

# Determinación de ecuación de regresión para evaluar defectos en piezas tipo rueda de acero según geometría de mazarotas y método de simulación

**Lázaro Humberto Suárez Lisca**

Correo electrónico: lazarosl@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

**Artículo Original**

**Norge Isaías Coello Machado**

Correo electrónico: norgec@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

## Resumen

Uno de los problemas más importantes en la producción de piezas fundidas es la aparición de defectos como la porosidad por contracción, también conocido como rechupes. El objetivo de este trabajo es obtener la ecuación de regresión para conocer el comportamiento de los rechupes a partir de los parámetros geométricos de las mazarotas a través de la utilización de la simulación como método predictivo. Para la realización de este trabajo se siguió una metodología propuesta por los autores, utilizando herramientas estadísticas y la simulación. Como resultado de la aplicación de la metodología se determinó: el peso que tienen las variables independientes, altura y diámetro, dentro del proceso de aparición de defectos, la gráfica que muestra los valores óptimos de esos parámetros y la ecuación que rige, para la pieza estudiada y el número de defectos que pueden aparecer. La principal conclusión se origina porque los valores óptimos de la geometría de las mazarotas obtenidos no coinciden con los calculados mediante la aplicación de los métodos conocidos.

Palabras claves: defectos en fundición, simulación, diseño de experimento

Recibido: 5 de febrero del 2014

Aprobado: 5 de noviembre del 2014

## INTRODUCCIÓN

La solidificación de metales continúa siendo un fenómeno de gran interés para metalúrgicos e ingenieros fundidores. Afecta directamente el tiempo del ciclo de producción, la calidad interior de las piezas fundidas y la utilización económica del material. El fenómeno de la solidificación presenta una gran complejidad si se tienen en cuenta los tres factores que más la afectan: el rango de solidificación, la velocidad de enfriamiento y el gradiente térmico [1]. Cuando el metal fundido entra en la cavidad del molde, su calor es absorbido y transferido a través de la pared del molde. El movimiento de la interfaz entre la región líquida y sólida se llama frente de solidificación. Cuando el frente solidifica,

disminuye el volumen, provocando el fenómeno de la contracción (rechupe). Esto se evita colocando un alimentador diseñado para solidificar inmediatamente después del punto caliente, este alimentador es la mazarota. Las mazarotas, tienen dos parámetros geométricos fundamentales, altura y diámetro, la literatura recoge varios métodos para el cálculo de mazarotas y todos terminan con la determinación de estos.

La ocurrencia de defectos en una pieza fundida, debe ser controlada desde el mismo proceso de elaboración de la tecnología de fundición por los tecnólogos, por lo tanto, el contar con una herramienta y una metodología para resolver esta situación es de gran ayuda y posibilita la mejora económica del proceso [2-6].

El objetivo del trabajo es ofrecer una vía para determinar la ecuación que rige la aparición de defectos por contracción sobre todo en volumen. En este caso, la metodología utilizada es la determinación de la geometría de las mazarotas por diferentes medios, evaluar las fronteras superiores e inferiores de los parámetros altura y diámetro para establecer un diseño de experimento, simular los modelos obtenidos y a partir de los datos alcanzar la ecuación de regresión del proceso, así como los valores geométricos que en su combinación ofrezcan la menor cantidad de defectos en la pieza.

Esta investigación se limita solamente a la geometría de una pieza tipo rueda, fabricada por la Empresa Mecánica Fabrica Aguilar Noriega Planta Mecánica de Santa Clara, pero la metodología utilizada puede ser aplicada a cualquier pieza tipo rueda.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La experimentación se realiza en una pieza tipo rueda fabricada de acero Ck45 (según la base de datos de ProCAST 2011) y que sus características coinciden con el AISI 1045.

Para el cálculo de los parámetros geométricos de las mazarotas se tomaron en cuenta tres métodos reflejados por la literatura, método del módulo de enfriamiento, método de los círculos inscritos [3, 7] y el método de la distancia de alimentación [8-10]. La tabla 1 recoge los valores obtenidos en el cálculo de las mazarotas de la pieza.

Tabla 1 Datos de la geometría de la pieza y resultados de la geometría de las mazarotas					
Método	Dext (mm)	Hp (mm)	Dm (mm)	Hm (mm)	Altura del cuello (mm)
Módulos	580	65	100	100	15
Círculos inscritos	580	65	105	165	15
Distancia de alimentación	580	65	180	180	15

donde:

*Dext*: Diámetro exterior de la rueda.

