

# Estudio del proceso de fragmentación de fundentes fundidos usando aire

**Daniel Pérez Pérez**

Correo electrónico: daniel@abacen.co.cu

Abastecedora Central de la Pesca (ABACEN). Proveedora e Importadora de Artículos para la Pesca, Cuba

**Carlos René Gómez Pérez**

Correo electrónico: crene@uclv.edu.cu

**Francisco Arturo Ruiz Martínez**

Correo electrónico: faruiz@uclv.edu.cu

**Jorge Víctor Miguel Oria**

Correo electrónico: jorgev@uclv.edu.cu

**Rafael Quintana Puchol**

Correo electrónico: rquin@uclv.edu.cu

**Lorenzo Perdomo González**

Correo electrónico: lperdomo@uclv.edu.cu

**Amado Cruz Crespo**

Correo electrónico: acruz@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV). Villa Clara, Cuba

**Eriel Pérez Zapico**

Laboratorio Provincial de Criminalística (LPC) Villa Clara, Cuba

## Resumen

En el trabajo se estudia el proceso de fragmentación con aire de fundentes fundidos, a través de un tratamiento particular del proceso de interacción entre los fluidos de aire y de fundente, a partir de las consideraciones físicas y matemáticas del fenómeno de los choques que son resultado de la aplicación de la teoría mecano-clásica de Newton. Se esquematiza el proceso de impacto y cambio de trayectoria del chorro de fundente fundido incandescente por la acción mecánica del aire, suministrada por un soplador, y se plantean las ecuaciones referentes a la interacción entre los fluidos. Como resultado se determinan las ecuaciones para estimar el ángulo de salida y las velocidades promedio de los peles formados, si se conocen los flujos de fundente y de aire interactuantes, así como los ángulos de incidencia. A partir de la teoría desarrollada pueden estimarse los parámetros esenciales del proceso de granulación con aire de fundentes fundidos, considerando el diámetro medio de partículas a obtener para su ejecución industrial.

Palabras clave: fundentes fundidos, granulación con aire

Recibido: 7 de octubre del 2010    Aprobado: 14 de abril del 2011

## INTRODUCCIÓN

Los derretidos, a fragmentar mediante granulación horizontal con aire, se vierten desde el labio del horno, con un flujo de entre 1 y  $1,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ . Su curva de solidificación se estima similar a la de compuestos vítreos, que endurecen en un diapasón de temperaturas entre 1 000 y 1 200 °C, caracterizado por una tensión superficial entre los 330 y  $340 \mu\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ . En este rango de temperaturas se considera que se comportan como fluidos newtonianos, a la presión

atmosférica y son capaces de formar corrientes de régimen laminar ( $Re < 2500$ ), en trayectorias de caída libre, es decir, sin superficies externas que le impongan rozamiento, como ocurre durante el vertido. [1] Los peles obtenidos, por fragmentación con aire, presentan una estructura vítrea compacta similar a la obtenida con granulación húmeda, pero sin necesidad del contacto con el agua. Estas condiciones son favorables para evitar procesos posteriores de secado y calcinado, que son altos consumidores de energía y de tiempo

durante el proceso de obtención de materiales para la soldadura, además de potenciar su embasado a temperaturas cercanas al intervalo entre los 250 a 300 °C. [2]

El proceso de fragmentación de fundentes fundidos granulados con chorros de aire se produce durante la interacción de los fluidos del fundente fundido, vertido desde el horno, y el aire, impulsado por un soplador. En el punto de encuentro de ambos flujos se producen fenómenos, que pueden ser análogos al del impacto o choque de dos cuerpos en movimiento. Este punto de vista resulta interesante para relacionar algunos de las variables empleadas en el proceso de fragmentación y las características geométricas de los peles formados. Sin embargo, la aplicación de los fundamentos teóricos del fenómeno de los choques no ha sido profundamente abordada en la literatura científica relacionada con la obtención de consumibles de soldadura.

Los átomos, las moléculas y aún los núcleos, tienen energía interna relacionada con las posiciones y los movimientos de sus partes constitutivas. Por consiguiente, esas partículas pueden absorber o ceder energía cinética en los choques. Aún puede ocurrir que las partículas, que quedan después del choque, no sean las mismas que las partículas que chocan. Sin embargo, en todos esos casos es válida la ley de la conservación de la cantidad de movimiento, y si se toma en cuenta la energía interna de las partículas, puede también usarse la ley de la conservación de la energía total. El problema de determinar el movimiento de los cuerpos después del choque, si se conoce el movimiento antes del mismo, puede resolverse solamente si se sabe exactamente de las fuerzas entre las partículas que intervienen en el choque y se pueden resolver las ecuaciones del movimiento. A menudo esas fuerzas no se conocen. Aún cuando no se conozcan los detalles de la interacción, la ley de conservación del momento lineal y la ley de conservación y transformación de la energía pueden usarse para predecir los resultados del choque. [3]

