

# Cálculo de la fuerza de fricción necesaria para extraer el coque de hornos solera para el diseño de prototipos de máquinas de empuje

*Calculation of the friction force required to extract coke from open heart furnace for the design of pusher machine prototypes*

<sup>a.</sup> Oscar Manuel Duque Suarez, <sup>b.</sup> Marco José Duarte Márquez, <sup>c.</sup> Leopoldo Valero Jaimes,

<sup>d.</sup> Elio Alarcón Suarez, <sup>e.</sup> Sergio Andres Davila Sepulveda

<sup>id</sup> <sup>a</sup> Magister en Controles Industriales, oduques@sena.edu.co, Universidad de Pamplona, Cúcuta, Colombia

<sup>id</sup> <sup>b</sup> Ingeniero Mecánico, ing.marcod@iacingenieria.com.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

<sup>id</sup> <sup>c</sup> Ingeniero Mecánico, ing.leopoldov@iacingenieria.com.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

<sup>id</sup> <sup>d</sup> Ingeniero Mecánico, ing.elioa@iacingenieria.com.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

<sup>id</sup> <sup>e</sup> Ingeniero Mecánico, ing.sergiod@iacingenieria.com.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

Recibido: Julio 1 de 2021 Aceptado: Noviembre 8 de 2021

**Forma de citar:** O.M Duque-Suarez, M.J Duarte-Márquez, L.Vlero-Jaimes, E. Alarcon-Suarez, S.A Davila-Sepulveda "Cálculo de la fuerza de fricción necesaria para extraer el coque de hornos solera para el diseño de prototipos de máquinas de empuje", *Mundo Fesc*, vol. 12, no. 24, pp. 201-213, 2022

## Resumen

El presente artículo expone uno de los resultados de la investigación cofinanciada por MINCIENCIAS mediante la convocatoria 851 del 2019 y apoyada por Tecnoparque SENA sede nodo Ocaña, que permitió materializar, aplicando la metodología I+P+D3 (Investigación+Planificación+Definición del producto, Diseño y Desarrollo), un prototipo innovador de una máquina de empuje para extraer coque de hornos solera. Para lograrlo, se calculó la fuerza de fricción necesaria a vencer para extraer el coque, a través de un procedimiento de diseño basado en el estudio de Badiuzzaman y Sadayoshi & Michikata; desarrollado en función de las características de un horno vertical, cuya geometría, características y capacidad de producción, son totalmente diferentes a un horno solera, por consiguiente, las variables de diseño son distintas. Así, bajo una metodología teórica, resultado de la adaptación ingenieril de horno vertical a horno solera, y bajo una metodología experimental, se presenta un procedimiento de diseño para calcular la fuerza de fricción necesaria a vencer para extraer 2.8 Toneladas de coque por la máquina de extracción en el proceso de deshorne de un horno solera, comúnmente usado en Norte de Santander y Colombia. Teóricamente, se presenta un procedimiento, desde parámetros como el peso de la torta de coque y los coeficientes de fricción, para hallar la fuerza de rozamiento y empuje. Se realizó una validación experimental, a partir de una metodología propuesta, para calcular la fuerza que necesita el motor en la extracción del coque, desde variables como el voltaje, el amperaje, la eficiencia y el factor de potencia. Se evidencia una correspondencia del 86.7% entre los datos teóricos de la fuerza máxima a ejercer para vencer la condición pegajosa con respecto a los datos obtenidos experimentalmente; lo que permite concluir una estimación satisfactoria de los coeficientes usados teóricamente para la selección del motor y componentes de la máquina.