*HP*: Altura de la pieza.

*DM*: Diámetro de la mazarota.

*HM*: Altura de la mazarota.

El diseño del experimento entonces se hace con ayuda del Statgraphics y los resultados son los siguientes:

Clase de diseño: Factorial Multilevel

Diseño Base

Número de factores experimentales: 2

Número de bloques: 4

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 36

Grados de libertad para el error: 27

Aleatorizar: No

La tabla 2 muestra la distribución de los valores en los rangos, se tomaron los valores de diámetro entre 90 mm como el menor y 180 mm como el mayor y para la altura fueron 100 mm y 180 mm respectivamente. En la tabla 3 puede observarse la distribución de los valores realizada por el Statgraphics.

Tabla 2 Distribución de los niveles para cada variable			
Factores	Bajo	Alto	Niveles Unidades
Diámetro	90	180	3
Altura	100	180	3
Respuestas	Unidades		
Defectos	mm <sup>3</sup>		

Tabla 3 Distribución de los valores realizada por el Statgraphics	
Diámetro	Altura
90	100
135	100
180	100
90	140
135	140
180	140
90	180
135	180
180	180

A partir de los datos se realiza la modelación de cada par, altura-diámetro. En la figura 1 se muestra la representación de la pieza con mazarotas y sistema de alimentación, rodeada por el molde de arena, para obtener una simulación del proceso y alcanzar los valores de rechupes o no en cada caso como se muestra en la figura 2; en esta se aprecia la forma en que aparecen estas porosidades en la pieza. Ver figura 3. En la figura 4 se aprecia la herramienta utilizada para medir su volumen con la ayuda del programa Visual-Environment 7,5 [2].

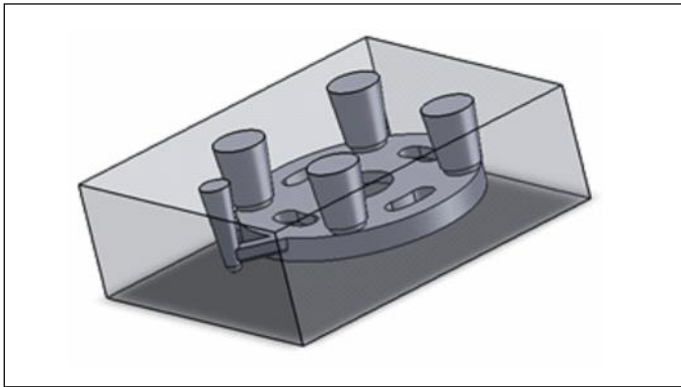


Fig. 1. Modelado de la pieza en SolidWorks, incluye las mazarotas, el sistema de alimentación y el molde

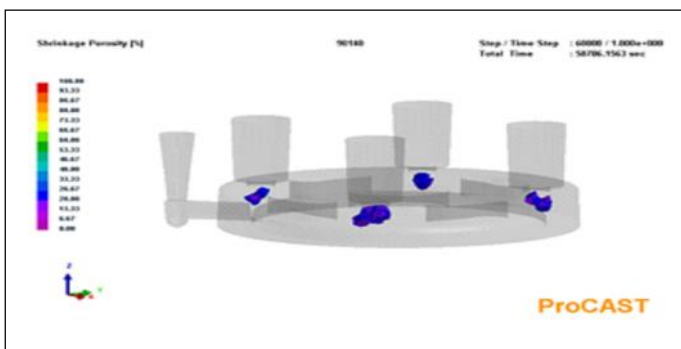


Fig. 2. Representación gráfica de la ocurrencia de porosidad interna en la pieza

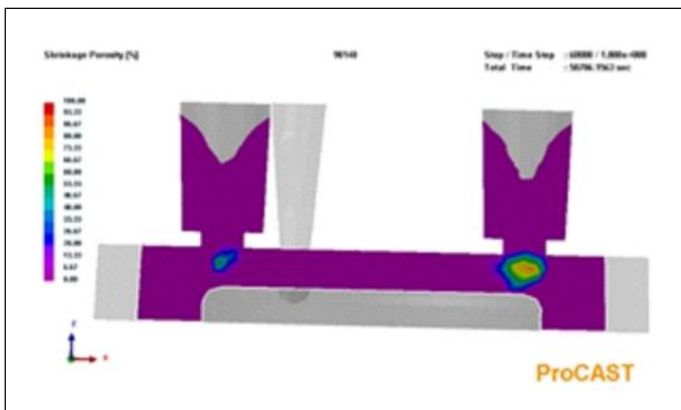


Fig. 3. Vista en corte de la pieza donde se aprecia la formación del rechufe dentro de la pieza

