

# Parámetros de origen del proceso de dispersión con aire de fundentes fundidos

**Daniel Pérez Pérez**

Correo electrónico: daniel@abacen.co.cu

Abastecedora Central de la Pesca (ABACEN), Proveedora e Importadora de Artículos para la Pesca (Propes), Santa Clara, Villa Clara, Cuba

**Carlos René Gómez Pérez**

Correo electrónico: crene@uclv.edu.cu; jorgev@uclv.edu.cu; rquin@uclv.edu.cu

**Francisco Arturo Ruiz Martínez**

Correo electrónico: faruiz@uclv.edu.cu

Facultad de Física, Matemática y Computación, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba

**Eriel Pérez Zapico**

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

## Resumen

Se plantean consideraciones sobre el proceso de fragmentación con aire de fundentes fundidos, obtenidos utilizando materias primas cubanas, para el proceso de soldadura bajo arco sumergido (SAW). El proceso físico de la trayectoria de vuelo y su validación durante la granulación con aire no se reportan en el campo de la soldadura. El objetivo de este trabajo es establecer un procedimiento para determinar las velocidades y ángulos de salida de los peles durante su impulsión y dispersión, además de aportar criterios del efecto friccional de la atmósfera circundante sobre la forma de la curva de trayectoria de los peles formados. Estos aspectos se pueden corroborar con los datos obtenidos mediante el procesamiento digital de las imágenes filmadas del proceso de fragmentación y desplazamiento de los peles formados. Se demuestran la eficacia del procedimiento desarrollado para la obtención de los parámetros de vuelo y la no influencia de la fuerza friccional del aire sobre la modificación de la trayectoria de vuelo de las partículas, permitiendo establecer una metodología, que posibilita iniciar estudios sobre los fenómenos de fragmentación de fundentes fundidos empleando chorros de aire, que garanticen los rangos y clases granulométricas necesarias para un adecuado desempeño del proceso de soldadura.

Palabras clave: fundentes, obtención, granulación, atomización, dispersión de partículas

Recibido: octubre del 2010

Aprobado: enero del 2011

## INTRODUCCIÓN

La fragmentación de los fundentes fundidos puede dividirse en tres grupos, atendiendo al principio en que se basa: a) por choque térmico; b) por acción mecánica; c) por acción mecánica y térmicas combinadas. [1] El principio térmico se basa en el impacto que sufre el fundente ( $\approx 1\,400\,^{\circ}\text{C}$ ) ante la relativa baja temperatura ( $\approx 30\,^{\circ}\text{C}$ ) del medio refrigerante. Como agente enfriador se suele usar el agua, obteniéndose los fundentes fundidos como líquidos subenfriados. [2] Las diferencias entre las temperaturas relativas de las masas líquidas en contacto influyen significativamente en el grado de amorfismo del fundente fundido obtenido. [3] El principio mecánico se basa en la

fragmentación del fundente solidificado mediante presión pura. La fuerza necesaria para la ruptura del fundente solidificado es proporcional a su grado de vitrificación. Como resultado se obtienen granos muy abrasivos y cierta tendencia a la formación de alguna pérdida másica por generación de polvo. [4] El principio termomecánico se basa en la destrucción mecánica del chorro de fundente líquido ( $\approx 1\,400\,^{\circ}\text{C}$ ) por otro fluido y/o un dispositivo mecánico, combinado con un posterior enfriamiento abrupto dentro de otro fluido de mucha más baja temperatura ( $\approx 30\,^{\circ}\text{C}$ ). [5] Una variante de este método es la fragmentación con gases, reconocido como una variante del proceso seco de obtención de fundentes fundidos. [1]

Existe un grupo de aplicaciones, que refieren el proceso de obtención de fundentes fundidos, a partir del uso de la granulación seca, específicamente empleando la fragmentación con chorro de gases [6] o aire [7]. Konishi [8] propone incrementar la productividad del proceso únicamente soplando con aire de forma horizontal, perpendicularmente al chorro de fundente. La combinación de los parámetros empleados en el control de este proceso constituye una función de las variables químicas y físicas del fundente a obtener. [4, 9] Es por ello que con este método, si no existiera un riguroso control de sus parámetros de operación, la distribución granulométrica obtenida pudiera ser muy amplia, lo que conduciría a trituraciones posteriores de los granos mayores y a la refusión de los menores, prolongando y encareciendo el proceso. Durante la fragmentación del chorro de fundente ocurre una fuerte interacción entre ambos fluidos originándose una dispersión de las partículas, a partir de la zona de fragmentación. Este fenómeno conduce a que, a distintas distancias dentro de la zona de recolección, se observen peles de diferentes dimensiones. [10] Este aspecto, unido a lo insuficientemente que ha sido tratado en la literatura especializada el tema de las particularidades físicas del proceso de fragmentación de fundentes fundidos mediante atomización con gases, conduce a que se plantee como objetivo del presente trabajo establecer un procedimiento para determinar las velocidades y ángulos de salida de los peles durante el proceso de impulsión y dispersión de fundentes fundidos durante su fragmentación horizontal con aire, además de aportar criterios del efecto friccional de la atmósfera circundante sobre la forma de la curva de trayectoria de los peles formados, todos estos aspectos desarrollados a partir del planteamiento de las condiciones físicas y matemáticas necesarias y su corroboración con los datos obtenidos mediante el procesamiento digital de las imágenes filmadas del proceso de fragmentación y desplazamiento de los peles formados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Si se prescinde de la resistencia del aire, los chorros de agua de los surtidores inclinados, así como todos los proyectiles arrojados por cualquier medio, describen trayectorias en forma de parábolas perfectas. La parábola que dibuja la trayectoria de los proyectiles es una línea curva, que resulta de la sección de un cono por un plano paralelo a una de las generatrices. [11] La correspondencia que a cada  $x \in \mathbb{R}$  le hace a su imagen  $f(x) = -a(x+d)^2 + c$  se denomina función cuadrática o parábola, donde  $d$  es la ordenada para la cual  $c$  es el punto de inflexión (altura máxima en el caso del tiro oblicuo), resultando la coordenada  $(d, c)$  el centro del origen, a partir del cual la función cambia de monotonía, es decir, es axisimétrica respecto al valor  $x = d$  y cuyos ceros corresponden a los puntos en los que la función interseca al eje  $x$  en los puntos  $(0; 0)$  y  $(2 \cdot d; c)$ . El valor del parámetro  $a$  es un indicador de la magnitud de la apertura de la parábola, mientras que el signo del parámetro cuadrático indica la posición de su apertura.