Al chocar, los cuerpos se deforman y en los puntos de contacto surgen fuerzas, de acción efímera, pero muy importantes, llamadas fuerzas de choque. Para los sistemas de cuerpos que chocan estas fuerzas son internas (se supone que los cuerpos que chocan son libres o que las ligaduras que se les imponen son tales, que no surgen reacciones de ligadura por el choque), es decir, no varían el impulso total del sistema. Las fuerzas externas, que actúan continuamente sobre el sistema (como, por ejemplo, la gravedad), son generalmente muy pequeñas en comparación con las de choque y además el tiempo en que se efectúa el choque suele ser muy corto. Es precisamente por este tiempo muy pequeño que las fuerzas impulsivas internas son mucho mayores que las externas. De este modo, en el proceso de la colisión, el sistema de cuerpos se puede considerar aproximadamente como cerrado, y para calcular los resultados del choque pueden utilizarse las leyes de conservación antes mencionadas. [4]

Las colisiones ordinariamente se clasifican atendiendo a si se conserva o no durante el choque la energía cinética. Cuando se conserva la energía cinética durante un choque,

se dice que el mismo es elástico; si no es así, el choque es inelástico. Sin embargo, a menudo las colisiones entre partículas macroscópicas pueden tratarse como aproximadamente elásticas, como en el caso de choques de bolas de marfil o de vidrio. La mayoría de los choques son inelásticos. Cuando dos cuerpos quedan unidos después de un choque se dice que este es completamente inelástico. Por ejemplo, el choque entre una bala y su blanco es completamente inelástico cuando la bala queda alojada en el blanco. El término completamente inelástico no significa que se pierda toda la energía cinética inicial; quiere decir más bien que la pérdida es tan grande como lo permite la conservación de la cantidad de movimiento. Es decir, un observador, para el cual la partícula proyectil se mueva hacia la partícula blanco, que esté en reposo con este observador, difícilmente podrá apreciar que ambas partículas queden en absoluto reposo luego del choque y sin sufrir deformaciones. Por ejemplo, una bala de fusil queda detenida por una pared de concreto en la que queda incrustada, pero ambas quedan deformadas con el choque. [3]

Si se estima que la fragmentación de fundentes fundidos con chorro de aire ocurriera como un choque particular, pudiera considerarse el cumplimiento de las leyes de conservación de la cantidad de movimiento lineal en el instante de la fragmentación. El presente trabajo tiene como objetivo aplicar las leyes de conservación de la cantidad de movimiento lineal y de la energía cinética desarrollada para choque de partículas, en la obtención de algunos parámetros relacionados con el proceso de granulación de fundentes fundidos con chorros de aire.

## DESARROLLO

### Criterios sobre la aplicabilidad de la teoría de choques a la granulación de fundentes fundidos con aire

El momento lineal de un sistema de partículas ( $P$ ) se conserva si el sistema es aislado; es decir, si no actúan fuerzas externas sobre las partículas del sistema, o cuando estas o su resultante son mucho menores que la resultante de las fuerzas internas o cuando se pueda considerar que el tiempo del choque es despreciable siempre que el análisis se haga para instantes inmediatos antes y después del choque. Se emplea el término de choque para representar la situación en la que dos o más partículas interaccionan durante un tiempo muy corto y donde las fuerzas impulsivas, debidas al choque, son mucho más grandes que cualquier otra fuerza externa presente. En estas condiciones la cantidad de movimiento lineal ( $P$ ) del sistema de partículas se conserva en todo tipo de choques, mientras que la energía cinética ( $E_c$ ) no, pues se transforma en energía térmica, en energía potencial interna cuando los cuerpos se deforman durante la colisión, en la energía necesaria para la deformación plástica que pueden sufrir las partículas al ser consideradas como cuerpos o en cambios en su energía en reposo. [5]

Si dos partículas chocan de una manera diferente a la frontal (choques bidimensionales), las partículas pueden

moverse en direcciones, que no coinciden con las direcciones del movimiento original.

Como la cantidad de movimiento lineal ( $P$ ) es un vector, puede analizarse el cumplimiento de la ley de conservación para las componentes rectangulares cartesianas de este vector.

La relación entre energía cinética después del choque y la energía cinética inicial puede expresarse por el coeficiente de restitución, el cual tiene valores entre 0 y 1. Esta relación propuesta por Newton tiene validez aproximada, definiéndose el valor de uno para un choque perfectamente elástico y el valor cero para un valor perfectamente inelástico. [5]

Experiencias realizadas [6] en la atomización de fundentes con aire permiten estimar el proceso de fragmentación como un evento prácticamente instantáneo, en el que las direcciones iniciales de los fluidos en contacto (fundente fundido y aire) son distintas. La variación del momento lineal (impulso) producida por la fuerza de gravedad es proporcional al instante de interacción durante la fragmentación del chorro de fundente con el de aire (0,33 s). [6] Al tener en cuenta que el proceso ocurre en un tiempo muy pequeño en el que la resultante de las fuerzas externas no puede hacer variar grandemente el momento lineal del sistema, entonces se puede considerar la variación de la cantidad de movimiento producida por la fuerza de gravedad como despreciable, pudiéndose estimar la conservación de la cantidad de movimiento lineal en el instante del impacto entre los chorros de aire y fundente, durante el proceso de fragmentación de fundentes fundidos. Por consiguiente, la fragmentación con aire de fundentes fundidos puede ser considerada como un sistema de choques bidimensionales inelásticos, donde se conserva la cantidad de movimiento ( $P$ ).

La aproximación a una solución de estos aspectos (figura 1) constituye un tema de singular interés científico en la explicación teórica del proceso de fragmentación, así como determinar las relaciones necesarias de los ángulos, las velocidades de salida de los peles de fundentes formados y estimar su trayectoria.

