERENCIAS, SEMINARIOS Y TRABAJOS DE MATEMÁTICA

No. 5

VI SEMINARIO SOBRE PROBLEMAS DE FRONTERA LIBRE Y SUS APLICACIONES Tercera Parte

Domingo A. Tarzia (Ed.)

INDICE

- **Adriana C. Briozzo – Domingo A. Tarzia**, “On a two-phase Stefan problem with nonlinear thermal coefficients”, 1-10.
- **Germán Torres – Cristina V. Turner**, “Métodos de diferencias finitas para un problema de Bingham unidimensional”, 11-26.
- **Analía Gastón – Gustavo Sánchez Sarmiento – Horacio Reggiardo**, “Un problemas de frontera libre: Fusión de una vaina de acero dentro de una cuchara de acería”, 27-32.
- **Ma. Fernanda Natale – Domingo A. Tarzia**, “An exact solution for a one-phase Stefan problem with nonlinear thermal coefficient”, 33-36.
- **Claudia Lederman – Juan L. Vazquez – Noemí Wolanski**, “Uniqueness of solution to a free boundary problem from combustion with transport”, 37-41.

Rosario, Octubre 2001

UN PROBLEMA DE FRONTERA LIBRE: FUSIÓN DE UNA VAINA DE ACERO DENTRO DE UNA CUCHARA DE ACERIA

Analía GASTÓN^{*}, Gustavo SÁNCHEZ SARMIENTO^{}, Horacio REGGIARDO^{***}**

^{*} Consejo de Investigaciones, Universidad Nacional de Rosario.
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario. Argentina.

^{**} Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
Av. Paseo Colón 850, (1063) Buenos Aires, Argentina.

^{***} STEIN S.A.C.I.F., Santiago de Chile 6463, (1408) Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN. Se describe un modelo para analizar la fusión de minerales envainados sumergidos en cucharas con acero líquido. La aplicación del mismo permite determinar el tiempo de fusión y profundidad de penetración en la cuchara en función de la velocidad de inmersión, dimensión de la vaina y grado de sobrecalentamiento del baño de acero líquido. La solución numérica emplea una formulación en diferencias finitas implícita iterativa en la cual la posición del frente de solidificación se actualiza basándose en la resolución del balance de energía en la interfase sólido-líquido.

Palabras claves: Metalurgia de cuchara, Minerales envainados, Modelización

ABSTRACT. A model to analyze the melting of cored wire minerals immersed into ladles with liquid steel is described. Its application allows the determination of penetration depth and melting time as a function of the wire feed rate, wire dimension and degree of superheat of the steel bathe in the ladle. The model uses an iterative implicit finite difference formulation, in which the position of the solidification front is updated, based on the resolution of the energy conservation at the solid- liquid interface.

Key words: Ladle metallurgy, Cored wire injection, modelization

INTRODUCCIÓN

En la fabricación de aceros y fundiciones de hierro, la desulfurización, desoxidación y modificación de inclusiones del metal líquido se realiza mediante la adición de ciertos minerales como SiCa, FeCa y FeTi, cuando el mismo se encuentra dentro de una cuchara.

Una forma habitual de adición es la introducción continua dentro del metal líquido de una vaina delgada de acero en cuyo interior ha sido almacenado el mineral. Apenas sumergida, se forma una capa concéntrica de acero solidificado sobre la superficie de la vaina debido a la rápida extracción de calor de dicho baño. El espesor de esta capa crece inicialmente hasta alcanzar un valor máximo, decreciendo luego hasta desaparecer. En ese instante el mineral es liberado abruptamente en el metal líquido. La velocidad con la que la vaina se introduce dentro de la cuchara debe ser tal que, en estado estacionario, el tiempo total transcurrido entre la introducción de una dada sección de la vaina y la finalización de la fundición de ésta, permita que la liberación del mineral se produzca a una profundidad adecuada dentro de la cuchara. En la figura 1 se muestra un esquema del proceso.

