

# **Influencia del desgaste en trituradoras de impacto horizontal en las funciones de fragmentación.**

Dorliana de la Aurora López Ortiz <sup>a</sup>, José Ramón Hechaverría Pérez <sup>b</sup>, Alfredo Coello Velázquez <sup>c</sup>, Juan María Menéndez Aguado <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Oviedo, España, <sup>b</sup> Universidad de Holguín, Cuba, <sup>c</sup> Inst. Sup. Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

## **1. Resumen**

En este trabajo se muestran los resultados de trituración de roca caliza en una trituradora horizontal de impacto (THI), cuando se modifican los niveles de desgaste en martillos y revestimiento. Se realizó una serie de ensayos sobre monotamaños, con la finalidad de evaluar la influencia de los diferentes niveles de desgaste en los parámetros de las funciones de selección y rotura. Se determinó la función de fragmentación utilizando los modelos de Reid (1965), Whiten and White (1979) and Nikolov and Lucion (2002), y se probó que es necesaria la introducción de una corrección en los mismos, ya que no consideran la variación de B con el desgaste.

**Palabras clave:** trituración, trituradoras de impacto, modelización

## **2. Introducción**

La trituración y molienda de minerales consume un elevado porcentaje de la energía eléctrica que se produce a escala mundial (según Coello [1]; 50 - 70 % de la energía consumida en las plantas de beneficio). La importancia de disponer de modelos que permitan predecir el comportamiento de las diferentes variables de operación y dimensionar los equipos de forma que garanticen la máxima eficiencia, hace que este trabajo adquiera relevancia en el sector de producción de materiales de construcción. En la actualidad, las trituradoras por impacto son ampliamente utilizadas en los procesos de trituración, por su alta versatilidad, bajo consumo, adaptabilidad del producto, y por contar con un funcionamiento simple. A pesar de su importancia, el modelado del comportamiento de trituración de trituradoras de impacto ha recibido poca atención en lo que se refiere al modelado y simulación de su comportamiento de fragmentación [2].

Los métodos de balance de la población de partículas (PBM) han sido utilizados con éxito en la modelación y simulación de la trituración y molienda de minerales [3], [4] y [5].

Los principales modelos de trituración por impacto, basados en los métodos de balance de la población de partículas, se encuentran en los trabajos de Whiten y White [6], Nikolov y Lucion [7], Nikolov [2] y [8], Shi et al [9] y Vogel y Peukert [10], Hechaverría et al [11], Coello et al [12], Zhao et al [13].

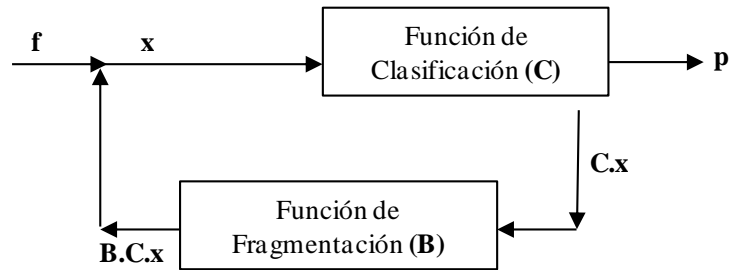
En las publicaciones de Nikolov y Lucion [7], Nikolov [2] y [8], y Zhao [13], se explica el comportamiento de la trituración tomando en cuenta la influencia de la energía cinética de impacto y del flujo de alimentación de mineral. En esos modelos no se evalúa el efecto de la regulación del tamaño de salida del producto. En los trabajos de Shi et al [9], se simulan trituradoras de impacto durante el procesamiento de minerales de carbón. Esta simulación está basada en el efecto de la energía específica de trituración y la regulación del tamaño de salida del producto en la trituradora.

Vogel y Peukert [10], modelan trituradoras de impacto a partir de las variaciones de la energía cinética y la regulación del tamaño de salida del producto.

Hechaverría et al [11] y Coello et al [12], aplicaron los modelos de Whiten y White [6], Nikolov [2] y [8], para modelar el proceso de trituración por impacto tomando en cuenta, la velocidad y flujo de alimentación, así como la regulación de tamaño de salida del producto. En el mismo se confirma la aproximación de los resultados con los modelos estudiados.

El Modelo de Whiten y White [6], fue desarrollado utilizando trituradoras de mandíbulas y conos, en el cual se asume que el material de rotura y descarga se puede calcular a partir del contenido total. Cuando estos parámetros del modelo se calculan a partir de los datos de alimentación y los productos, las derivaciones de datos proporcionan predicciones excelentes sobre un rango realista para una amplia variedad de máquinas de trituración [17]. Este modelo, presentado en la Fig.1 describe un proceso donde las partículas pueden someterse a más de un ciclo de fragmentación tal como se representa en la Eq. (1). Se supone que las partículas que entran en la trituradora están sujetas a ciclos sucesivos de clasificación (selección de fragmentación basada en el tamaño) y fragmentación. Las partículas finas son más propensas a pasar a través de la trituradora sin romperse. Las partículas seleccionadas para la rotura se romperán en un patrón que depende principalmente de las características del mineral, y las partículas secundarias resultantes se clasificarán adicionalmente hasta que se descargue la trituradora [16].

Whiten y White expresaron este comportamiento en un modelo matricial que incorpora dos funciones: una función de clasificación o selección,  $C$ , que define la probabilidad de que una partícula de un tamaño dado sea seleccionada para la rotura y una función de distribución de rotura,  $B$ , que describe el patrón de rotura



de un mineral.

**Fig. 1.** Esquema del modelo de Whiten y White [1].

$$p = (I - C).(I - BC)^{-1} f \quad (1)$$

Donde  $p$  vector que caracteriza la distribución de tamaño del producto,  $x$  vector que representa la cantidad en cada fracción de tamaño en la trituradora,  $f$  vector que caracteriza la distribución de tamaño del mineral de alimentación,  $I$  matriz identidad,  $C$  matriz que caracteriza la función de clasificación, cuantifica la probabilidad de fragmentación de las partículas de cada tamaño dado.  $B$  matriz de distribución de la fragmentación, una matriz triangular inferior que caracteriza la forma en que se distribuyen las partículas formadas por la fragmentación de las partículas de mayor tamaño. Whiten y White obtuvieron el modelo de la Eq. (2) para la determinación de la razón de fragmentación (función de clasificación) en trituradoras de impacto y de conos.

$$\begin{aligned}
 C_{(xi)} &= 0 & xi < k_1 \\
 C_{(xi)} &= 1 - \left( \frac{xi - k_2}{k_1 - k_2} \right)^{k_3} & k_1 < xi < k_2 \\
 C_{(xi)} &= 1 & xi > k_2
 \end{aligned} \quad (2)$$

$k_1$  (mm) representa el tamaño mínimo de las partículas que pueden fragmentarse en las condiciones del proceso,  $k_2$  (mm) tamaño de partículas para las cuales la

razón de fragmentación es el 100 %,  $k_3$  es una constante adimensional que depende del tipo de material

Whiten y White representan la función de distribución mediante la Eq.3.

$$B(x_i, x_j) = K \cdot \left( \frac{x_i}{x_j} \right)^{n1} + (1 - K) \cdot \left( \frac{x_i}{x_j} \right)^{n2} \quad (3)$$

Donde  $K$  denota la fracción de masa de partículas finas,  $x_i$  (mm) es el tamaño mínimo de las partículas del intervalo  $i$ ,  $x_j$  (mm) es el tamaño promedio de las partículas fragmentadas que se encuentran en el intervalo de tamaño  $j$ ,  $n1$  y  $n2$  son coeficientes del material y caracterizan la forma de distribución de las fracciones finas y gruesas del material (adimensional).