En la fragmentación de un chorro de fundente líquido con otro de aire ocurren fenómenos físicos muy complejos. [7] Ante la intercepción y penetración por otro fluido, el chorro de fundente se desmenuza (fragmenta), en un proceso durante el cual sus partículas cambian prácticamente a  $90^\circ$  la dirección de su movimiento, acelerándose hacia la nueva dirección en función de la velocidad ( $U_1$ ) y el flujo másico ( $fm_1$ ) de aire, que ha impactado al chorro con relativa alta temperatura ( $1\,400^\circ\text{C}$ ). El tamaño y forma de las partículas dependerá de la viscosidad ( $\eta_L$ ) y del valor de la tensión superficial ( $\sigma_s$ ), para la temperatura del fundente y la del medio enfriador, y de la velocidad de enfriamiento dentro del fluido de gases, dada por el flujo másico de las partículas ( $fm_2$ ), sus velocidades relativas ( $v_{cr}$ ) y la diferencia de temperaturas entre las partículas ( $T_p$ ) y el medio gaseoso que la circunda ( $T_g$ ) ( $T_g \ll T_p$ ); influyendo, además, la distancia de recorrido de las partículas ( $L$ ) en suspensión dentro de la corriente de gas. [1] El intercambio de temperaturas entre ambos fluidos y la posición, que ocupan

sus partículas durante el choque, constituyen elementos muy complejos al abordar esta problemática.

### Relación entre los chorros de fundente y aire

La relación entre los chorros de fundente y aire, en el instante de la fragmentación, si se considerara como un choque particular, puede establecerse a partir de las siguientes consideraciones: a) la fricción con el aire circundante es despreciable; b) ambos fluidos adquieren la misma dirección después del impacto; c) se puede aproximar la teoría de choques a la granulación con aire de fundentes fundidos (Epígrafe 1) para la determinación de la cantidad de movimiento lineal ( $P$ ); d) la masa ( $m$ ) de los fluidos interactuantes puede ser considerada como la de sus respectivos flujos másicos ( $fm$ ).

Para encontrar relaciones entre los aspectos antes mencionados se propone una metodología investigativa consistente en: 1. planteamiento del modelo físico del problema, 2. desarrollo matemático del modelo físico, 3. determinación de los parámetros iniciales y 4. obtención de los resultados.

### Planteamiento del modelo físico del problema

Durante la fragmentación de fundentes fundidos con chorro de aire, el flujo de aire, con una cantidad de movimiento ( $P_1$ ) y con un ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), interactúa (figura 1) con el chorro de fundente con una cantidad de movimiento ( $P_2$ ), que se desplaza en caída libre y vertical, desde el horno, pudiéndose obtener la cantidad de movimiento resultante de los fluidos al chocar ( $P_3$ ) si se supone un desplazamiento conjunto con un ángulo de salida ( $\theta$ ). Luego, considerando que se produciría un choque plástico, puede estimarse la velocidad conjunta ( $V$ ) de salida de las partículas de fundente y del aire, después del choque. Empleando estas deducciones podría estimarse la velocidad de aire de soplado ( $U_1$ ) necesaria para obtener un pele de diámetro ( $d_{cr}$ ) determinado, o el flujo ( $fm_1$ ) de aire necesario, o el flujo de fundente ( $fm_2$ ), a partir de su velocidad ( $U_2$ ), la altura de vertido ( $h$ ), pudiéndose establecer una metodología para relacionar los parámetros de vertido y soplado ( $U_1$ ,  $U_2$ , etc.) con el diámetro medio ( $d_m$ ) de la partícula a obtener.

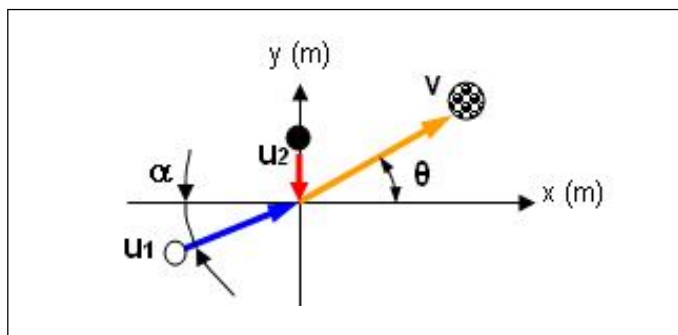


Fig. 1. Modelo del proceso de interacción de los flujos másicos de fundente ( $fm_2$ ) y de aire ( $fm_1$ ) en contacto durante el proceso de fragmentación de fundentes fundidos con chorros de aire.

### Desarrollo matemático del modelo físico aplicando la teoría de choques

Para el sistema de partículas estudiado (figura 1) la cantidad de momento lineal ( $P$ ) se conserva ecuación (1).