La asociación de estos elementos matemáticos con las ecuaciones que rigen el tiro oblicuo de proyectiles y los resultados del estudio del proceso de fragmentación con aire de fundentes fundidos (alcance, altura y velocidades de las partículas) podrían aportar criterios para evaluar el efecto friccional del aire y su influencia sobre los valores de los parámetros reales, que participan en el proceso de fragmentación. Esta valoración resulta interesante desde el punto de vista científico, no encontrándose referida en la literatura especializada que aborda la obtención de fundentes fundidos.

En la fragmentación de un chorro de fundente líquido con otro de aire ocurren fenómenos físicos muy complejos. 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  $90^\circ$  su trayectoria vectorial de velocidad, acelerándose hacia la nueva dirección en función de la velocidad ( $v_o$ ) y la masa ( $m_g$ ) de gases, que ha impactado al chorro de alta temperatura. El tamaño y forma de las partículas dependerá de la viscosidad ( $\eta_l$ ) y del valor de las tensiones superficiales ( $\sigma_s$ ) para la temperatura del fundente y la del medio enfriador y de la velocidad de enfriamiento ( $v_e$ ) dentro del fluido de gases, dada por la masa de las partículas ( $m_p$ ), sus velocidades relativas ( $v_p$ ) 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. [12]

Teniendo en consideración los aspectos antes mencionados es posible relacionar alguno de los factores que pueden afectar el tamaño de las partículas durante la granulación de fundentes fundidos con gases; estos son: la composición química del fundente, la temperatura o grado de sobrecalentamiento del fundente, la estructura del derretido, la velocidad de atomización del aire, la relación aire-líquido, el ángulo de atomización del chorro de aire, la temperatura y humedad del aire y el flujo de fundente.

## PARTE EXPERIMENTAL

El proceso de fragmentación produce partículas (figura 1), que son lanzadas según trayectorias similares a los disparos de proyectiles, por lo que el alcance, la altura y las velocidades de las esferas del fundente granulado, por analogía, pueden estudiarse por las mismas leyes físicas.

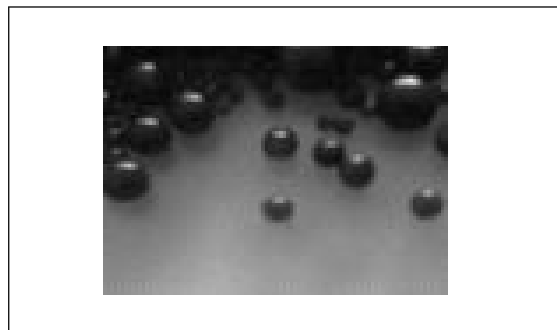


Fig. 1. Forma de los granos esféricos de fundente, obtenidos por fragmentación con aire.

La distancia recorrida ( $x$ ) de la partícula (ecuación 1) está definida por su velocidad inicial ( $v_o$ ), el ángulo de salida ( $\theta$ ) y el instante ( $t$ ) transcurrido, mientras que su altura ( $y$ ) lo está, además (ecuación 2), por la acción de la gravedad ( $g$ ).

$$\text{Conociendo que: } x = v_o \cdot t \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$y = v_o \cdot t \cdot \sin\theta - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad (2)$$

Despejando  $t \frac{x}{v_o \cdot \cos\theta}$  de la ecuación 1 y sustituyendo  $t$  en la ecuación 2, se obtiene que  $y = x \cdot \tan\theta - \frac{g}{2 \cdot v_o^2 \cdot \cos^2\theta} \cdot x^2$ , para ausencia de fricción con el aire.

$$\text{Haciendo } \tan\theta \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{CO}{CA} = k \quad (3)$$

Un esquema trigonométrico (figura 2) representaría la trayectoria de salida de los peles, a partir del cual pueden relacionarse el ángulo de salida ( $\theta$ ) y su tangente ( $K$ ).