El modelo de Nikolov y Lución toma como punto de partida el modelo matricial de Whiten y White, Eq. (1), donde se considera la fragmentación como un proceso repetitivo. Este nuevo modelo basado en la trituración por impacto es representado por la Eq. (4):

$$C(x_i) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\min}} \right)^k \right] \quad (4)$$

Donde  $Cx_i$  es la razón o probabilidad de fragmentación de las partículas en el intervalo de tamaño  $i$ ,  $x_{\min}$  (mm) tamaño de partícula por debajo del cual la razón de fragmentación es cero en las condiciones del proceso,  $x_i$  (mm) tamaño de partícula del intervalo  $i$ ,  $k$  es el coeficiente adimensional que depende de las características del proceso. Para partículas menores que  $x_{\min}$ ,  $C(x_i) = 0$  por definición.

En los estudios antes indicados, no se hace mención sobre la sustitución de piezas de la trituradora ni de la influencia que puede tener el desgaste de la misma para evaluar el comportamiento de la trituración.

En la publicación de Farag [14], se analizó el comportamiento del material triturado con la sustitución de martillos originales de la trituradora por unos diseñados con un nuevo material de aleación de Fundiciones ADI (Austempered Ductil Iron), tanto los martillos originales como los fabricados fueron probados en el laboratorio y en el campo, sin embargo, en este estudio el proceso de trituración se llevó a cabo con granos de maíz y tubos de plástico, aunado a ello, no se utilizó el método de

balance de la población de partículas (PBM) para la modelación y simulación de la trituración ni se sustituyó el revestimiento de la trituradora.

En este trabajo constituye una novedad el modelado de las trituradoras de impacto teniendo en cuenta el desgaste de martillos y revestimiento de la trituradora de impacto.

### 3. Metodología

Se estableció el diseño experimental de la Fig. 2 para la realización de los ensayos. El mineral de alimentación se clasificó en cuatro mono clases de tamaños de partículas, cada una de las cuales fue triturada con diferentes condiciones de operación de la trituradora; trituradora desgastada (TD), martillos desgastados - revestimiento nuevo (MD-RN), martillos nuevos - revestimiento desgastado (MN-RD) y trituradora con sus componentes internos nuevos (TN) y sin regulación a la salida de la trituradora. Se alimentó el triturador con 200 g de mineral para cada tamaño de rejilla en la boca de alimentación.

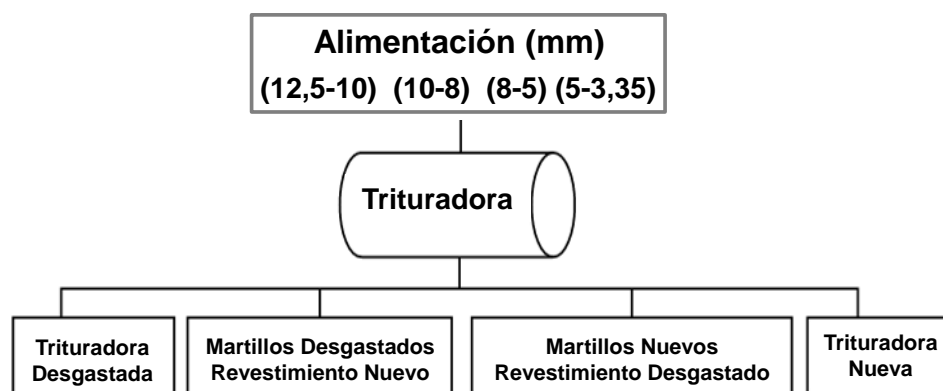


Fig.2. Esquema para diseño de ensayos.

En la Fig. 3 se muestra la trituradora de impacto utilizada para el estudio, la cual presenta las siguientes características; fabricante FRITSCH, modelo Cross Beater Mill "Pulverisette 16", tamaño máximo de alimentación 20 mm, 3 martillos, 2850 rpm y 1100 W de potencia.

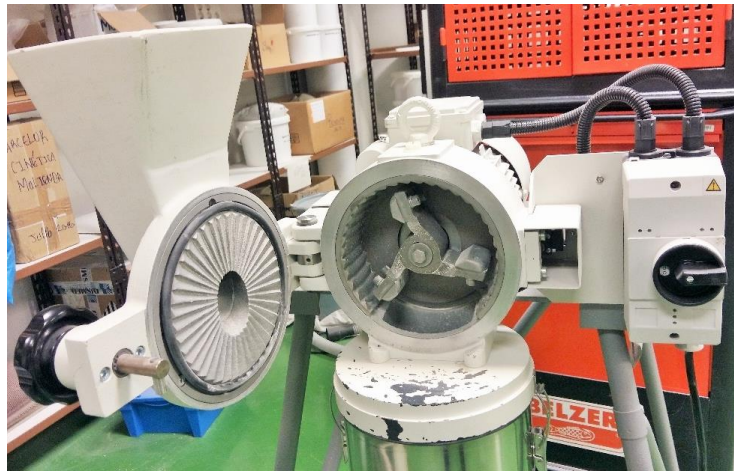


Fig.3. Trituradora de impacto.

En la Fig. 4 se muestran los componentes internos de la trituradora nuevos y desgastados.

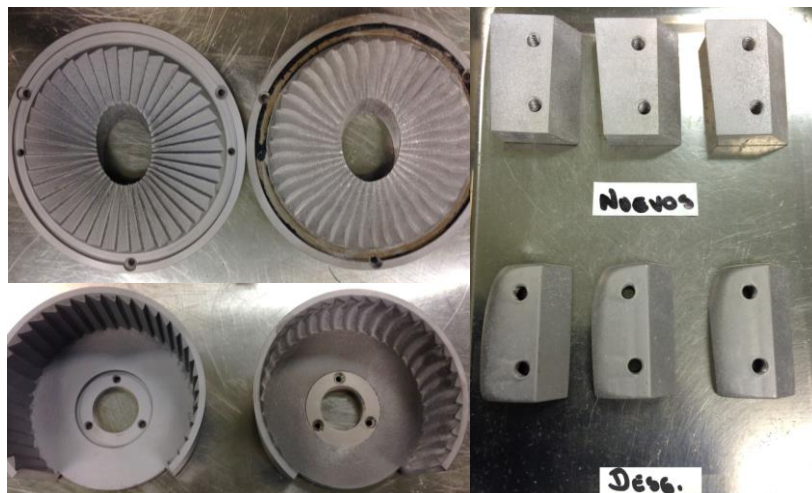


Fig.4. Revestimientos y martillos nuevos y desgastados.