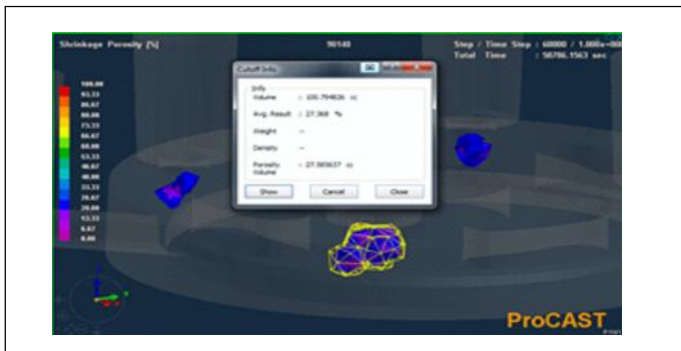


Fig. 4. Herramienta utilizada para determinar el volumen de la porosidad interna

## RESULTADOS

En primer lugar se obtuvieron los valores de las porosidades para cada modelo, los cuales se reflejan en la tabla 4.

Los primeros cálculos realizados son los de varianza, en ellos se puede apreciar la interacción entre los distintos componentes del experimento.

Tabla 4

Tabla de datos organizada por el Statgraphics y resultados obtenidos

Diámetro	Altura	Volumen del rechufe (cm <sup>3</sup> )
90	100	67,02
135	100	19,33
180	100	22,65
90	140	56,15
135	140	39,24
180	140	33,10
90	180	50,34
135	180	47,42
180	180	45,68
90	100	67,20
135	100	19,35
180	100	22,69
90	140	56,22
135	140	39,20
180	140	33,22
90	180	50,38
135	180	47,40
180	180	45,65
90	100	67,33
135	100	19,40
180	100	22,65
90	140	56,00
135	140	39,00
180	140	33,18
90	180	50,34
135	180	47,43
180	180	45,70
90	100	67,02
135	100	19,33
180	100	22,65
90	140	56,12
135	140	39,04
180	140	33,10
90	180	50,34
135	180	47,42
180	180	45,68

La tabla 5 divide la variabilidad de defectos en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba el significado estadístico de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, cuatro efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

Tabla 5 Resultado del análisis de varianza para la variable respuesta defectos					
Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:diámetro+bloque	3 468,25	1	3 468,25	100,13	0,000 0
B:altura	783,869	1	783,869	22,63	0,000 1
AA	891,053	1	891,053	25,72	0,000 0
AB	1 584,84	1	1 584,84	45,75	0,000 0
BB	3,892 05	1	3,892 05	0,11	0,740 1
Bloques	0,021 297 2	3	0,007 099 07	0,00	1,000 0
Error total	935, 242	27	34,638 6		
Total (corr.)	7 667,17	35			

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 87,802 % de la variabilidad en defectos. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 85,769 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,885 46. El error medio absoluto (MAE) de 4,442 96 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

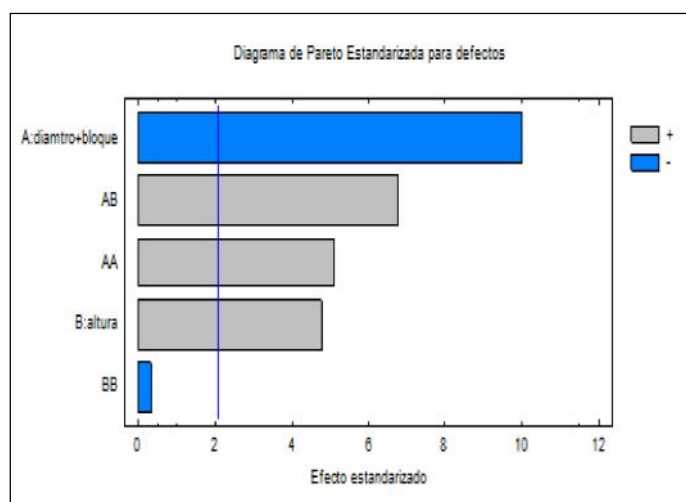


Fig. 5. Esquema de Pareto donde se representa el peso de las variables del experimento