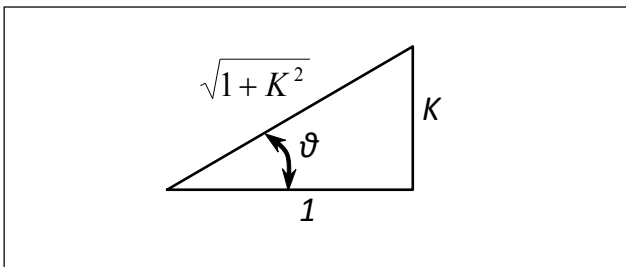


Fig. 2. Esquema representativo de la salida de los peles durante su impulsión.

Por lo que se puede escribir;

$$y = k \cdot x - \frac{g \cdot (1 + k^2)}{2 \cdot v_o^2} \cdot x^2 \quad (4)$$

Para los puntos 1 y 2 de la trayectoria de vuelo de una partícula cualquiera, en función de un sistema de referencia determinado, se pueden ubicar los valores de su posición iniciales ( $x_1$ ;  $y_1$ ) y finales ( $x_2$ ;  $y_2$ ), tal que:

$$y_1 = k \cdot x_1 - \frac{g \cdot (1 + k^2)}{2 \cdot v_o^2} \cdot x_1^2 \quad (5)$$

$$y_2 = k \cdot x_2 - \frac{g \cdot (1 + k^2)}{2 \cdot v_o^2} \cdot x_2^2 \quad (6)$$

$$\text{De esta forma: } \frac{g}{2 \cdot v_o^2} \cdot (1 + k^2) = \frac{k \cdot x_1 - y_1}{x_1^2} = \frac{k \cdot x_2 - y_2}{x_2^2}$$

trabajando con las igualdades:

$$k \cdot x_1 \cdot x_2^2 - y_1 \cdot x_2^2 = k \cdot x_2 \cdot x_1^2 - y_2 \cdot x_1^2$$

$$\text{se tiene que: } k = \frac{y_1 \cdot x_2^2 - y_2 \cdot x_1^2}{x_1 \cdot x_2 \cdot (x_2 - x_1)} \quad (7)$$

De la ecuación 3 se tiene que  $\theta = \tan^{-1}(k)$ ; lo que implica que:

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{y_1 \cdot x_2^2 - y_2 \cdot x_1^2}{x_1 \cdot x_2 \cdot (x_2 - x_1)} \right] \quad (8)$$

De esta forma se puede obtener el ángulo  $\theta$  de salida de los peles.

De la ecuación 5 se obtienen  $v'_{0-1}$  (ecuación 9) y  $v'_{0-2}$  (ecuación 10), como las velocidades de salida inicial de los peles, calculadas a partir del punto inicial ( $x_1$ ;  $y_1$ ) y final ( $x_2$ ;  $y_2$ ) de cada traza, respectivamente.

$$v'_{0-1} = \sqrt{\frac{g \cdot (1 + k^2) \cdot x_1^2}{2 \cdot (k \cdot x_1 - y_1)}}; v'_{0-2} = \sqrt{\frac{g \cdot (1 + k^2) \cdot x_2^2}{2 \cdot (k \cdot x_2 - y_2)}} \quad (9, 10)$$

La diferencia entre  $v'_{0-1}$  y  $v'_{0-2}$  puede reflejar el efecto de la fricción del aire sobre la partícula durante la trayectoria entre los puntos analizados, ya que para el desarrollo del modelo físico-matemático anteriormente desarrollado, este efecto no fue considerado. La instalación experimental (figura 3) está compuesta por un horno de arco eléctrico (1), monofásico, de acción indirecta, con crisol y electrodo de grafito prensados, que sostiene temperaturas de más de 1800 °C a una potencia de 24 kW; y un soplador centrífugo (2), con velocidades de salida del aire de hasta 60 m · s<sup>-1</sup>. El fundente fundido CIS-F10 estudiado [13] se obtiene (6 kg) por fusión de sus materias primas en el horno de arco eléctrico (1). Su vertido (1400 °C) se realiza de manera tal, que el flujo de aire producido por el soplador (2) intercepte la trayectoria vertical del chorro de fundente líquido (3) en un ángulo ( $\theta$ ) de 15° (figura 2). El proceso de fragmentación del fundente se filma con una cámara de video modelo CAMCODER CC433 RSA 1997, a una velocidad de grabación de 30 cuadros por segundo. La cámara se coloca perpendicularmente (a 1 490 mm) al lugar de impacto de los fluidos.

Las imágenes captadas se digitalizan con el software ATI Multimedia Center. El video se secciona a razón de 30 cuadros por segundo con el software Adobe Premiere

Pro 7.0. Se selecciona una secuencia fotográfica, que incluye el recorrido de una partícula fragmentada, que corresponde a una trayectoria de interés, la cual se toma (número 1) como referencia para explicar el procedimiento (figura 4). Cada secuencia de fotos se solapó y se trató digitalmente con el software Photoimpression 2000, de forma tal, que solo se aprecie el recorrido continuo de la traza de interés en una sola imagen (figura 5).