### 3.1. Determinación de las funciones de fragmentación de forma experimental

Para la determinación de las funciones de fragmentación con los datos experimentales se utilizó el método de Vogel y Peukert [10], el cual establece la determinación de la razón de fragmentación, mediante ensayos en laboratorio con una trituradora de impacto. Para ello se utilizó la Eq. 5.

$$C_j = \frac{M_i}{M} \quad (5)$$

Donde  $M_i$  (g) es la masa del producto cernido en el tamiz  $i$ , y  $M$  (g) es la masa total de la muestra del producto.

Se utilizó la formulación de Reid [15] para determinar la distribución de fragmentación de forma individual ( $b_{ij}$ ) y acumulativa ( $B_{ij}$ ), el cual es un modelo de balance que puede aplicarse cuando se conocen los valores de razón de fragmentación  $C$  y la fracción de masa del producto retenido  $p$ .

$$p_i = \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot C_j \cdot f_j \quad (6)$$

Donde  $p_i$  es la fracción de masa del producto retenido en el tamaño  $i$ ,  $C_j$  es la razón de fragmentación de las partículas de tamaño  $j$ ,  $b_{ij}$  es la fracción individual de tamaño máximo  $i$  obtenida de la fragmentación de las partículas de tamaño  $j$  y  $f_j$  fracción de masa del mineral de alimentación retenida en el tamaño  $j$ .

En este estudio como el mineral de alimentación se compone de una monoclasa de tamaño, la Eq. (6) se simplifica a la Eq. (7).

$$p_i = b_{ij} \cdot C_j \quad (7)$$

### 3.2. Modelización de las funciones de fragmentación

Para evaluar la correspondencia de los diferentes datos de las funciones de fragmentación obtenidos durante los ensayos, fue necesario determinar las mismas utilizando las Eq. (2), Eq. (3) y Eq. (4). Se calcularon los coeficientes que mejor representaran el proceso utilizando como base un algoritmo de optimización propuesto por Hechaverría [18], el cual se modificó para obtener el comportamiento de las funciones de fragmentación cuando varía el grado de desgaste de los revestimientos y los martillos en la trituradora. Este algoritmo permitió minimizar las diferencias entre los valores obtenidos por ensayos y los determinados con los modelos. Para la validación de los modelos y ajuste de los resultados, se seleccionó un nivel de confianza de un 95 %. Las pruebas de hipótesis utilizadas se basan en las comparaciones de la prueba de Chi cuadrado.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Comportamiento del producto

En la Fig. 4 se observa que para el caso del tamaño de alimentación 12,5/10 mm, el material tiende a fragmentarse preferiblemente en partículas que van desde aproximadamente 8 hasta 11 mm, siendo más predominante la influencia de la

trituradora con MD-RN, en la generación de partículas más finas, este comportamiento es similar para el intervalo de tamaño 10/8 mm, pero diferente para los tamaños 8/5 y 5/3,35 mm (Fig. 5). Esto corresponde a que la fase dominante de fragmentación ocurre cuando las partículas golpean el revestimiento, en este caso el revestimiento es totalmente nuevo, y al ser partículas de mayor tamaño, tienen más peso y por gravedad caen directamente a la cámara de fragmentación, donde son impulsados nuevamente por los martillos a la placa de revestimiento, hasta la total fragmentación. Otro comportamiento interesante a resaltar es que en los tamaños más gruesos (12,5 a 8 mm) el efecto del desgaste se hace más favorable que para el caso de la trituradora con los MN-RD, llegando incluso casi a converger con la trituradora con las piezas internas nuevas (TN), donde para tamaños gruesos, la influencia de los martillos nuevos del equipo utilizado, es irrelevante para partículas de mayor tamaño, lo cual puede deberse a las dimensiones del tamaño de alimentación, las condiciones del proceso, o porque el ángulo de desgaste que presenta el martillo favorezca al desplazamiento o impulso de la partícula, para que impacte contra el revestimiento y se produzca una mayor producción de finos.

Para los intervalos 8/5 y 5/3,35 mm, al ser de menor tamaño se tiene también una partícula más resistente. La partícula con el tamaño de grano más pequeño [19] parece ser menos dañada después de chocar con los martillos, estas al tener menos peso tienen la posibilidad de incorporarse o permanecer en la superficie de los martillos sin sufrir una fragmentación significativa. Para estos dos intervalos, se tiene mayor producción de finos con la TN, menos con la TD, y valores intermedios de finos con las otras dos condiciones de la trituradora.



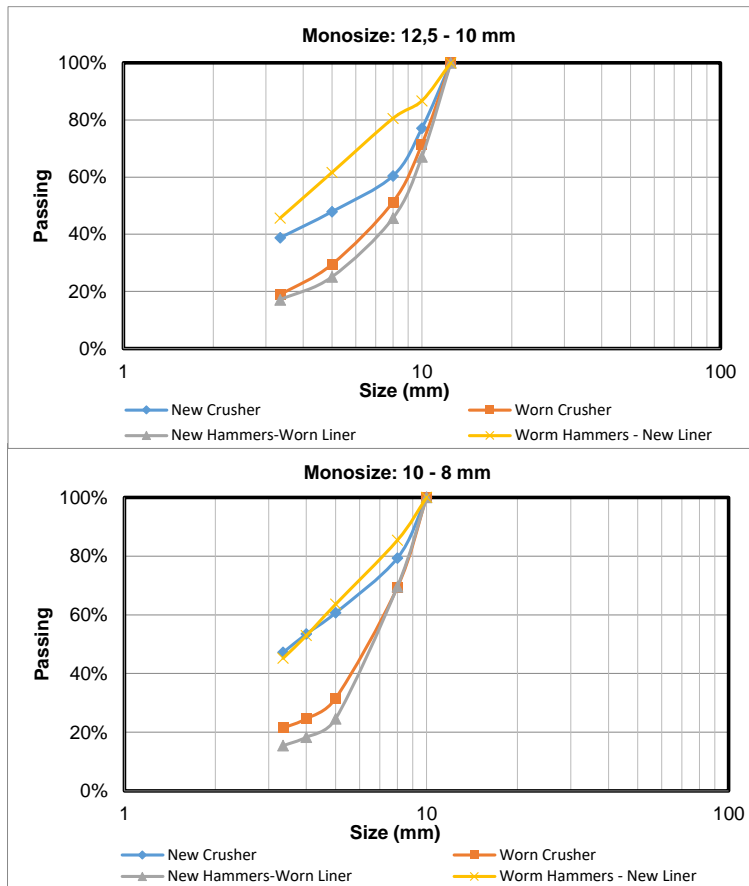


Fig.4. Comportamiento del producto para los monotamaños (12,5-10) y (10-8) mm.