La profundidad de penetración depende básicamente de las dimensiones de la vaina, del grado de sobrecalentamiento y de la velocidad de inmersión, de manera que para un adecuado control del proceso deben conocerse con la mayor precisión cómo estas variables influyen en el proceso de fusión. El modelo computacional que se describe en este trabajo permite analizar el efecto de las variables mencionadas en este proceso.

MODELO MATEMÁTICO Y SU SOLUCION NUMÉRICA

Se adopta un modelo unidimensional que considera a la vaina como un cilindro infinito en el cual la energía fluye en dirección radial durante la fusión. El mismo consta de dos capas concéntricas, una exterior de acero y otra central que contiene el mineral a adicionar. En la interfase la energía es suministrada por convección forzada debido a la velocidad relativa entre el fluido y la vaina. Dado que el volumen del envainado es despreciable frente al del líquido contenido en la cuchara, se supone que el baño mantiene una temperatura constante durante el proceso de fusión.

Las ecuaciones que gobiernan la evolución de temperatura en la vaina son las siguientes:

a) Dentro del material de relleno:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_m(T) \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] = c_m(T) r_m(T) \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad 0 < r < R_{int} \quad (1)$$

con las condiciones de contorno :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (2)$$

$$k_m \frac{\partial T}{\partial r} = k_{as} \frac{\partial T}{\partial r} \quad r = R_{int} \quad (3)$$

b) Dentro de la vaina de acero:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_{as}(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] = c_{as}(T) r_{as}(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad , \quad R_{int} < r < S(t), \quad t > 0 \quad (4)$$

sujeta a la condición de contorno (3) y a la condición de Stefan en la interfase sólido-líquido:

$$T(S(t),t) = T_f, \quad k_{as} \frac{\partial T}{\partial r}(S(t),t) - h_f (T_{mp} - T_f) = r_{as} L \dot{S}(t) \quad , \quad r = S(t), \quad t > 0 \quad (5)$$

siendo la condición inicial:

$$T(r,0) = T_o \quad , \quad 0 \leq r \leq R_{ext} = S(0) \quad (6)$$

$$T(r,0) = T_f \quad , \quad r \geq R_{ext} \quad (7)$$

El coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la vaina (eq. (5)) depende del tipo de flujo que impone las condiciones de inmersión, disponiendo de diferentes correlaciones para su evaluación [1, 2].

La solución numérica de las ecuaciones precedentes se basa en un esquema implícito iterativo en diferencias finitas, descrito en detalle en [3] y [4]. El problema tratado aquí corresponde a un cambio de fase isotérmico, en el cual la energía en la interfase sólido-líquido se transfiere por convección. El esquema empleado considera la discontinuidad de la derivada de la temperatura en el frente de solidificación, debido al cambio en las propiedades térmicas de una fase a otra. La temperatura del volumen de control donde se produce el cambio de fase

se determina por interpolación, una vez conocidas las temperaturas de los volúmenes situados a ambos lados y la posición del frente de solidificación.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados del modelo precedente fueron comparados con mediciones experimentales y con los resultados numéricos de otro modelo análogo descrito en [2]. El dispositivo experimental se muestra en la figura 2. La experiencia consistió en la fusión de una vaina rellena con SiCa, de diámetro exterior 17 mm y espesor 2.5 mm, que se mueve transversalmente dentro de una cuchara. La vaina estaba provista con dos termocuplas que registraban la temperatura en dos puntos interiores del mineral de relleno.

La figura 3 muestra la dependencia del tiempo de fusión en función del sobrecalentamiento del baño para una velocidad de inmersión de la vaina de 1 m/s. La figura 4 ilustra el tiempo de fusión en función de la velocidad de la vaina, para una temperatura del acero líquido de 1600°C. De estas gráficas se concluye que la concordancia entre ambos modelos y la experiencia es satisfactoria.

La figura 5 muestra cómo evoluciona el espesor del envainado durante la inmersión en la cuchara. Se observa un rápido crecimiento durante los instantes iniciales de la inyección, llegando casi a duplicar su valor inicial. Para un dado espesor y diámetro exterior de la vaina un aumento del 30% en la velocidad de inyección (de 1,5 a 2 m/s) reduce en un 27% aproximadamente el tiempo de fusión.