**Palabras clave:** Horno solera, coque, extracción, fuerza, máquina, MINCIENCIAS.

Autor para correspondencia: \*Correo electrónico: oduques@sena.edu.co



## Abstract

This article presents one of the results of the research co-financed by MINCIENCIAS through the call 851 of 2019 and supported by Tecnoparque SENA Ocaña node, which allowed the materialisation, applying the methodology I+P+D3 (Research+Planning+Definition of the product, Design and Development), of an innovative prototype of a pusher machine to extract coke from solera ovens. To achieve this, the friction force necessary to overcome to extract the coke was calculated through a design procedure based on the study by Badiuzzaman and Sadayoshi & Michikata; developed according to the characteristics of a vertical oven, whose geometry, characteristics and production capacity are totally different from a hearth oven, and therefore, the design variables are different. Thus, under a theoretical methodology, as a result of the engineering adaptation of a vertical furnace to a hearth furnace, and under an experimental methodology, a design procedure is presented to calculate the friction force necessary to overcome to extract 2.8 Tons of coke by the extraction machine in the baking process of a hearth furnace, commonly used in Norte de Santander and Colombia. Theoretically, a procedure is presented, based on parameters such as the weight of the coke cake and the friction coefficients, to find the friction and thrust force. An experimental validation was carried out, based on a proposed methodology, to calculate the force required by the motor in the extraction of the coke, based on variables such as voltage, amperage, efficiency and power factor. There is an 86.7% correspondence between the theoretical data of the maximum force to be exerted to overcome the sticky condition with respect to the data obtained experimentally; which allows us to conclude a satisfactory estimation of the coefficients used theoretically for the selection of the motor and components of the machine.

**Keywords:** Open heart furnace, coke, extraction, force, machine, MINCIENCIAS.

## Introducción

El coque es un producto que se obtiene de la transformación del carbón metalúrgico a altas temperaturas en el interior de un horno, donde por cada tonelada de coque producido se necesitan en promedio 1.6 toneladas de carbón coquizable [1]. Norte de Santander cuenta con una gran cantidad de recursos de carbón, alrededor de 105.3 millones de toneladas probadas, de los cuales el 19% corresponde a carbón coquizable [2], donde existe una participación de más de 20 empresas relacionadas con este producto, incluyendo plantas de coquización, comercializadoras y procesadoras de coque, que contribuyen actualmente al 28.9% de la producción industrial del departamento, representando a abril de 2021 el 62.4% de las exportaciones del departamento, y un 35% de las exportaciones nacionales de coque para el año 2020, donde se exportaron 3.335.472 toneladas equivalentes a \$ US 623.161.735 [3], [4]. Con esto se evidencia, que el departamento Norte de Santander, es un actor importante en el sector del coque a nivel nacional, en el que habrá un ligero crecimiento en los próximos 17 años, según el modelo de continuidad realizado por la UPME en el 2018 [1]. En la figura, se muestra el histórico de las exportaciones de coque en Norte de Santander en los últimos años.

El proceso de extracción de coque se realiza con ayuda de maquinaria e incluso de manera

rudimentaria por la acción del hombre. Actualmente, entre la maquinaria utilizada se encuentra el bobcat y el pusher system machine coke [5], [6]. La primera es una retro excavadora pequeña, muy utilizada en plantas coquizadoras de la región y del país que cuentan con hornos colmena y/o solera; mientras que las segundas, son máquinas más modernas muy comúnmente utilizadas en hornos verticales, utilizados a nivel mundial por potencias coquizadoras [5], [6], [7].

La literatura, estudios o información técnica sobre el diseño del pusher system machine coke, es muy escasa y bastante exclusiva, pues no existe mucha investigación accesible sobre este campo. Esta máquina tiene como función principal extraer el coque; para esto, necesita vencer la fuerza de fricción entre el coque y las paredes y el suelo del horno. Aunque exista cierta exclusividad por parte de fabricantes y vendedores como Sumitomo Heavy Industries Ltd [8], Thyssenkrupp [9], Johnmhenderson [10], Paulwurth [11], BEC Project [12], y a la falta de literatura, estudios o información técnica, fue posible encontrar que para el año 1969, Badiuzzaman, M. [13], realizó el diseño y la optimización de una pala de empuje de coque, donde tuvo en cuenta, las presiones generadas por la plastificación del carbón sobre las paredes y piso del horno, teniendo presente con esto, las fuerzas de fricción generadas y necesarias para el cálculo de la fuerza de empuje. Esta fuerza de

fricción es el punto de partida fundamental para este tipo de desarrollo de máquinas de empuje de coque.