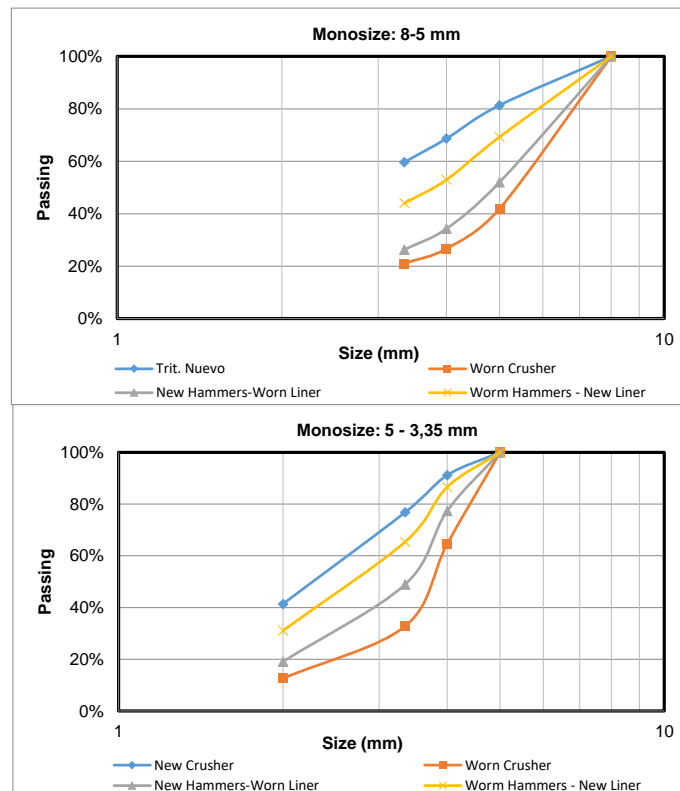


Fig.5. Comportamiento del producto para los monotamaños (8-5) y (5-3,35) mm.

## 4.2. Comportamiento de la razón de fragmentación (C)

En la Fig.6 se observa que para la trituradora con las piezas internas totalmente nuevas (TN), la función C es más o menos constante en todas las granulometrías mientras que en cualquier otra condición los valores de la función disminuyen, especialmente en los tamaños finos donde se tiene menos probabilidad de fractura. Respecto a estos tamaños finos, se tiene que C más desfavorable en el caso de la TD, y menos desfavorable cuando se tiene la trituradora con el RN-MD.

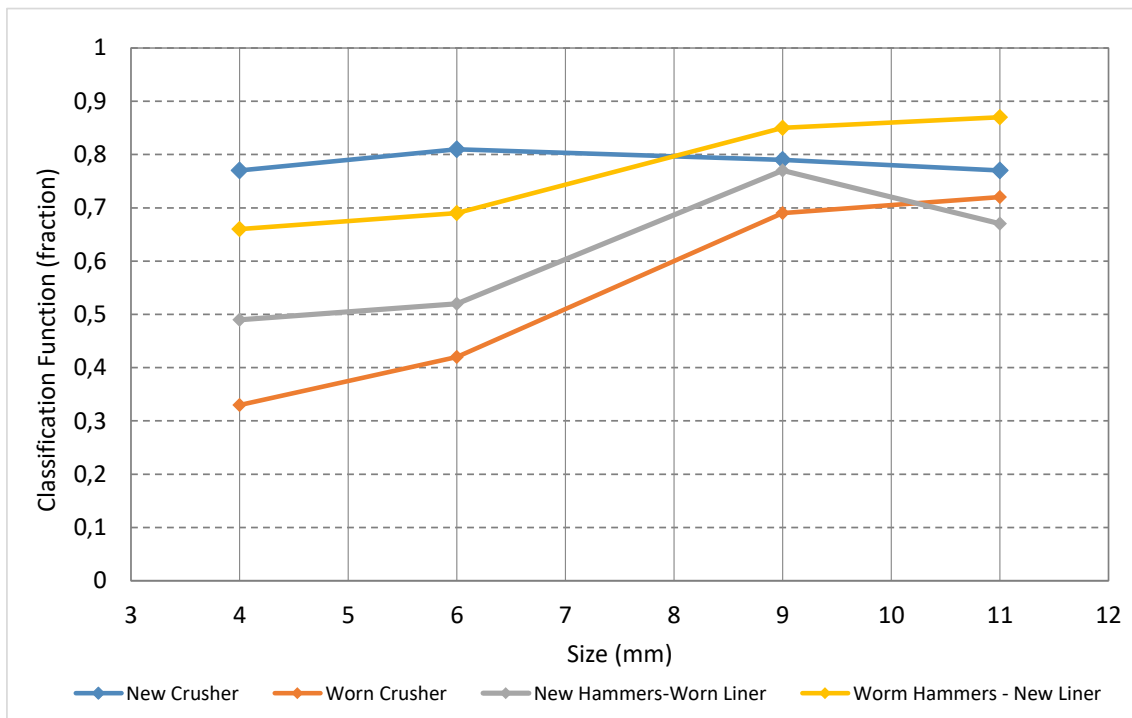


Fig.6. Comportamiento de la función C determinada experimentalmente.

Para los tamaños más gruesos la función C presenta valores de mayor magnitud y constantes, indicativo de que la rotura es más efectiva cuando se tiene una relación de tamaños mayores. Otro comportamiento interesante a resaltar es el efecto de los MD-RN en la probabilidad de fractura, la cual se hace mayor a medida que se incrementa el tamaño de la partícula, y sus valores superan incluso a la condición de la trituradora con las piezas internas totalmente nuevas. Para el comportamiento de la razón de fragmentación con los MN-RD se observa que sus valores se ubican por debajo de la TD en los tamaños mayores lo que permite inferir que la influencia de los martillos nuevos en los tamaños mayores es casi irrelevante en cuanto a la probabilidad de fractura y producción de finos.

- Modelización de C

Los coeficientes obtenidos para el modelo de Whiten y White (1979);  $k_1 = 2$  mm y  $k_2 = 16$  mm se mantuvieron constantes para las cuatro condiciones de la trituradora. De acuerdo a estos datos se puede inferir que las partículas menores a 2 mm (probabilidad de rotura igual a 0) pasan por el triturador sin fragmentarse; mientras que las partículas mayores que 16 mm siempre serán fragmentadas y la probabilidad de fragmentación será igual a 1. Las partículas que se encuentran entre el intervalo  $2 < x_i < 16$  mm serán fragmentadas o parcialmente fragmentadas según su tamaño y su probabilidad de fractura será menor a medida que disminuya el tamaño de la partícula.

En la tabla 1 se muestran los datos del coeficiente de  $k_3$ , la tendencia de los datos corresponde con el comportamiento que debe tener el producto y la función C de acuerdo a las condiciones de la trituradora. Estos valores 3 indican que;

-Con la trituradora con todos sus componentes internos nuevos ( $k_3 = 4,50$ ), se incrementa C y se obtiene un producto (p) más fino.