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0 \quad (1)$$

Al sumar (figura 1) la cantidad de movimiento ( $P$ ) en el eje "x" (ecuación 2) y el eje "y" (ecuación 3), puede obtenerse la velocidad instantánea ( $V$ ) mediante la (ecuación 4) y el ángulo de salida ( $\theta$ ) (ecuación 5) del centro de masa del conjunto de fluidos resultantes.

$$fm_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha \cdot \Delta t = (fm_1 + fm_2) \cdot V \cdot \cos \theta \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$(fm_1 \cdot U_1 \cdot \sin \alpha - fm_2 \cdot U_2) \cdot \Delta t = (fm_1 + fm_2) \cdot V \cdot \sin \theta \cdot \Delta t \quad (3)$$

Si se despeja en la (ecuación 2) se tiene que:

$$V = \frac{fm_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha}{(fm_1 + fm_2) \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

Al sustituir la (ecuación 4) en la (ecuación 3) se tiene que:

$$U_1 \cdot \sin \alpha - fm_2 \cdot U_2 = (fm_1 + fm_2) \cdot \left( \frac{fm_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha}{(fm_1 + fm_2) \cdot \cos \theta} \right) \cdot \sin \theta$$

$$\tan \theta = \frac{fm_1 \cdot U_1 \cdot \sin \alpha - fm_2 \cdot U_2}{fm_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{fm_1 \cdot U_1 \cdot \sin \alpha - fm_2 \cdot U_2}{fm_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha} \right) \quad (5)$$

Sin embargo, en cualquier sistema real existen pérdidas de energía ( $\Delta E$ ), las cuales se pueden calcular en función de la cantidad de movimiento de los fluidos en contacto (ecuación 6), o de las diferencias entre las energías cinéticas después del choque y antes del choque (ecuación 7).

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{P_3^2}{(fm_1 + fm_2)} - \left( \frac{P_1^2}{fm_1} + \frac{P_2^2}{fm_2} \right) \right) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} \left[ (fm_1 + fm_2) \cdot V^2 - (fm_1 \cdot U_1^2 + fm_2 \cdot U_2^2) \right] \cdot \Delta t \quad (7)$$

El coeficiente de restitución ( $e$ ) (ecuación 8) mide la diferencia relativa entre la energía perdida durante la colisión

( $\Delta E$ ), respecto a las energías cinéticas inicial ( $E_{ci}$ ) y final ( $E_{cf}$ ). [5]

$$e = \left| 1 - \frac{\Delta E}{E_{ci}} \right| \quad (8)$$

$$e = \left| 1 - \frac{E_{cf} - E_{ci}}{E_{ci}} \right|, \quad e = \left| 1 - \frac{E_{cf} - E_{ci}}{E_{ci}} \right|$$

$$\text{Por tanto: } e = \frac{(fm_1 + fm_2) \cdot V^2}{fm_1 \cdot U_1^2 + fm_2 \cdot U_2^2} \quad (9)$$

Tanto con la energía perdida en la colisión ( $\Delta E$ ), como con el coeficiente de restitución ( $e$ ) puede estimarse cuán plástico puede ser el proceso.

### Determinación de los parámetros iniciales

Para determinar la velocidad ( $U_2 = 1,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) del fundente fundido hasta la altura de fragmentación ( $h = 0,2 \text{ m}$ ), se considera (ecuación 10) el proceso como la caída libre de un cuerpo [1] afectada por el valor de la aceleración de la gravedad ( $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ), despreciándose la resistencia del aire para el cálculo de su rapidez.

$$U_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

El flujo másico promedio del fundente ( $fm_2$ ) puede expresarse (ecuación 11) al considerar su flujo volumétrico promedio ( $f_{v2}$ ) en  $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$  y la densidad del fundente ( $\rho_f$ ) en  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ :

$$fm_2 = f_{v2} \cdot \rho_f \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

El volumen total del horno ( $V_{TH} = 4,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ) donde se funde el fundente se determina (ecuación 12), a partir del diámetro interior del horno ( $D = 0,18 \text{ m}$ ) y la altura total del horno ( $H = 0,18 \text{ m}$ ).

$$V_{TH} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad (12)$$

El volumen total real a verter ( $V_T = 3,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ) se determina (ecuación 13) si considera que se logra verter el 75 % del volumen total de horno ( $V_{TH}$ ):

$$V_T = 0,75 \cdot V_{TH} \quad (13)$$

Si se tiene en cuenta que el tiempo de vertido ( $t_v$ ) o vaciado total del horno es de 50 s, entonces puede calcularse (ecuación 14) el flujo volumétrico ( $f_{v2} = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de fundente que sale del horno, que al sustituirlo ecuación 11,

permite obtener el valor del flujo másico del fundente ( $f_{m2}$ ) = 0,161 kg · s<sup>-1</sup>, al conocer que la densidad del fundente ( $\rho_2$  = 2,31 · 10<sup>3</sup> kg · m<sup>-3</sup>). [8]

$$fV_2 = \frac{V_T}{t_v} \quad (14)$$

Otra forma de calcular (ecuación 15) el flujo volumétrico ( $f_{v2}$ ) es a partir del área de la sección transversal del chorro de fundente ( $A_2$ ):

$$fV_2 = A_2 \cdot U_2 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Como el área ( $A_2$ ) es una función (ecuación 16) del diámetro del chorro ( $d_{cf}$ ) puede relacionarse (ecuación 17), este último, con el flujo volumétrico ( $f_{v2}$ ) y la velocidad ( $U_2$ ), determinándose su valor ( $d_{cf}$  = 6,66 mm).