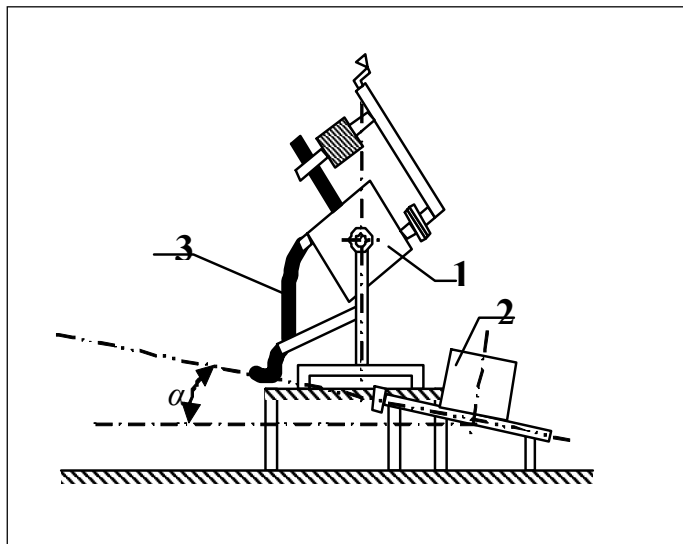


Fig. 3. Instalación experimental.



Fig. 4. Ejemplificación del seguimiento de una traza (número 1) durante su trayectoria de vuelo, en la secuencia de imágenes desde la 00010365 a la 00010374.

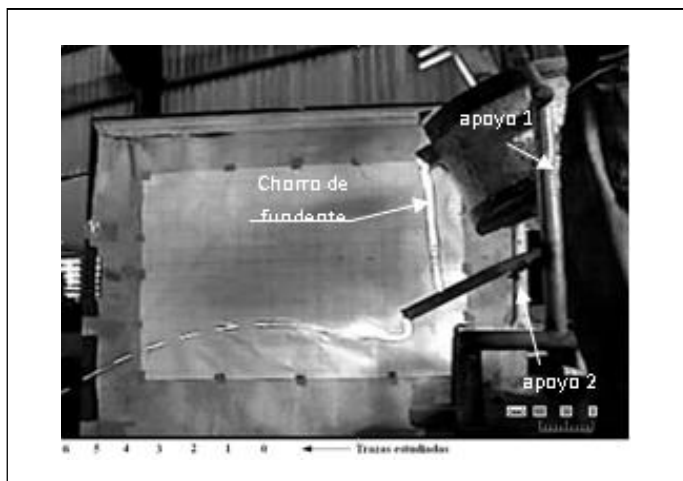


Fig. 5. Trayectoria de la traza número 1. Escala, en función de las dimensiones del apoyo 1.

La imagen (figura 6) es exportada al software de dibujo Paint, del Microsoft Office, el cual se puede emplear como herramienta de medición relativa, al permitir la recuperación de las posiciones de las coordenadas ( $x, y$ ) de cada píxel de la pantalla (o de la imagen en ella reflejada). Sin embargo, su uso trae tres problemas: a) Desconocimiento de la relación entre el número de píxeles y la distancia real equivalente, en milímetros, de los objetos; b) desconocimiento de una magnitud verdadera de referencia en el plano de fragmentación, que permita establecer relaciones reales entre los píxeles y las dimensiones de las trazas en este plano; c) existencia de un sistema de coordenadas creciente en la dirección contraria al desplazamiento del pele.

A partir del reconocimiento de una dimensión milimétrica cualquiera ( $A$ ) (figura 5), y de la determinación de la cantidad de píxeles equivalentes ( $B$ ), puede establecerse una relación (ecuación 11) para vincularlas, de forma tal que, al medir cualquier otra distancia en píxeles ( $C$ ) sobre la figura 5, pueda conocerse su valor real ( $D$ ), en milímetros.

$$D = \frac{A \cdot C}{B} \quad (11)$$

El estudio de relación de la magnitud milimétrica conocida ( $A$ ), respecto a sus píxeles equivalentes ( $B$ ), se realiza tomando como referencia el valor del diámetro conocido del apoyo 1 del horno (figura 5). Para ello se establecen cinco alturas ( $y$ ) arbitrarias (tabla 1) del apoyo del horno más cercano al observador (apoyo 1), a las cuales se les mide su diámetro.

Al reconocer que el diámetro real del apoyo 1 del horno es de 40 mm, se puede determinar que 9 píxeles corresponden a 10 mm, relación que se muestra en la escala (figura 6). De igual forma puede determinarse el diámetro del apoyo 2 (tabla 2), que se encuentra más alejado.

Al igual que el apoyo 1, el diámetro real del apoyo 2 del horno también es de 40 mm, pudiéndose determinar que, para este caso, 10 píxeles corresponden a 15,38 mm, relación que no se muestra en escala alguna de la figura 5.