-Con la trituradora desgastada ( $k_3=1,40$ ) se obtendrán los menores valores de C y el producto será más grueso.

-Cuando los martillos o los revestimientos están desgastados ( $k_3= 3$  y  $2$ ), la función C y el producto tomarán valores intermedios de  $k_3$  entre los casos anteriores.

El modelo de Nikolov y Lución, ofrece una tendencia similar al expuesto anteriormente, con valores de  $k$  que ofrecen el mismo comportamiento y un  $d_{min} = 2$  mm.

Model	$k - k_3$			
	WC	WH-NL	NH-WL	NC
Whiten and White (1979)	1,44	3,00	2,00	4,50
Nikolov and Lucion (2002)	0,33	0,56	0,40	0,66

Modelo	$k - k_3$			
	TD	MD-RN	MN-RD	TN
Whiten y White (1979)	1,44	3,00	2,00	4,50
Nikolov y Lucion (2002)	0,33	0,56	0,40	0,66

Tabla 1. Valores de los coeficientes obtenidos para cada modelo en función de la condición de la trituradora.

En las Fig. 7 y Fig. 8 se observa que los valores de la función C obtenidos mediante el modelo de Whiten y White (1979) presenta un buen ajuste y correspondencia con los datos experimentales, principalmente cuando se tiene la trituradora con los componentes internos desgastados, seguida de a trituradora con los MD-RN.

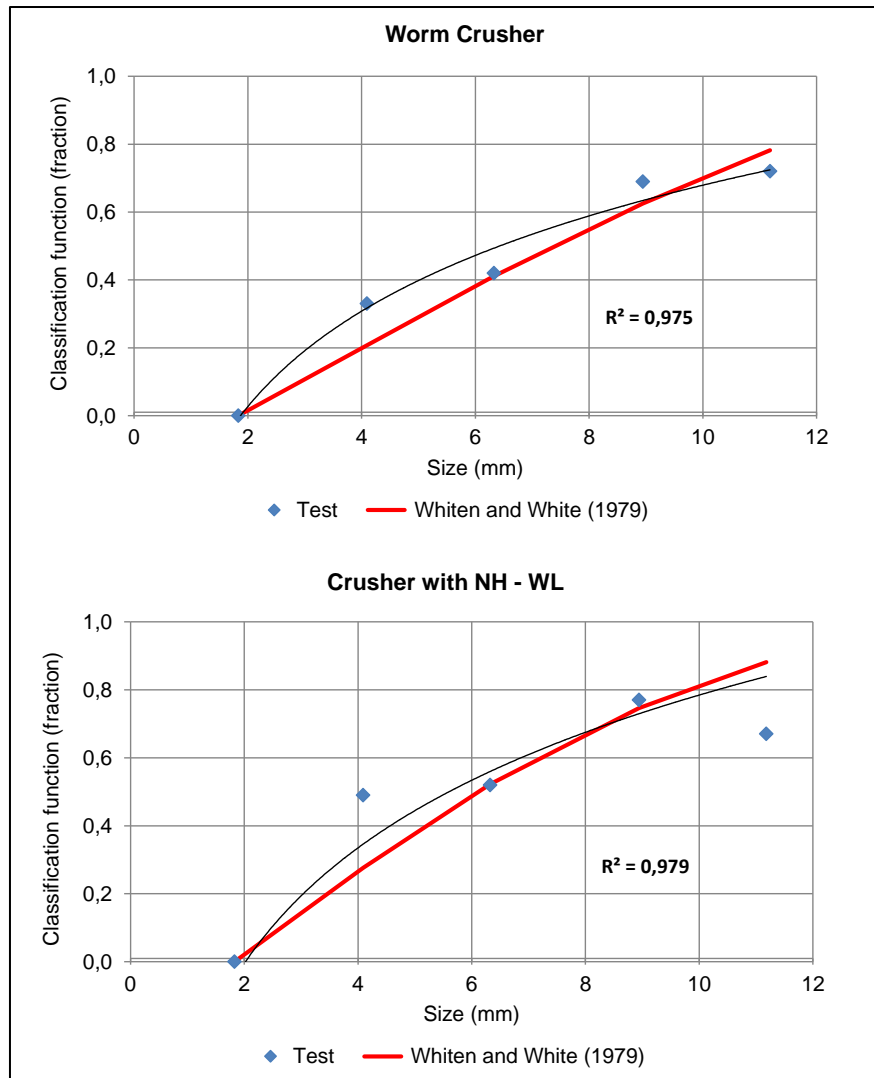


Fig.7. Comportamiento de la función C obtenida de forma experimental y mediante el modelo de Whiten y White (1979) para la TD y con MN-RD.