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot d_{cf}^2 \quad (16)$$

Al despejar y sustituir (ecuación 15) en la (ecuación 16) se obtiene el diámetro del chorro de fundente que cae del horno:

$$d_{cf} = \sqrt{\frac{4 \cdot fV_2}{\pi \cdot U_2}} \quad (17)$$

Puede suponerse en la (ecuación 17) que, en el proceso de fragmentación, el diámetro de la sección transversal del chorro de fundente puede tener una influencia directamente proporcional en las dimensiones de las partículas a obtener. En el caso en el que el flujo másico, que cae del horno, se incrementa ( $U_2$  = cte, ecuación 10), el chorro de fundente tendrá un diámetro mayor; esto hace que ofrezca una mayor resistencia a la fragmentación, que influye en el incremento del diámetro medio del fundente a obtener. Sin embargo, cuando el chorro de fundente reduce su caudal, su resistencia ante el chorro de aire es menor; por tanto, se puede fragmentar con mayor facilidad y se obtienen partículas de menores dimensiones. Esta dependencia puede hacerse poco significativa, empleando sistemas de regulación del caudal, tanto en el labio del horno, como en el de salida de la canal.

Los parámetros que interactúan durante y después del choque se representan en las tablas 1, 2 y 3.

Al considerar la reducida cantidad de movimiento lineal que aporta el fundente ( $P_2$  = 0,10 kg · m · s<sup>-1</sup>, tabla 2), respecto a la aportada por el aire ( $P_1$  = 2,61 kg · m · s<sup>-1</sup>, tabla 2), puede considerarse la velocidad de soplado ( $U_1$ ) como la velocidad crítica necesaria ( $v_{cr}$ ) para la obtención del diámetro ( $d_{cr}$  o  $d_m$ ) deseado, lo cual se puede corroborar al emplear la ecuación propuesta por Naida. [9]

Tabla 1

Datos iniciales para determinar los parámetros después del choque

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valores
Aceleración de la gravedad	g	m · s <sup>-2</sup>	9,81
Densidad del aire	$\rho_1$	kg · m <sup>-3</sup>	1,129
Densidad del fundente	$\rho_2$	kg · m <sup>-3</sup>	2310,0
Tensión superficial del fundente	$\sigma$	N · m <sup>-1</sup>	0,33
Diámetro de la partícula a obtener	$d_{cr}$	m	0,001 2
Tiempo de vertido	t	s	50,0
Diámetro interior del horno	D	m	0,18
Altura del horno	H	m	0,18
Altura de caída del fundente	h	m	0,20
Ángulo de soplado	$\alpha$	grados	15,00
Velocidad inicial del aire	$U_1$	m · s <sup>-1</sup>	44,20

Tabla 2

Datos preliminares para determinar los parámetros después del choque

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valores
Volumen de trabajo del horno	VT	$m^3$	0,003 4
Flujo másico de vertido del fundente	$f_{m2}$	kg · s <sup>-1</sup>	0,158 7
Velocidad inicial del fundente	$U_2$	m · s <sup>-1</sup>	1,980 9
Área secc. transv. del chorro de aire	$A_1$	$m^2$	0,003 6
Área secc. transv. del chorro de fundente	$A_2$	$m^2$	0,000 035
Diámetro del chorro de fundente	$d_{cf}$	m	0,006 6
Flujo másico de aire	$f_{m1}$	kg · s <sup>-1</sup>	0,179
Cantidad de mov. inicial de aire	$P_1$	kg · m · s <sup>-1</sup>	2,61
Cantidad de mov. inicial del fundente	$P_2$	kg · m · s <sup>-1</sup>	0,10

Tabla 3 Parámetros que se obtienen después del choque			
Parámetros	Símbolo	Unidad	Valores
Velocidad de salida de las partículas de fundente y el aire después del choque	V	m · s <sup>-1</sup>	23,22
Ángulo de medio de salida de las partículas	θ	grados	12,78
Cantidad de movimiento final del fundente	P <sub>3</sub>	kg · m · s <sup>-1</sup>	2,58
Energía perdida durante el choque	ΔE	J	-27,82
Coeficiente de restitución	e	-	0,519

### Obtención de resultados

Además del flujo másico del fundente ( $fm_2$ ), en el proceso de fragmentación están presentes otras variables, las cuales pueden tener una influencia significativa en el tamaño ( $d_{cr}$ ) de las partículas del fundente solidificado.

Según criterios de especialistas, [9] puede determinarse (ecuación 18) el diámetro crítico ( $d_{cr}$ ) a obtener, a partir de la densidad del aire ( $\rho_1$ ) a la presión de contacto (atmosférica), la tensión superficial  $\rho_s$  del fundente a la temperatura de contacto y la velocidad crítica de soplado ( $v_{cr}$ ) en el punto de encuentro de ambos fluidos.

$$d_{cr} = \frac{8 \cdot \sigma_s}{C_D \cdot \rho_a \cdot v_{cr}^2} \quad (18)$$

Al suponer que el contacto entre los fluidos se efectúa a presión constante ( $p = 1$  atmósfera), entonces la densidad del aire se mantiene constante. Es decir, como la densidad del aire solo pudiera variar por la temperatura, a partir de ello, no varía el tamaño de partícula.