Tabla 1  
Determinación del diámetro del apoyo 1, en píxeles

Apoyo 1				
Muestras	y (píxeles)	$x_1$ (píxeles)	$x_2$ (píxeles)	Diámetro (píxeles)
1	270	808	844	36
2	290	809	845	36
3	300	810	846	36
4	310	811	847	36
5	320	812	848	36

Tabla 2 Determinación del diámetro del apoyo 2, en píxeles				
Apoyo 2				
Muestras	y (píxeles)	x <sub>1</sub> (píxeles)	x <sub>2</sub> (píxeles)	Diámetro (píxeles)
1	330	762	788	26
2	350	762	788	26
3	360	762	788	26
4	410	763	789	26
5	450	763	789	26

El efecto de perspectiva y la ausencia de referencia dimensional en el plano en el que se desplaza el pele hace necesario determinar una verdadera magnitud en dicho plano, que permita relacionar posicionalmente las trazas evaluadas. Si se comparan los diámetros de los dos apoyos del horno se aprecia una diferencia entre ellos (figura 5). Este efecto causado por la perspectiva debe ser corregido para determinar cualquier posición o magnitud en el plano de proyección del pele. Para ello se considera la diferencia entre la distancia que separa los apoyos y la diferencia de diámetro apreciado (ecuación 12), al ser equidistante la posición del plano de soplado, respecto a la de cada apoyo del horno, considerando el diámetro del apoyo del horno ( $\delta''$ ), en el plano en el que se desplaza el pele, el diámetro del apoyo más alejado ( $\delta'$ ), respecto a la posición del observador, y el diámetro del apoyo del horno más cercano ( $\delta$ ), respecto a la posición del observador. Lo mismo que ocurre para el eje de las ordenadas se manifiesta para el eje de las abscisas en un sistema de coordenadas cartesianas.

$$\delta'' = \delta' + \frac{1}{2} \cdot (\delta - \delta') \quad (12)$$

Los resultados de la lectura del apoyo 1 (tabla 1), su combinación con los resultados del apoyo 2 (tabla 2), y el uso de la ecuación 12 permiten determinar que la verdadera magnitud del diámetro ( $\delta''$ ) del apoyo en el plano en el que se desplaza el pele sería de 31 píxeles, que representan a 40 mm, correspondientes al diámetro de un apoyo imaginario colocado en dicho plano. Al igual que se establece una escala de equivalencia de píxeles a milímetros para el apoyo 1 y el 2, se realiza para las distancias contenidas en el plano en el que se desplaza el pele, empleándose para conocer la verdadera magnitud, en píxeles, de la posición relativa que posee cada traza, representando 10 píxeles a 12,90 mm. Todas las magnitudes, que a partir de aquí se refieran, se obtienen en relación con este plano de proyección del pele, por lo que puede obtenerse la posición relativa de las coordenadas de las trazas, a partir de la figura 5, para determinar la distancia entre ellas, en milímetros. El origen de coordenadas (0,0) del Paint se encuentra en su esquina superior izquierda. Hacia la derecha y hacia abajo crecen las coordenadas de las ordenadas (x) y las abscisas (y) de

los píxeles, respectivamente. La proyección estudiada del pele número 1 se realiza de derecha a izquierda, con desplazamientos crecientes de las ordenadas y abscisas de forma inversa a lo registrado por el Paint. Una forma de resolver esta contradicción consiste en asumir como referencia un sistema cartesiano, que emplee los valores máximos de las ordenadas y las abscisas del Paint ( $x_n, y_m$ ), ubicado en el extremo inferior derecho del área de medición, tal que cada punto ( $x_i, y_i$ ) a ubicar se obtenga a partir de la diferencia de estas coordenadas (ecuación 13) en función de las leídas en el sistema de medición empleado.

$$(x_i, y_i) = (x_n - x_i, y_m - y_i) \quad (13)$$

Empleando las consideraciones antes mencionadas se pueden determinar las posiciones relativas de cada uno de los puntos de inicio ( $x_1, y_1$ ) y final ( $x_2, y_2$ ) de cada traza en píxeles (tabla 3) y en milímetros (tabla 4), así como los valores del ángulo ( $\theta$ ) y de la velocidad ( $v_0$ ) iniciales (tabla 5), obtenidos a partir del uso de las ecuaciones 8 y 9, respectivamente.

Tabla 3 Coordenadas de las trazas (figura 5) en el instrumento de medición Paint, a partir del nuevo origen (x = 994, y = 684)				
Trazas	x <sub>1</sub> (píxeles)	y <sub>1</sub> (píxeles)	x <sub>2</sub> (píxeles)	y <sub>2</sub> (píxeles)
0	633	201	665	199
1	700	197	731	191
2	765	185	793	176
3	823	168	849	158
4	878	146	905	133
5	931	119	957	105

Tabla 4 Recuperación de las coordenadas de las trazas (figura 5) en el instrumento de medición Paint a partir del origen en X = 994, y = 684				
Trazas	x <sub>1</sub> (m)	y <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	y <sub>2</sub> (m)
0	0,817	0,259	0,858	0,257
1	0,903	0,254	0,943	0,246
2	0,987	0,239	1,023	0,227
3	1,062	0,217	1,095	0,204
4	1,133	0,188	1,168	0,172
5	1,201	0,154	1,235	0,135