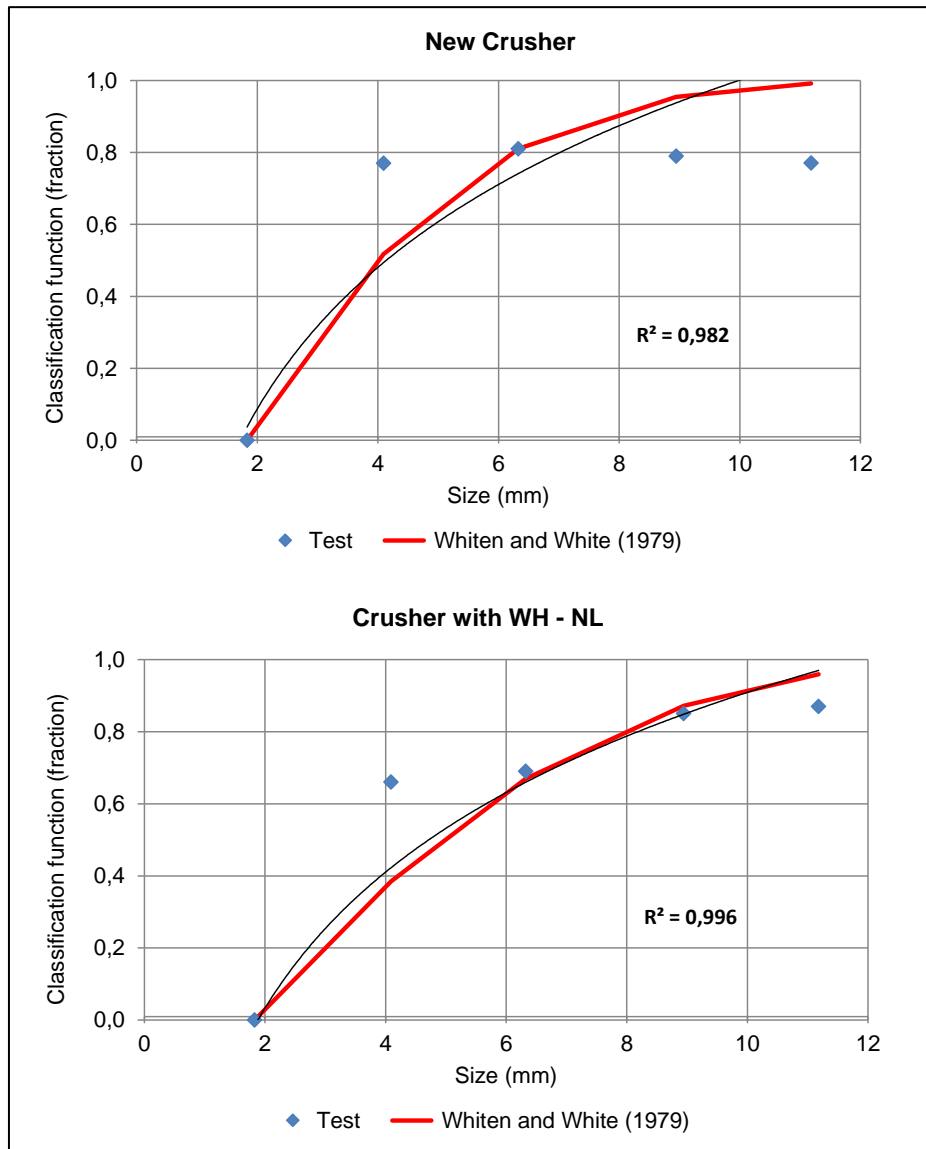


Fig.8. Comportamiento de la función C obtenida de forma experimental y mediante el modelo de Whiten y White (1979) para la TN y con MD-RD En las Fig.9 y Fig. 10 los resultados para el modelo de Nikolov y Lución (2002), ofrece una tendencia similar al expuesto anteriormente, pero en este caso los valores de Chi-cuadrado son mayores, lo que puede estar relacionado con el hecho de que este modelo fue propuesto específicamente para la trituración por impacto.

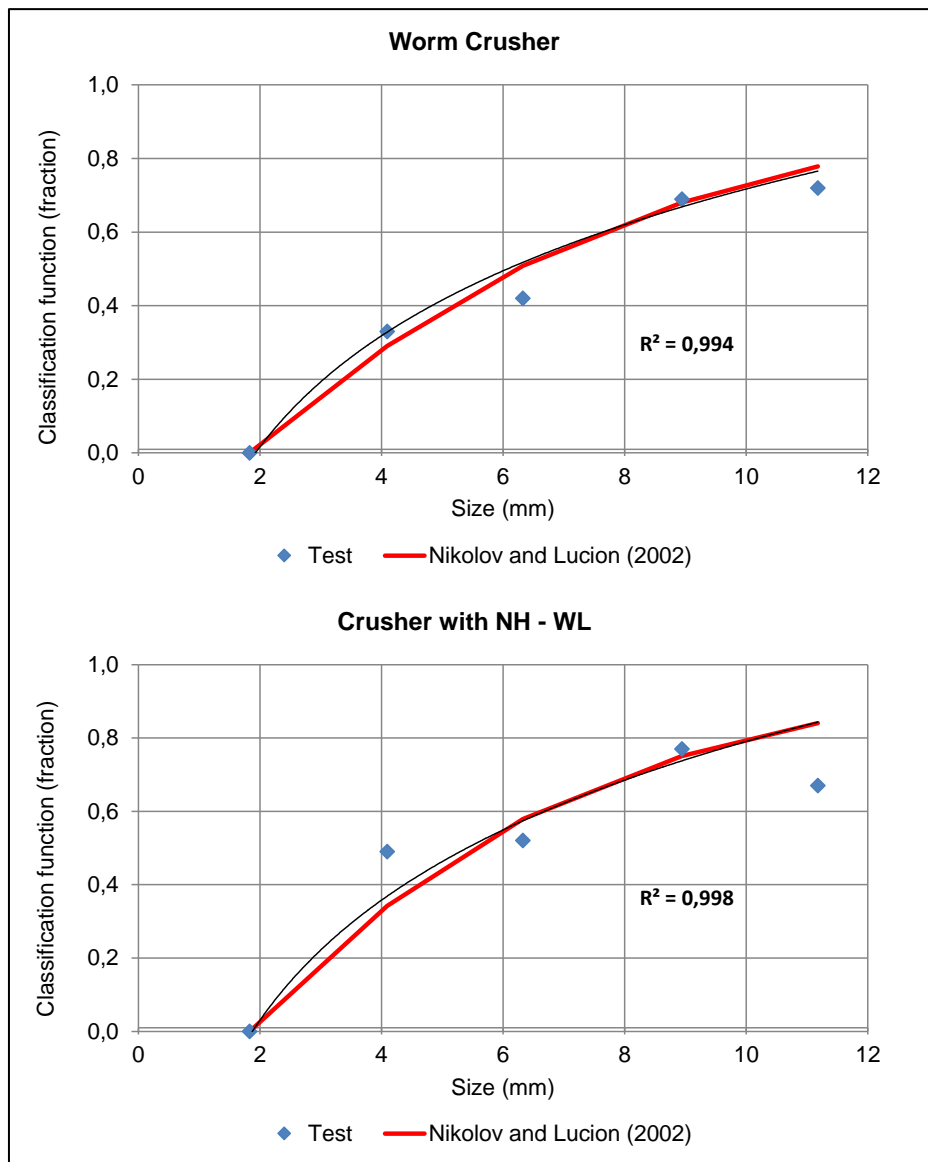


Fig.9. Comportamiento de la función C obtenida de forma experimental y mediante el modelo de Nikolov y Lucion (2002) para la TD y con MN-RD.