La figura 6 (a), (b) y (c) resume los resultados obtenidos respecto a la fusión de vainas rellenas con SiCa, que se emplean en la industria local. Los cálculos corresponden a un espesor de 0.4 mm y un diámetro exterior de 13, 16, y 21 mm, respectivamente. Se consideró un rango de velocidades de 1 a 5 m/s y de sobrecalentamientos del baño de acero de 30°C, 50°C, 70 °C y 100 °C por encima de la temperatura de líquidus de 1495 °C. Un sobrecalentamiento de 30°C (caso (a)) resulta insuficiente para fundir el envainado a una profundidad adecuada. En la práctica se busca que el mineral sea liberado lo más profundamente dentro de la cuchara, pero para este caso, la profundidad de penetración supera la altura promedio del acero en el recipiente, que para cucharas de 190 a 200 tn de acero, puede estimarse de 3.5 y 4 m. Para un sobrecalentamiento de 100°C, la liberación del mineral es muy temprana. El envainado fundiría a una profundidad adecuada para un sobrecalentamiento entre 60°C y 70°C. Se observa además que estos resultados no dependen fuertemente de la velocidad de inmersión.

La figura 7 compara la profundidad de penetración de los tres envainados con diferente diámetro exterior (13, 16 y 21 mm) e igual espesor (0.4 mm) para sobrecalentamientos de 30°C, 50°C, 70°C y 100°C. En estos ejemplos se consideró que la conductividad del relleno corresponde a la del material en polvo [2], resultando ésta de bajo valor. Es interesante destacar que al aumentar el diámetro exterior y mantener constante el espesor de la camisa de acero, se produce un aumento de la resistencia interna del mineral, mientras que disminuyen las resistencias de la vaina y la resistencia exterior, resultando que para una adecuada combinación del valor del coeficiente de transferencia de calor (dependiente de la velocidad de inmersión) y del sobrecalentamiento del acero líquido, las vainas de mayor diámetro funden primero. Este fenómeno desaparece como se observa en la figura 8 cuando se toma como conductividad del relleno la del mineral sólido que es mucho mayor que la del mineral en polvo [1].

En la figura 9 se presenta un ejemplo de cómo se modifican los resultados al variar el espesor de la vaina. Un aumento del espesor del 80% (de 0.4 a 0.72 mm) modifica la penetración de 2,65 a 4 m, a la velocidad de 1m/s, y de 3 a 4.90 m, a la velocidad de 5 m/s.

CONCLUSIONES

Se describió un modelo numérico para analizar la fusión de minerales envainados inyectados en una cuchara con acero líquido. El tiempo de fusión de la camisa de acero y la profundidad a la cual los minerales son liberados dependen del diámetro y espesor de las vainas, del sobrecalentamiento del metal líquido y de la velocidad de inyección. De este conjunto de variables, el sobrecalentamiento es el que tiene mayor influencia en el tiempo del proceso.

Generalmente, la máxima penetración está fijada, a priori, por las dimensiones de la cuchara y el sobrecalentamiento del baño, por el tipo de tratamiento metalúrgico. En consecuencia, deben seleccionarse las dimensiones y la velocidad de inyección en función de estos parámetros, de manera que la adición de los minerales resulte eficiente. Por medio de la simulación numérica pueden analizarse diferentes combinaciones, generando ábacos de operación que permitan identificar aquellas que aseguren un adecuado control del proceso en cada planta en particular.

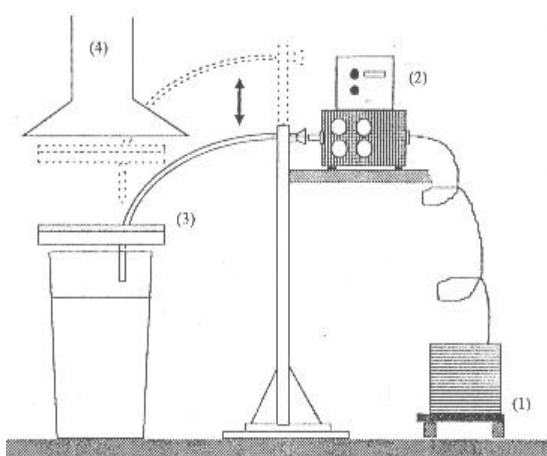


Fig.1. Esquema básico de trabajo para la inyección de minerales envainados
(1) Bobina (2) Máquina de inyección (3) Tubo guía (4) Campana de extracción de humos