Tabla 5  
Velocidad de ( $v_0$ ) y ángulo ( $\theta$ ) iniciales de los peles de la figura 6

Trazas	v (m/s)	$\theta$ (grados)	error de v	error de $\theta$
0	3,354	34,188	3,74	7,91
1	3,387	36,363	2,78	2,05
2	3,433	38,139	1,48	2,73
3	3,520	37,770	1,03	1,74
4	3,570	38,475	2,45	3,64
5	3,641	37,811	4,51	1,85
Media	3,483	37,094	0,04	0,08
Promedio	3,484	37,124		
Desviación	0,112	1,609		

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se observa (tabla 5) que el procedimiento empleado para determinar el valor del ángulo ( $\theta = 37^\circ$ ) (error inferior al 0,08 %) y la velocidad iniciales ( $v_0 = 3,483 \text{ m s}^{-1}$ ) (error inferior al 0,04 %) es adecuado (desviación estándar inferior a 1,609 y 0,112, respectivamente). Esta similitud valida el procedimiento empleado y permite inferir que la influencia del aire circundante sobre la forma parabólica de la trayectoria de los peles no es apreciable, en las condiciones experimentales estudiadas.

A partir de la determinación de las velocidades ( $v_0$ ) y ángulos ( $\theta$ ) (tabla 5), considerando los criterios sobre la función geométrica de la parábola, pueden determinarse (ecuación 14 y ecuación 15) sus coeficientes ( $c$ ,  $d$ ), mientras que el parámetro  $a$  se determina (ecuación 16) para las coordenadas del interseco (0,0) y se comprueba para los restantes puntos característicos máximo ( $d, c$ ) e interseco ( $2d, 0$ ).

$$c = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2(\theta)}{2 \cdot g}; \quad d = \frac{v_0^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta)}{2 \cdot g}; \quad a = \frac{c}{(d)^2} \quad (14, 15, 16)$$

Luego, es posible trazar la curva teórica de desplazamiento del pele evaluado (figura 6), a partir de la ecuación de la parábola, considerando los coeficientes  $a$ ,  $d$ ,  $c$ . La curva  $y_m$  (figura 5) corresponde a la media, a partir de las medias de las velocidades ( $v_0$ ) y ángulos ( $\theta$ ) iniciales (tabla 5).

El uso de las ecuaciones 16, 17 y 18 convierte a estos parámetros en absolutos, permitiendo su comparación con la curva de trayectoria media descrita por las trazas (figura 7).

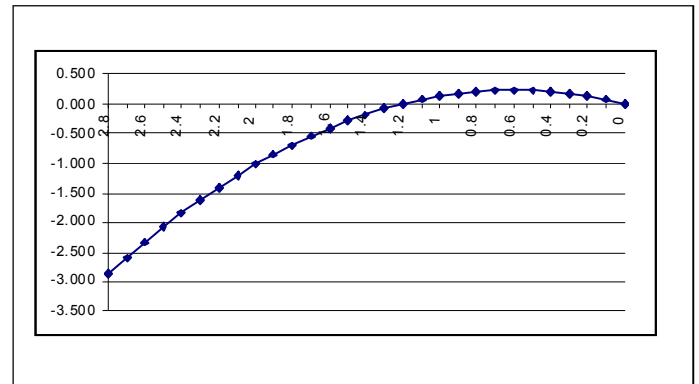


Fig. 6. Curva teórica de desplazamiento del pele estudiado (unidades en metros).

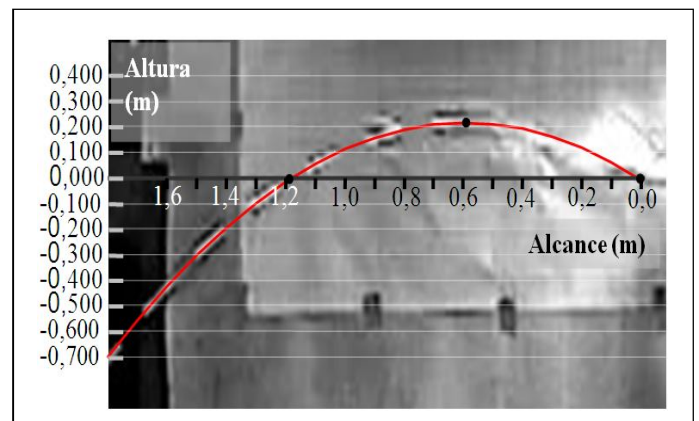


Fig. 7. Superposición de la curva teórica sobre la imagen (figura 6). Determinación del origen.

De lo expuesto anteriormente puede concluirse que la función cuadrática  $y = -0,635 \cdot (x + 0,595)^2 + 0,225$  describe la trayectoria del pele estudiado (figura 5), lo que permite estimar sus puntos característicos (origen e interseco), pudiéndose determinar las coordenadas del punto de lanzamiento del pele evaluado (0,590; 0,222), empleando el procedimiento descrito, pero de forma inversa.