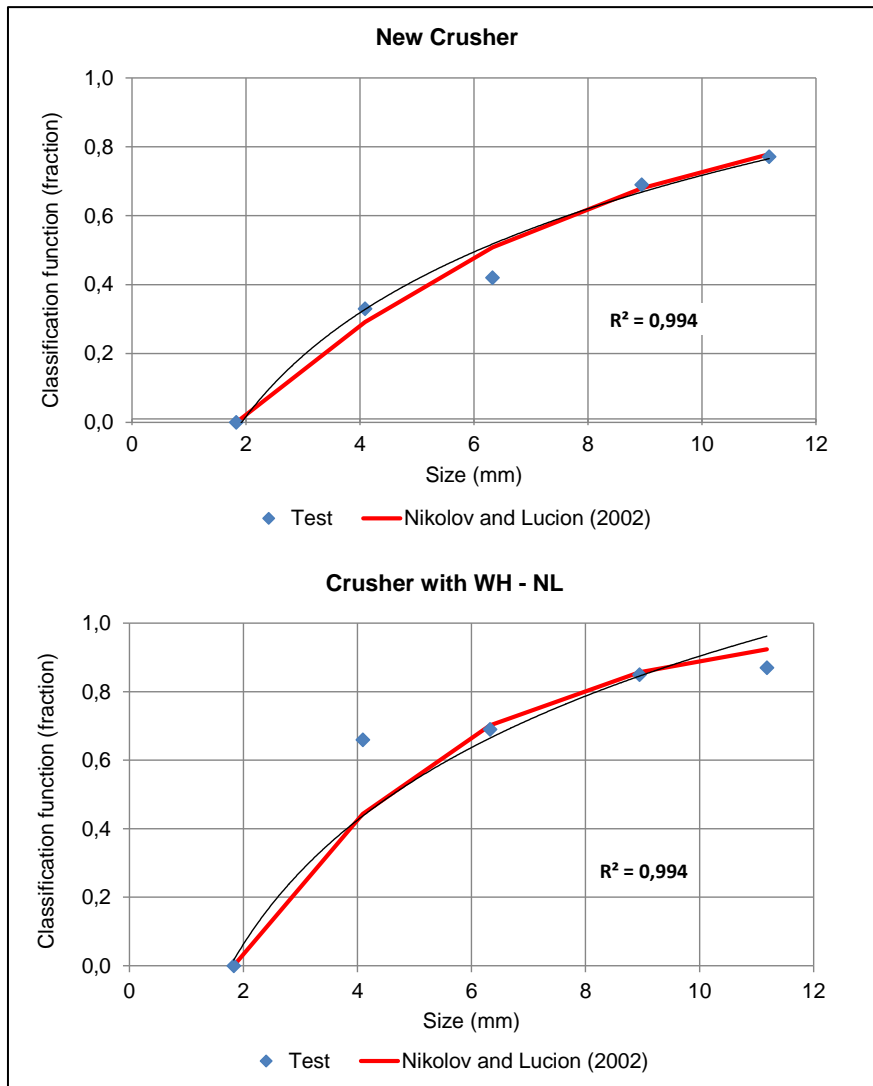


Fig.10. Comportamiento de la función C obtenida de forma experimental y mediante el modelo de Nikolov y Lucion (2002) para la TN y con MD-RD.

#### 4.3. Comportamiento de la distribución de fragmentación (B)

En las Fig. 11 y Fig.12 se puede observar que la función B presenta gráficamente un comportamiento de rectas con pendientes similares. Existe una tendencia al incremento de las fracciones con el aumento del tamaño de grano y viceversa, este comportamiento es coincidente en los cuatro intervalos de tamaño estudiados y para las cuatro condiciones de la trituradora. Las partículas se rompen en un patrón de rotura dependientemente de las características del mineral [6], por ello la naturaleza auto conservante de la distribución de tamaños indica que los patrones de fisuras que se forman en las partículas en el molino de martillo son

geométricamente similares [20]. De acuerdo con Austin [21], [10] y [22], la distribución de la fragmentación  $B_{i,j}$ , depende del tipo de material y de la energía de impacto, en nuestro caso no se evaluó la influencia de la energía cinética, sino la del desgaste de la trituradora, por tanto se pudo demostrar que el estado de las piezas internas de la trituradora (martillos-revestimiento) presentan una influencia significativa en este parámetro.

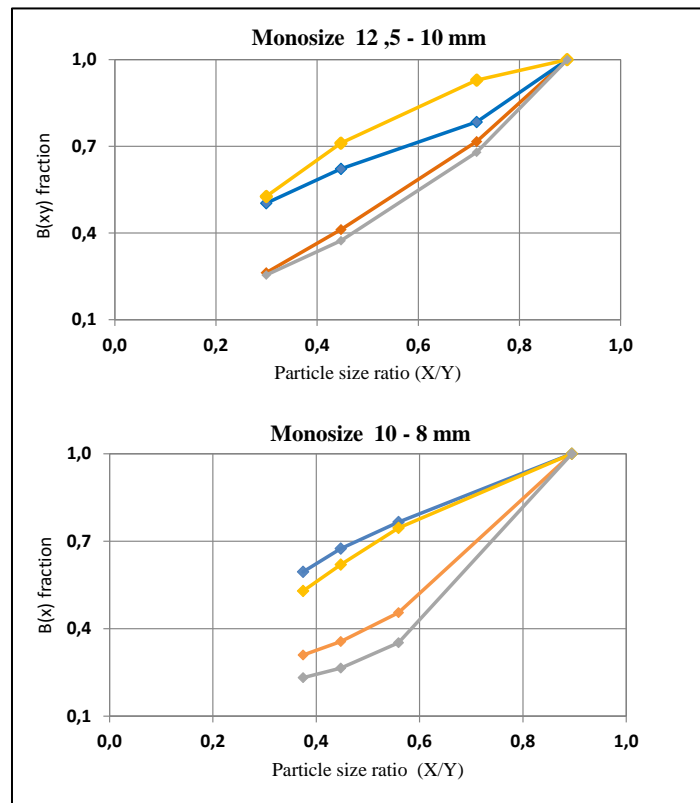


Fig.11 Comportamiento de la función  $B_{i,j}$ , para la trituradora sin rejilla



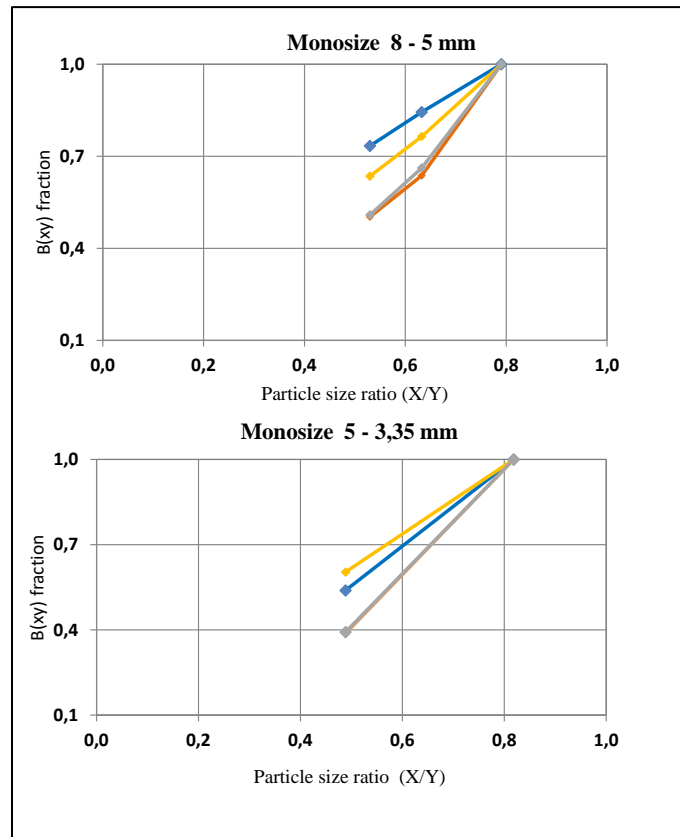


Fig.12 Comportamiento de la función  $B_{i,j}$ , para la trituradora sin rejilla

- Modelización de B

En la tabla 2, se muestran los resultados de los coeficientes calculados por ajuste lineal, para cada condición de la trituradora y monotamaños. Estos datos se enmarcan entre los valores típicos reportados por diferentes autores, según Austin y Concha [23], los valores de  $n_1$  oscilan entre 0,5 a 1,5 y los de  $n_2$  varían entre 2,5 y 5. En nuestro caso los valores de  $n_2$  se mantuvieron constantes con una magnitud de 2,89, en algunos casos estos coeficientes suelen mantenerse constantes, para reducir el número de parámetros utilizados y, por tanto, investigar la sensibilidad de otros [24]. En la mayoría de la literatura consultada, cuando se utiliza el modelo de Whiten y White (1979) para la simulación del comportamiento de las trituradoras de cono, los valores de  $k$ ,  $n_1$  y  $n_2$  se suelen fijar en 0,2, 0,5 y 2,5, respectivamente. Un mayor valor para la fracción fina ( $k$ ) en nuestro caso refleja el hecho bien conocido de que el producto emitido por trituración por impacto contiene más finos que el emitido por trituradoras de cono o mandíbulas [2]. Por tanto, los coeficientes presentados en este trabajo son resultado del mejor ajuste al modelo.