Las escorias no solidifican a una temperatura específica, como ocurre con los metales; sin embargo, en el rango de temperatura de solidificación (endurecimiento) la tensión superficial asciende abruptamente a razón, desde 2, hasta 20 Pa · s por cada grado Celsius. La tensión superficial depende de la temperatura y de la composición química de la sustancia y actúa directamente sobre el diámetro crítico ( $d_{cr} = f(\sigma_s)$ ) (ecuación 18). Ello implica que si se varía la temperatura se puede modificar sustancialmente el tamaño del pele formado. [6]

#### a. Influencia del flujo másico sobre la temperatura del fundente

A partir de la transferencia de calor entre el aire y el fundente (ecuación 19), y si se tiene en cuenta la capacidad térmica del fundente ( $C_{pf} = 103 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), del aire ( $C_{pa} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), los flujos másicos del aire ( $fm_1$ ) y del fundente ( $fm_2$ ), el incremento de la temperatura del aire ( $\Delta T_1$ ) y el decremento de la temperatura del fundente ( $\Delta T_2$ ), puede evaluarse la posible variación de la temperatura en el instante del choque

y, por consiguiente, determinar (ecuación 20) la temperatura final ( $T_{2f}$ ) del fundente, si se consideran las temperaturas involucradas ( $\Delta T_2 = T_{2i} - T_{2f}$ ;  $\Delta T_1 = T_{1f} - T_{1i}$ ), tanto iniciales (i) y finales (f) del aire (1), como del fundente (2).

$$fm_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1 = fm_2 \cdot C_{p2} \cdot \Delta T_2 \quad (19)$$

$$T_{2f} = T_{2i} - \frac{fm_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1}{fm_2 \cdot C_{p2}} \quad (20)$$

El flujo másico del chorro de aire ( $fm_1$ ), si se considera que su flujo volumétrico es ( $fv_1$ ), se puede expresar (ecuación 21) en función de las velocidades involucradas y emplearse para determinar (ecuación 22) la temperatura final del fundente ( $T_{2f}$ ).

$$fm_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot \rho_1 \quad (21)$$

$$T_{2f} = T_{2i} - \frac{A_1 \cdot U_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1}{A_2 \cdot U_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2}} \quad (22)$$

En la consideración de los parámetros expuestos (tabla 2) para una partícula de diámetro ( $d_{cr} = 0,0012$ ), puede estimarse una relación entre las velocidades iniciales ( $U_1 \approx 20 \cdot U_2$ ), las conductividades térmicas ( $C_{p2} \approx 10^3 \cdot C_{p1}$ ), las densidades de ambos flujos ( $\rho_2 \approx 2 \cdot 10^3 \cdot \rho_1$ ) y la relación de áreas en contacto ( $A_2 = A_1/103$ ) pudiéndose expresar (ecuación 23) la temperatura final del fundente ( $T_{2f} \approx T_{2i}$ ).

$$T_{2f} = T_{2i} - \frac{A_1 \cdot U_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1}{A_2 \cdot \frac{U_1}{20} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot \rho_1 \cdot 10^3 \cdot C_{p1}} \quad (23)$$

De lo anterior se aprecia que la variación del flujo de aire no es significativo en el decrecimiento de la temperatura del chorro de fundente, pudiéndose estimar el proceso prácticamente isotérmico, por lo que la viscosidad ( $\mu$ ) y la tensión superficial ( $\sigma_s$ ) permanecen prácticamente constantes.

#### b. Influencia de la velocidad del fundente ( $U_2$ ) sobre la temperatura del fundente

Si la velocidad del fundente ( $U_2$ ) creciera considerablemente, hasta el orden de la velocidad del aire ( $U_1 = U_2$ ), entonces al evaluar la (ecuación 23) puede considerarse que la temperatura final del fundente, en el instante del choque tampoco varía ( $T_{2f} \approx T_{2i}$ ).

Si por el contrario, si se evalúa la (ecuación 23), cuando decrece considerablemente la velocidad del fundente ( $U_2 \geq 1$ ), entonces puede obtenerse un resultado similar ( $T_{2f} \approx T_{2i}$ ).

De esta forma se demuestra que la variación de la velocidad del fundente tampoco influye en el decrecimiento de la temperatura final del fundente en el instante del choque, sin variar ( $\mu$ ) ni ( $\sigma_s$ ).

A partir de las consideraciones anteriores (*ítems a y b*) se demuestra que ( $d_{cr}$ ) depende solo de la variación de ( $v_{cr}$ ) (ecuación 18), lo cual corrobora lo planteado [10] que la velocidad de soplado en el punto de contacto es una función, que influye inversamente sobre el  $d_{cr}$  ( $d_{cr} = f(1/v_{cr}^2)$ ). Como función cuadrática inversa, una pequeña variación de la velocidad puede implicar una dispersión considerable sobre el tamaño de las partículas. Al analizar el perfil de velocidades en el flujo de aire de atomización, puede suponerse que no es constante a través de su sección transversal.