La coincidencia de los recorridos prácticos, adquiridos mediante el procesamiento de las imágenes, con los teóricos, obtenidos con las ecuaciones del tiro oblicuo de proyectiles, permite afirmar que la influencia friccional del aire no modifica significativamente la trayectoria de recorrido del pele en las condiciones experimentales estudiadas.

Esta afirmación puede ser usada para la estimación del punto de recolección de las partículas dispersadas y permitiría también la justificación de trabajos relacionados con el estudio del proceso de fragmentación (interrelación de los dos fluidos), como la determinación práctica e instantánea de la longitud de la zona promedio de fragmentación y los cálculos de los flujos de aire y fundente necesarios para producir la distribución granulométrica necesaria en el fundente a obtener.

Se determinan entonces las coordenadas del punto superior ( $x_s, y_s$ ) e inferior ( $x_i, y_i$ ). El diámetro ( $d$ ) de la partícula se determina como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados

de la diferencia posicional absoluta en el eje de las ordenadas  $s$  ( $x_s - x_i$ ) y de las abscisas  $h$  ( $y_s - y_i$ ).

Para el cálculo de la velocidad crítica ( $v_{cr}$ ) de soplado [14] (ecuación 17) se requiere del diámetro ( $d_{cr}$ ) de la partícula (tabla 6), el cual se determina tres veces para cada traza (al inicio, en el punto medio y el final de su longitud).

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_s}{C_D \cdot \rho_a \cdot d_{cr}}} \quad (17)$$

Según estudios de especialistas, [5] para el fundente fundido estudiado la tensión superficial ( $\sigma_s$ ), a la temperatura de 1400 °C, es de  $\sigma_f = 339 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  y la densidad del aire ( $\rho_a$ ) a la temperatura de 30 °C es de  $\rho_a = 1,165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , mientras que la partícula (figura 1) se asume similar a la una esfera perfecta ( $C_D=1$ ), aún cuando en los momentos de su formación la partícula no lo sea. [12]

Durante el evento, las fuerzas superficiales son condicionadas por la acción directa de los volúmenes contiguos del gas, que tienen contacto con las gotas del

Tabla 6

Determinación del diámetro ( $d_{cr}$ ) y la velocidad crítica de soplado ( $v_{cr}$ ) de las trazas estudiadas

Diámetro al inicio de la traza									
Trazas	$x_s$	$y_s$	$x_i$	$y_i$	s	h	d (píxeles)	d (mm)	$v_{cr}$ (m/s)
0	360	482	361	485	1	3	3,16	4,08	23,54
1	291	486	293	489	2	3	3,61	4,65	22,04
2	223	499	226	501	3	2	3,61	4,65	22,04
3	168	516	169	519	1	3	3,61	4,08	23,54
4	113	537	115	540	2	3	3,61	4,65	22,04
5	60	564	62	567	2	3	3,61	4,65	22,04
							media	4,46	22,54
Diámetro en el medio de la traza									
Trazas	$x_s$	$y_s$	$x_i$	$y_i$	s	h	d (píxeles)	d (mm)	$v_{cr}$ (m/s)
0	345	483	346	486	1	3	3,16	4,08	23,54
1	277	489	279	492	2	3	3,61	4,65	22,04
2	215	502	217	505	2	3	3,61	4,65	22,04
3	155	521	157	524	2	3	3,61	4,65	22,04
4	99	544	102	547	3	3	4,24	5,47	20,32
5	46	572	48	575	2	3	3,61	4,65	22,04
							media	4,69	22,01
Diámetro al final de la traza									
Trazas	$x_s$	$y_s$	$x_i$	$y_i$	s	h	d (píxeles)	d (mm)	$v_{cr}$ (m/s)
0	328	484	330	487	2	3	3,61	4,65	22,04
1	262	492	264	495	2	3	3,61	4,65	22,04
2	200	506	202	510	2	4	4,47	5,77	19,79
3	143	525	146	527	3	2	3,61	4,65	22,04
4	88	549	91	552	3	3	4,24	5,47	20,32
5	36	578	38	581	2	3	3,61	4,65	22,04
							media	4,97	21,38

líquido estudiado. [12] No obstante, la ecuación 17 es empleada por algunos autores [14] para calcular la velocidad crítica de soplado necesaria ( $v_{cr}$ ) y predecir un diámetro de partícula ( $d_{cr}$ ) específico.

La velocidad media del aire necesaria (velocidad crítica de soplado) es de aproximadamente  $v_{cr} = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , para un diámetro medio de partícula ( $d_{cr}$ ) de 0,0047 m, obtenida de la figura 5, a partir de del promedio de la triple medición del diámetro de cada traza (tabla 6), determinado según el mismo procedimiento descrito.

Como se aprecia, entre el valor medio de la velocidad inicial del pele estudiado ( $3,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y la velocidad crítica de soplado calculada, se observa una diferencia de, aproximadamente, un 84 % entre la velocidad de aire necesario y la velocidad a la que sale la partícula. Esto puede deberse al apreciable gasto de energía necesaria para cambiar la dirección y fragmentar el chorro de fundente, que cae desde el horno.