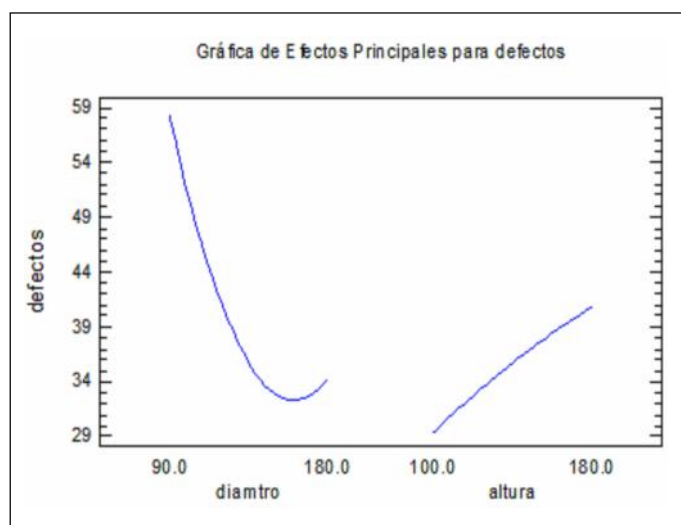


Fig. 6. Acción de las variables, diámetro y altura, con respecto a los defectos

Además, se realizó un análisis de regresión para determinar cuál era la ecuación que gobernaba la aparición de defectos en la pieza y su volumen, unidad en la cual está medida la variable defectos, a partir de los parámetros geométricos altura-diámetro.

Tabla 6				
		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	58,1 817	9,69437	6,00159	0,0000
Altura	0,1435	0,0517693	2,77191	0,0091
diámetro	-0,266704	0,0460172	-5,79574	0,0000

Tabla 7					
Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,247,7	2	2 123,85	20,64	0,0000
Residuo	3 396,18	33	102,914		
Total (corr.)	7 643,88	35			

R-cuadrada = 55,57 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 52,877 3 %

Error estándar del est. = 10,144 7

Error absoluto medio = 7,247 41

Estadístico Durbin-Watson = 2,332 86 (P=0,831 4)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,230 444

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre defectos y las 2 variables independientes.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Defectos} = 58,1817 + (0,1435 \cdot \text{altura}) - (0,2667 \cdot \text{diámetro}) \quad (\text{cm}^3) \quad (1)$$

Puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 55,57 % de la variabilidad en defectos. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 52,877 3 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10,144 7. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 7,247 41 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Con motivo de que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0 %

## DISCUSIÓN

La figura 5 representa la importancia que tienen los valores geométricos de la mazarota sobre la calidad final de la pieza y unido a la valoración estadística realizada se puede decir que sí se tiene en cuenta que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,009 1, que corresponde a altura, y que es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0, por tanto, debe tenerse cuidado con la variación de este parámetro, la relación entre calidad de la pieza y economía del proceso puede verse seriamente afectada con su variación.

Como se puede apreciar en la gráfica 6 es posible determinar que la relación existente en esta rueda está dada por una tendencia creciente de los defectos a partir de aumentar la altura y una tendencia decreciente, la mayor parte del recorrido, cuando se trata del diámetro y por tanto el punto óptimo se encuentra cercano a el mayor diámetro con la menor altura, en función de esto se puede decir que los valores óptimos no se corresponden con los obtenidos con la aplicación de los métodos de cálculo conocidos y aplicados en este trabajo, esto conlleva un análisis posterior donde se necesita ampliar el estudio para conocer el peso de cada método sobre la calidad de las piezas. (figura 5 y 6).

## CONCLUSIONES

1. La relación existente entre las variables altura y diámetro es completamente significativa.
2. La determinación de la ecuación de regresión para este tipo de pieza permite conocer con anterioridad cómo varía la

calidad de la pieza, en función del defecto rechupe, con respecto a la variación de la geometría de la mazarota.

3. La figura 6 muestra que los valores óptimos para esta pieza de la geometría de la mazarota en función de la mínima aparición de defectos son: para la altura 100 y para el diámetro tiende a 180, cuestión esta que si se observan los valores iniciales calculados para cada método utilizado no corresponden con ninguno de ellos, de hecho se encuentran relacionados entre sí.