Monotamaño ( 12,5 - 10) mm		
Estado de la trituradora	k	n1
TD	0,98	0,84
MD-RN	1,15	0,72
MN-RD	0,98	0,96
TN	1,04	0,77
Monotamaño ( 10 - 8) mm		
Estado de la trituradora	k	n1
TD	0,75	0,74
MD-RN	1,15	0,72
MN-RD	0,71	1,14
TN	1,17	0,77
Monotamaño ( 8 - 5) mm		
Estado de la trituradora	k	n1
TD	0,83	0,63
MD-RN	1,15	0,72
MN-RD	1,05	0,91
TN	1,17	0,77
Monotamaño ( 8 - 5) mm		
Estado de la trituradora	k	n1
TD	0,90	0,81
MD-RN	1,15	0,72
MN-RD	1,22	0,80
TN	1,26	0,68

Tabla 2. Valores de los coeficientes para la distribución de fragmentación  $B_{i,j}$ . Las variaciones de los coeficientes, constituyen una limitante y su vez una mejora en la determinación de las funciones de fragmentación, ya que no existen estudios previos que evalúen la influencia del desgaste de la trituradora con el modelo de balance de población de partículas para contrastar los resultados obtenidos.

## 5. Conclusiones

Se definieron los procedimientos para determinar el comportamiento de las funciones B y C considerando el desgaste de los componentes internos de la THI. Los resultados obtenidos y la correspondencia con los modelos, describen con un alto grado de certeza el comportamiento de las funciones B y C, en dependencia del desgaste de la THI.

En referencia a la función C, los resultados evidencian claramente que la fragmentación es más favorable con la TN y cuando se tienen MD – RN.

Se demostró que la función B, es dependiente del desgaste de la trituradora. Por tanto, se justifica la necesidad de introducir correcciones, en los modelos

estudiados. Esto constituye una mejora de los modelos precedentes y una novedad en el contexto de la modelación y simulación de THI mediante los PBM.

## **6. Agradecimientos.**

El presente trabajo ha contado con la financiación del proyecto europeo H2020 OptimOre (Grant nº 642201).

## **7. Referencias.**

- [1] C. A, "Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de la laterita. (Tesis doctoral)," Instituto de Minas de San Petersburgo. Rusia, 1993.
- [2] S. Nikolov, "A performance model for impact crushers," vol. 15, pp. 715–721, 2002.
- [3] H. Garcés, I., León, H. y Muñoz, "Aplicación del modelo matricial en una operación de trituración.," Rev. Met., vol. 26, no. 4, pp. 215–223, 1990.
- [4] J. A. Kobachicawa Ch, "Diseño de un Controlador por Lógica Difusa para una planta de trituración secundaria y terciaria. Tesis de Maestría," Universidad de Lima. Perú, 2006.
- [5] A. Ozkan, M. Yekeler, and M. Calkaya, "Kinetics of fine wet grinding of zeolite in a steel ball mill in comparison to dry grinding," Int. J. Miner. Process. vol. 90, no. 1–4, pp. 67–73, 2009.
- [6] W. J. White, M. E y Whitten, "A breakage function suitable for crushing models," in Fourth Tewksbury Symposium, p. 19.1-19.32, 1979
- [7] C. Nikolov, S., Lucion, "Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers". In: Proceedings of the 10th European Symposium on Comminution, C3.2, pp. 1–10, 2002.
- [8] S. Nikolov, "Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers," pp. 219–225, 2004.
- [9] N. Djordjevic, F. N. Shi, and R. D. Morrison, "Applying discrete element modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers," Miner. Eng., vol. 16, no. 10, pp. 983–991, Oct. 2003.
- [10] L. Vogel and W. Peukert, "From single particle impact behaviour to modelling of impact mills," vol. 60, pp. 5164–5176, 2005.

- [11] H. Pérez, J. Ramón, C. Velázquez, A. Lázaro, and L. Brown, "Aplicación de los modelos de Nikolov en la trituración por impacto del mineral zeolita del yacimiento San Andrés, Holguín, Cuba," 2008.
- [12] A. Coello-velázquez, J. Hechaverría, A. Leyva-Mormul, J. M. Menéndez-Aguado, and E. Leyva-ramírez, "Modelo de Whiten (1972) modificado para modelación de la trituración de la antracita residual de Nicaro.," no. 1972, pp. 13–28, 2015.
- [13] L. Y. Zhao Li-mei, Chen Lun-jun, Su Ming, HE Feng, Zhang Da-bon, "Modeling and simulation on crushing process of impact crusher," J. China Coal Soc., 2013.
- [14] A. Farag, M. Adly, and H. A. Radwan, "Redesign manufacture an impact crusher hammer mill using advance iron casting," vol. 2, no. 7, pp. 1196–1209, 2015.
- [15] K. J. Reid, "A solution to the batch grinding equation," Chem. Eng. Sci., vol. 20, pp. 953–963, 1965.
- [16] White M E y Whiten W. J., "Modelling and simulation of high tonnage crushing plants". In: Proceedings of the 12th International Mineral Processing Congress, pp. 148–158, 1972.
- [17] W. Whiten, "Models and Control Techniques for Crusing Plants," SME, vol. 22, pp. 217–224, 1984.
- [18] Hechavarría José Ramón, "Modelación de la Trituración por Impacto en la Planta de Zeolita de San Andrés. Tesis Doctoral," Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.Cuba, 2011.
- [19] D. Shi, Fengnian. , Kojovic, T., Esterle, J. S. y David, "An energy-based model for swing hammer mills," Int. J. Miner. Process. pp. 147–166, 2003.
- [20] D. W. Fuerstenau and P. C. Kapur, "Newer energy-efficient approach to particle production by comminution," Powder Technol., vol. 82, no. 1, pp. 51–57, 1995.
- [21] L. G. Austin, "A preliminary simulation model for fine grinding in high speed hammer mills," vol. 144, pp. 240–252, 2004.
- [22] W. Meier, M., John, E., Wieckhusen, D., Wirth, W y Peukert, "Generally applicable breakage functions derived from single particle comminution data." Powder Technol., vol. 194, pp. 33–41, 2009.