## CONCLUSIONES

1. Se propone un procedimiento para la recuperación de las coordenadas de partículas en movimiento, a partir de la adquisición digital de su imagen, lo cual posibilita una descripción matemática de la función que caracteriza su desplazamiento.

2. Se establecen las bases para la validación de los modelos físicos desarrollados durante el estudio del proceso de fragmentación de fundentes fundidos, que emplean chorros de aire, demostrando la influencia no significativa del aire circundante en la trayectoria de vuelo de los peles obtenidos.

3. La metodología analítica propuesta coadyuvaría el estudio de los fenómenos de fragmentación de fundentes fundidos empleando chorros de aire, potenciando la determinación de los parámetros del régimen de soplado, que garanticen los rangos y clases granulométricas necesarias que conduzcan a un adecuado desempeño del proceso de soldadura.

4. Con la metodología desarrollada es posible estimar la zona de recolección de las partículas, permitiendo usar la técnica industrialmente.

5. Pueden estimarse que las mayores pérdidas (86 %) dinámicas del proceso están asociados al instante de destrucción del chorro y no de impulsión de las partículas.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los colaboradores Jorge Víctor Miguel Oria y Rafael Quintana Puchol, que han contribuido a la obtención y valoración de los resultados referidos en el artículo.

## REFERENCIAS

1. **PÉREZ PÉREZ, D.** "Consideraciones sobre las potencialidades del uso de los fundentes fundidos granulados con aire", En *XII Congreso Metalúrgico. METANICA 2007*. 2007: La Habana, Cuba.
2. **GÓMEZ PÉREZ, C.** *Obtención de fundente fundido para la SAW a partir de rocas minerales cubanas, Centro de Investigaciones de Soldadura*. 1996, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara. p. 104.

3. **CRUZ CRESPO, A.** "Fundente aglomerado aleado obtenido a partir de escorias de fundentes de alta sílice y alto manganeso". *Soldagem&Inspeção*, 2004. vol. 9 n° 2.
4. **PÉREZ PÉREZ, C.** *Fundente fundido con granos esféricos y procedimiento de obtención*. CU 23122 A1. 2006. Cuba.
5. **GÓMEZ, F.** *Torre vertical para la obtención de fundentes fundidos*. CIS. 2002, UCLV: Santa Clara.
6. **AYAMA, Y.** *Fabricación de fundente de tipo fundido con bajo hidrógeno y baja densidad para la soldadura bajo arco sumergido*. 1990. Japan.
7. **SANEJI, N.** *Producción de fundente fundido*. 1981.
8. **KONISHI, T.** *Production of fused flux for submerged arc weldind*. 1985: Japan.
9. **GÓMEZ PÉREZ, C.** *Fundente fundido con granos ovoides y procedimiento de obtención*. 2003. Cuba.
10. **PÉREZ PÉREZ, D.** "Potencialidades de la granulación horizontal con aire del fundente fundido CIS-F10". *Soldagem&Inspecao*, 2008. vol. 13 n° 3.
11. **GALIANO M., T.** *Pequeño Larousse de Ciencias Técnicas*. Colección Diccionario. 1988, Ciudad de la Habana. Editorial Científico-Técnica. 1056.
12. **VALDÉZ GONZÁLEZ, R.** *Consideraciones físicas sobre la atomización horizontal de líquidos de alta temperatura*, CIS. 2003, UCLV. Santa Clara. p. 76.
13. **GÓMEZ PÉREZ, C.** *Fundente fundido para la soldadura automática bajo arco sumergido y procedimiento de su obtención*. Patente 2000 - 0023. 2005. Cuba.
14. **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, n° 7, p. 6, 10.

## AUTORES

### Daniel Pérez Pérez

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

### Carlos René Gómez Pérez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias, Profesor Auxiliar, Investigador Titular, Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara, Cuba

### Francisco Arturo Ruiz Martínez

Licenciado en Física, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Departamento de Física, Facultad de Física, Matemática y Computación, UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

### Eriel Pérez Zapico

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



## **Origin Parameters of Fused Flux Grain Process Dispersion with Air**

### **Abstract**

Considerations about the fragmentation process with air of molten fluxes obtained by using raw Cuban materials for the welding process under submerged arch (S.A.W) are presented. The physical process of the flight trajectory and its validation during the granulation with air are not reported in the welding field. Therefore, the aim of this work is to establish a procedure that determines the rates and departure angles of pellets during impulsion and dispersion, in addition to contribute criteria on the frictional effect of the surrounding atmosphere on the shape of the trajectory curve of the pellets formed. These aspects may be corroborated with data obtained from the digital processing of filmed images of the fragmentation process and movement of the pellets formed. It is demonstrated that the efficiency of the procedure developed for the obtaining of the flight parameters and the non-influence of the air frictional force on the modification of the particle's flight trajectory, allows the establishment of a methodology that makes it possible to begin studies about the fragmentation phenomena of molten fluxes by using air jets, which guarantee the necessary rank and granulometric types for an adequate performance of the welding process.

Key words: fluxes, obtaining, granulation, atomization, particles dispersion