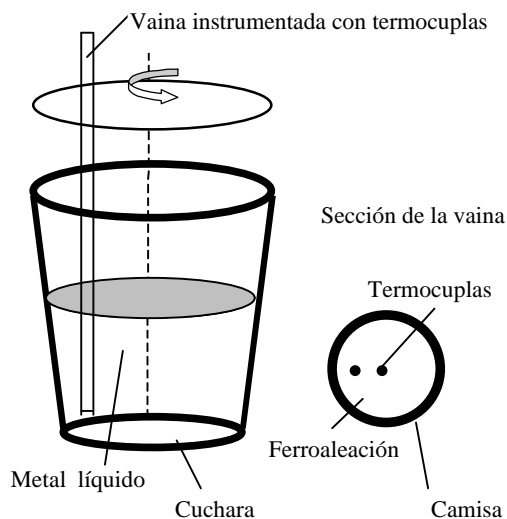


Fig.2: Dispositivo experimental para validación del modelo para la inyección de minerales envainados

REFERENCIAS

- [1] Y.E. Lee, “A model study of CaSi cored wire injection”, Proc. of the CIM 1990, Int. Symposium on developments in Ladle Steelmaking and Continuous Casting, G.D. Lawson (Ed.), 1990, 154-168.
- [2] M. Rebière, Y. Fautrelle and Y. Du Terrail, “Models and experiments on core wire dissolution in ladle metallurgy”, 6th Int. Conf. on Refining Processes, Scanninject VI, Mefos, Lulea, Sweden, 1992, 267-283.
- [3] A. Gastón, G. S. Sarmiento y H. Reggiardo, “Modelo de la penetración de minerales envainados dentro de acero líquido en cucharas”, Anales del X ENIEF-Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Bariloche-Argentina, E.Dari - C.Padra – R. Saliba (Eds.), Mecánica Computacional, Vol. XVII (1997), 289-298.
- [4] L. Clavier, E. Arquis, J.P. Caltagirone and D.Gobin, “A fixed grid method for the numerical solution of phase change problems”, Int. J. Numer. Meth. Eng., 37 (1994), 4247-4261.

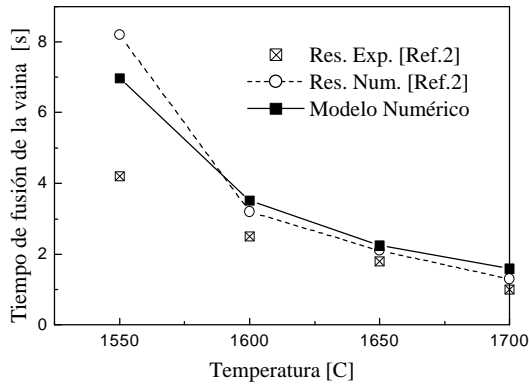


Fig.3. Influencia de la temperatura del acero en la cuchara en el tiempo de fusión
 Mineral: SiCa Espesor de la vaina: 2.5 mm
 Velocidad de inyección: 1 m/s

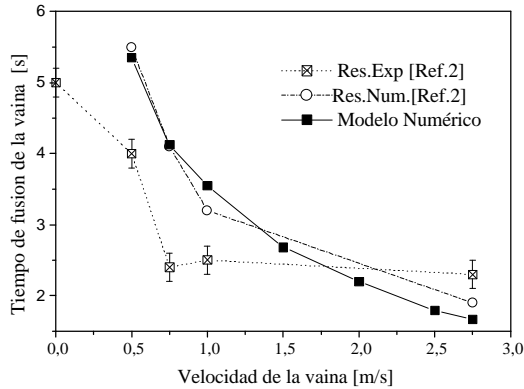


Fig.4. Influencia de la de la velocidad de la vaina en el tiempo de fusión
 Mineral: SiCa Espesor de la vaina: 2.5 mm