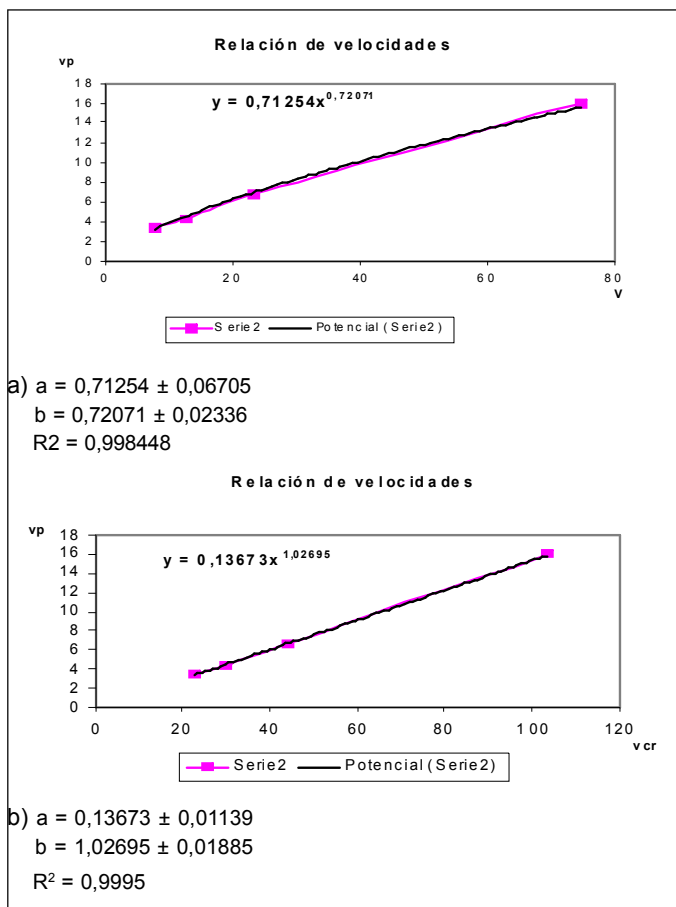
Si se conocen estos antecedentes puede estimarse la variación de diámetros de las partículas para un rango de velocidades ( $20 \leq v_{cr} \leq 40$ ) ( $m \cdot s^{-1}$ ) determinado. Por tanto, al evaluar la ecuación (18) se pueden determinar los diámetros mínimos (0,000 6 m) y máximos (0,006 0 m) de las partículas.

### Comparación con los resultados experimentales

La ecuación 18 propuesta por Naida [9] solo permite determinar la velocidad crítica de soplado con la cual se obtendría un diámetro de partícula determinado; mientras que al seguir el recorrido de las trazas [10] dejadas por las partículas durante la fragmentación, se pueden estimar las velocidades iniciales de cada una de ellas. Sin embargo, el procedimiento propuesto (epígrafe 2) permite relacionar y estimar, para un diámetro de partícula determinado, cuál será la velocidad ( $V$ ) común de salida de las partículas de fundente y del aire, después del choque, el ángulo promedio con que salen dichas partículas, las cantidades de movimientos lineales antes y después del choque, la energía perdida durante el choque y el coeficiente de restitución del mismo, estimándose, a partir de las ecuaciones de alcance máximo en el lanzamiento de proyectiles, la distancia promedio de ubicación del punto de su recolección.

Los estudios se grafican con el software "Micocal Origen", versión 6,0 y al tomar como ajuste no lineal la forma de tipo Power del modelo Allometric1 ( $y = a \cdot x^b$ ) pueden procesarse los datos experimentales (tabla 4). Se obtiene, para un rango de datos determinado, la función  $v_{part} = 0,71254 \cdot (V)^{0,72071}$ , que relaciona (figura 2a), la velocidad de la partícula ( $v_{part}$ ) y la velocidad ( $V$ ) común de salida de las partículas de fundente y del aire después del choque, además de la función  $v_{part} = 0,13673 \cdot (v_{cr})^{1,02695}$ , que tiene en cuenta la relación existente (figura 2b) entre ( $v_{part}$ ) y la velocidad crítica de soplado ( $v_{cr}$ ).

Lo anterior permite estimar de forma rápida para un diámetro de partícula deseado cuál será la velocidad con la que se debe soplar inicialmente y cuál será la velocidad común de salida de las partículas de fundente y del aire después del choque, apreciándose que a medida que aumentan las velocidades ( $v_{cr}$  y  $V$ ) aumenta la velocidad de salida de las partículas ( $v_{part}$ ), lo que hace que las partículas de menores dimensiones tengan un mayor alcance.



**Fig. 2. Relación entre las velocidades reales de las partículas ( $v_{part}$ ) con: a) su velocidad común de salida de las partículas de fundente y del aire ( $V$ ), determinada al aplicar la teoría de choques; b) su velocidad teórica ( $v_{cr}$ ), determinada con la aplicación de criterios de la literatura especializada. [9]**

Tabla 4 Resultados experimentales y teóricos obtenidos						
No	$d_{cr}$ (m)	$V_{cr}$ ( $m \cdot s^{-1}$ )*	$V_{part}$ ( $m \cdot s^{-1}$ )**	$V$ ( $m \cdot s^{-1}$ ***)	$\Delta E$	$e$
1	0,000 22	103,23	16,00	74,71	-619,47	0,72
2	0,001 2	44,20	6,70	23,22	-84,29	0,51
3	0,002 7	29,47	4,26	12,41	-30,75	0,41
4	0,004 7	22,33	3,48	7,88	-15,15	0,33

\* Velocidad crítica del aire, antes del choque, calculada por la ecuación propuesta por Naida. [9]

\*\* Velocidad de la partícula evaluada, después del choque, determinada experimentalmente según Pérez Pérez. [10]

\*\*\* Velocidad promedio resultante, después del choque, calculada en este artículo.