4. A partir de los resultados en la conclusión anterior se deben ampliar los valores de los parámetros geométricos para conocer el peso que tiene cada método sobre la calidad de la pieza.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los trabajadores de la Fábrica Planta Mecánica de Santa Clara por su apoyo en la realización de esta investigación y a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Otto von Guericke de Magdeburgo en Alemania, por la ayuda con el software ProCAST 2011.

## REFERENCIAS

1. **WLODAWER, R.** *Directional solidification of steel castings*. First english ed. Pergamon Press, 1966, pp.40-70 ISBN: 978-0-08-010536-9.
2. **ABDULLIN, A. D.** "Detecting microporosity defects in steel castings by computer modeling of the casting operation in ProCAST". *Metallurgist*. 2013, vol. 57, núm. 1, pp. 167-171. ISSN: 0026-0894.
3. **DABADE, U. A.; BHEDASGAONKAR, R. C.** "Casting defect analysis using design of experiments (DOE) and computer aided casting simulation technique". In *Forty Sixth Cirp Conference on Manufacturing Systems 2013*, vol. 7, pp. 616-621, Setúbal, Portugal. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.042.
4. **GUNASEGARAM, D. R.; FARNSWORTH, D. J.** "Identification Of Critical Factors Affecting Shrinkage Porosity In Permanent Mold Casting Using Numerical Simulations Based On Design Of Experiments". *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, pp. 1209-1219. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.044.
5. **CHUDASAMA, B. J.** "Solidification Analysis and Optimization Using ProCAST". *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*. May 2013, vol. 1, pp. 9-19. ISSN: 2320-6586. Disponible en Web: [http://raijmr.com/wp-content/uploads/2013/06/2\\_9-19-bhupendra-chudasama.pdf](http://raijmr.com/wp-content/uploads/2013/06/2_9-19-bhupendra-chudasama.pdf).
6. **HARDIN, R.; SHEN, X.; GU, J.P.; BECKERMANN, C.** "Progress in the development of improved feeding rules for the risering of steel castings" In *Proceedings Of The 52nd SFSA Technical And Operating Conference*, 1998, paper no. 4.4, SFSA, Chicago, IL.
7. **BECKERMANN, Christoph; SHOUZHU, O. U.; CARLSON, Kent D.** "Feeding and Riser of High-Alloy Steel Castings". *Metallurgical and Materials Transactions*

- B. 2005, vol. 36, núm. 1. pp. 97-116. ISSN: 1543-1916. Disponible en Web: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11663-005-0010-7>.
8. **KERMANPUR, A.; MAHMOUDI, S. H.; HAJIPOUR, A.** "Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components." *Journal of Materials Processing Technology*. Sept. 2008, vol. 206, pp. 62-68. ISSN: 09240136. Disponible en Web: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=32641415&lang=es&site=ehost-live>.
9. **KWAK, Si-Young; CHENG, Jie; CHOI, Jeong-Kil.** "Impact analysis of casting parts considering shrinkage cavity defect". *China Foundry*. February 2011, vol. 8, iss. 1, pp. 112-116. ISSN: 1672-6421. Disponible en Web: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/201131449246637.pdf>.
10. **KHIRSARIYA, Nimesh A.; KAGTHARA, M.S.; MANDALIA, P.J.** "Reduction of Shrinkage Defect in Valve Body Casting Using Simulation Software". *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. April 2014, vol. 3, iss 4, pp. 5017-5020. ISSN: 2277-9655. Disponible en Web: <http://www.ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archives-2014/April-2014/93.pdf>.

## AUTORES

### Lázaro Humberto Suárez Lisca

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

### Norge Isaías Coello Machado

Ingeniero Mecánico, Máster en Ingeniería Mecánica, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

# Determination of Regression Equation to Determine the Quantity of Defects in Steel Wheel Pieces Based on the Risers Geometry and Simulation Method

## Abstract

One of the major problems in the production of castings is the occurrence of defects such as shrinkage porosity, also known as voids. The aim of this work is to obtain the regression equation to determine the behavior of shrinkage cavities based on the geometric parameters of the riser using simulation as a prediction method. To perform this work, a methodology proposed by the authors is followed using statistical and simulation tools. As a result of the application of the method was determined: the weights for the independent variables (height and diameter) in the process of occurrence of defects, the graph showing the optimum values of these parameters and the governing equation for the piece studied and number of defects that can occur. The principal conclusion was derivate because the optimum values of the risers geometry obtained do not match, with those calculated by applying known methods.

Key words: defects on casting, simulation, DOE