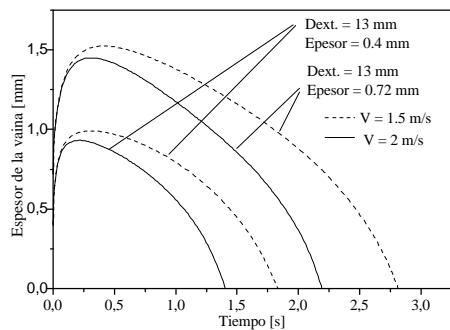
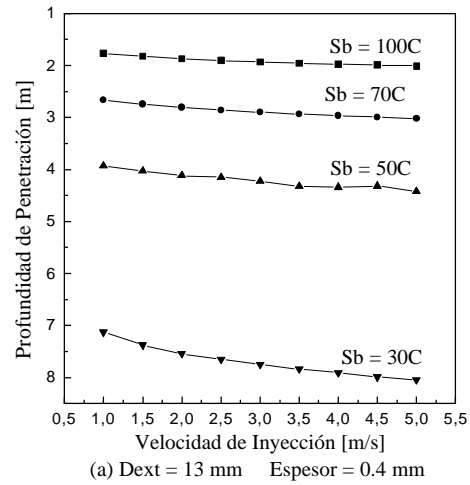
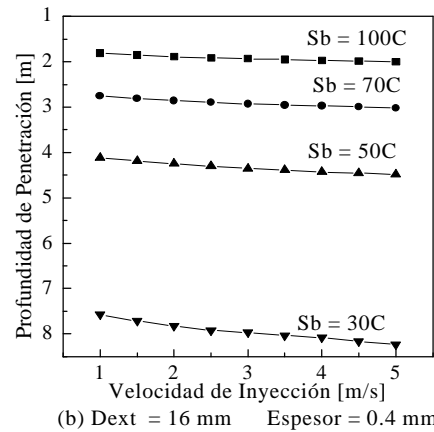


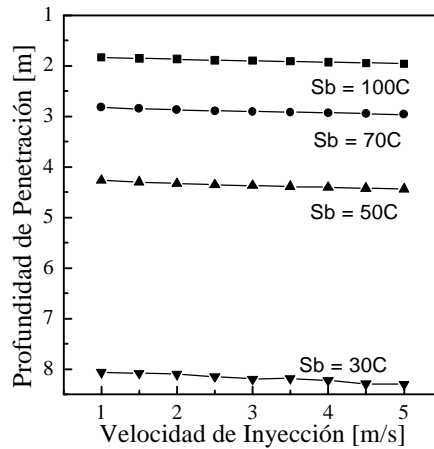
Fig.5. Variación del espesor de la vaina en función del tiempo
 Sobrecalentamiento: 70 C



(a) Dext = 13 mm Espesor = 0.4 mm



(b) Dext = 16 mm Espesor = 0.4 mm



(c) Dext = 21 mm Espesor = 0.4 mm

Fig.6. Profundidad de penetración en función de la velocidad de inyección
 Temperatura de líquidos: 1495 C
 Sobrecalentamiento: Sb