## CONCLUSIONES

1. La fragmentación de fundentes fundidos con aire es un proceso instantáneo, que puede ser considerado como un proceso isobárico e isotérmico, producido en un sistema cerrado, donde se cumple la teoría de choques bidimensionales inelásticos.

2. En el intervalo de tiempo despreciable en que transcurre el choque de los dos fluidos, permanece prácticamente constantes la viscosidad ( $\mu$ ) y la tensión superficial ( $\sigma_s$ ) del fundente, en valores similares a los presentados al iniciarse la interacción. Por este concepto no varían las velocidades iniciales de las partículas, ni su diámetro promedio estimado.

3. A partir de la consideración de que la fragmentación de fundentes fundidos con chorro de aire ocurre como un choque particular, se demuestra en el presente artículo que es posible relacionar el cumplimiento de las leyes de conservación de la cantidad de movimiento lineal en el instante de la fragmentación y establecer relaciones entre algunos de los parámetros involucrados en el proceso.

4. Dentro de los parámetros que se pueden relacionar, con la metodología propuesta en el presente trabajo se encuentra: a) el diámetro del pele a obtener; b) la velocidad ( $V$ ) común de salida de las partículas de fundente y del aire después del choque; c) el ángulo promedio con que salen dichas partículas; d) las cantidades de movimientos lineales antes y después del choque; e) la energía perdida durante el mismo; f) el coeficiente de restitución asociado.

## REFERENCIAS

1. **GÓMEZ FALCÓN, F. C. y otros.** "Torre neumática para la granulación de escorias y fundentes". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. 2003. p. 90
2. **GÓMEZ PÉREZ, C.** "Micropeletización con fluido gaseoso de mezclas minerales fundidas. Una alternativa tecnológica para granulación de fundentes fundidos cubanos". En *METANICA* 2000. Cuba.
3. **HALLIDAY, D. y RESNICK, R.** *Física para estudiantes de ciencias e ingeniería*. Parte 1. 1966, La Habana. 783 pp.
4. **SAVÉLIEV, I. V.** *Curso de Física General*. Editorial Mir, Moscú. 1984, pp. 109 - 112.
5. **SEARS, F. W.** *Mecánica, movimiento ondulatorio y calor*. Edición Revolucionaria, La Habana. 1968, pp. 194 - 203.
6. **VALDÉS GONZÁLEZ, R.** *Consideraciones físicas sobre la atomización horizontal de líquidos de alta temperatura*. Trabajo de Diploma, UCLV, Santa Clara, Cuba. 2003. p.76.
7. **Pérez, D.** "Consideraciones sobre las potencialidades del uso de los fundentes fundidos granulados con aire", En *XII Congreso Metalúrgico. METANICA. La Habana, Cuba. 8 - 10 Julio, 2007*.
8. **PÉREZ PÉREZ, D.** "Potencialidades de la granulación horizontal con aire del fundente fundido CIS-F10". *Soldagem & Inspecao*. 2008, vol. 13, nº 3, pp. 245-254.

Disponible en: [http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/revistas/full/full\\_13\\_03\\_208.pdf](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/revistas/full/full_13_03_208.pdf). ISSN ISSN 0104 - 9224.

9. **NAIDA, Y.** "Estudio de las condiciones de enfriamiento de polvos metálicos atomizados y calculo de las dimensiones de la cámara de dispersión". *Metalurgia de polvos*. 1974, vol. 139, nº 7, p. 6-10.
10. **PÉREZ PÉREZ, D.; GÓMEZ PÉREZ, C y RUIZ MARTÍNEZ, A.** *Determinación de los parámetros de impulsión de granos de fundentes fundidos fragmentados con aire*. En *V Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica, COMEC*. 2008.

## AUTORES

### Daniel Pérez Pérez

Ingeniero Mecánico, Máster en Ingeniería Mecánica, Abastecedora Central de la Pesca (ABACEN). Proveedora e Importadora de Artículos para la Pesca (Propes), Villa Clara, Cuba.

### Carlos René Gómez Pérez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba

### Francisco Arturo Ruiz Martínez

Doctor en Ciencias Pedagógicas, Profesor Auxiliar. Departamento de Matemática Física y Computación, Facultad de Física, Matemática y Computación, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Jorge Víctor Miguel

Ingeniero Mecánico, Técnico de Laboratorio, Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Rafael Quintana Puchol

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular, Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Lorenzo Perdomo González

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular, Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Amado Cruz Crespo

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Villa Clara, Cuba

### Eriel Pérez Zapico

Ingeniero Mecánico, Laboratorio Provincial de Criminalística (LPC), Villa Clara, Cuba



## **Study of Fragmentation Process of Fused Fluxes Using Air**

### **Abstract**

In the paper the fragmentation process with air of fused fluxes is studied by means of a particular treatment of the interaction process between the air and flux fluids starting from physical and mathematical considerations of the collision phenomenon which are the result of the application of Newton's mechanics-classical theory. In the paper is schematized the impact and change of trajectory process of the incandescent fused flux flow because of the air mechanical action provided by a blow-pipe and the equations referred to the interaction between the fluids are set. As a result, the equations for estimating the exit angle and the average velocities of the pellets formed are determined whenever the interacting air and flux fluxes are known as well as the incidence angles. From the theory developed the essential parameters of the granulation process with air of fused fluxes, by considering the average diameter of the particles to be obtained for their industrial performance can be estimated..

Key words: fused flux; granulation with air