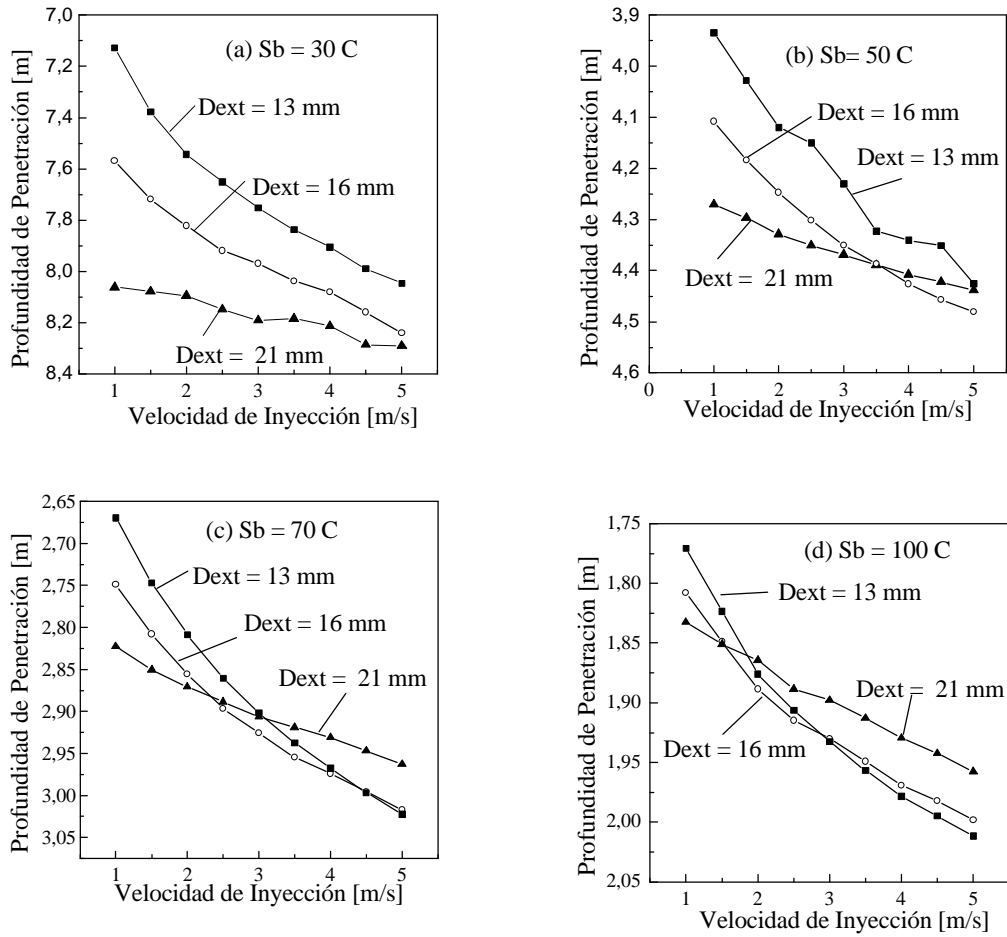


Fig. 7. Comparación de la profundidad de penetración en función de las dimensiones de la vaina para diferentes sobrecalentamientos del acero líquido.

Espesor de la vaina= 0.4 mm. Conductividad del mineral = $0.7579 + 6.4 \cdot 10^{-4}(T + 273K)$. Ref [2]

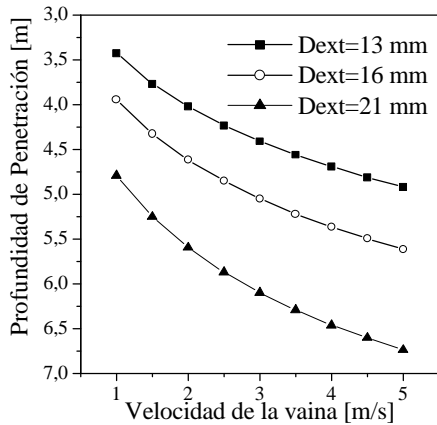


Fig 8. Profundidad de penetración
Espesor de la vaina= 0.4 mm.

Conductividad del mineral: 108.66 W/mC. Ref [1]

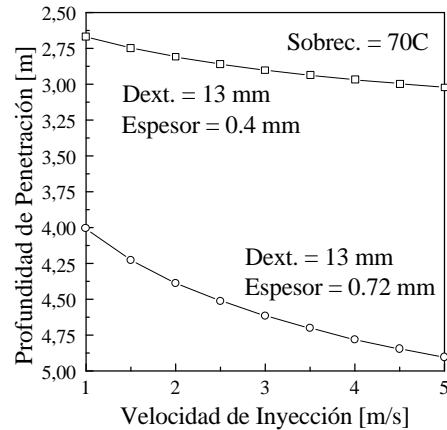


Fig.9. Comparación de la profundidad de penetración de dos vainas con distinto espesor e igual diámetro exterior