Más recientemente, para el año 2020, S. Aizawa, M. Sakaida y M. Sugiura [14], presentaron un estudio mediante un reporte técnico donde analizaron distintos factores que influyen en la fuerza de empuje del coque, como la influencia de las condiciones de la carbonización, las propiedades del carbón y el estado del cuerpo del horno. Ambos estudios, [13], [14], se desarrollaron para la obtención de coque de hornos verticales.

Por otro lado, debido a la falta de tecnificación en las plantas de coquización, puntualmente en el proceso de extracción de coque, realizado de manera rudimentaria en la mayoría de plantas de la región y el país [15], con este estudio se pretende, presentar y abordar el cálculo de la fuerza de empuje de una máquina de extracción de coque. Esta máquina fue ideada, desarrollada y construida por la empresa MIH SAS junto al cofinanciamiento de MINCIENCIAS en su convocatoria 851 de 2019 [16]. Para su desarrollo se aplicó la metodología I+P+D3 [17] y hubo un apoyo técnico por parte de Tecnoparque SENA nodo Ocaña.

I+P+D3 es una metodología de Diseño del Producto planteada bajo un análisis cuantitativo y cualitativo de otras diez metodologías. Estas, se compararon y se encontraron coincidencias en sus etapas de diseño del producto, las cuales, posteriormente, dieron origen a I+P+D3; letras que traducen Investigación, Planificación, Definición, Diseño y Desarrollo. Estas cinco etapas permitirán a cualquier empresa la materialización y producción de cualquier producto; siempre y cuando se cumplan, a cabalidad, todas y cada una de las etapas. Al aplicar cada una de estas etapas fue posible realizar el diseño y la fabricación del prototipo que hace parte de los resultados del proyecto de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico con MINCIENCIAS; por ejemplo, en Investigación, se descubrió y se organizó la información; en Planificación, se definió el alcance, el entorno colaborativo y se asignaron tareas; en Definición, se definieron las estrategias y se diseñó el concepto; en Diseño, se materializó teniendo en cuenta todos los detalles y se creó un prototipo; en Desarrollo, se realizaron pruebas y se verificó. Esta metodología fue comparada

y evaluada por los autores a través del manual de Frascati y el manual de Oslo, además de las etapas planteadas por otros autores; de igual forma tuvieron en cuenta el ciclo PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar), necesarios en cualquier proceso de innovación y desarrollo [17].

Con los resultados de esta investigación, se presentarán avances tecnológicos mediante el cálculo ingenieril de la fuerza necesaria para extraer el coque por medio de una máquina innovadora de la cual no se tienen registros o conocimiento de su aplicación en hornos solera en nuestro país. Es así, que al existir una baja o casi nula tecnificación del proceso productivo de las plantas de coquización del país [15], se espera con este estudio, brindar un aporte a la investigación y construcción de maquinaria de extracción de coque para la tecnificación de plantas coquizadoras con hornos solera de la región y el país.



Figura 1. Histórico de los últimos 10 años en las exportaciones de coque en Norte de Santander [3]

## Materiales y Métodos

La investigación aquí realizada supone el cálculo, de forma analítica y experimental, de la fuerza de empuje necesaria para extraer la torta de coque de hornos solera. Esta extracción se realizó mediante un prototipo de máquina de empuje inexistente en el mercado actual, y por ende, en el sector del coque en Colombia; por lo que el tipo de diseño para esta investigación será de tipo cuantitativo con alcance descriptivo, correlacional, explicativo y diseño experimental [18]. Teóricamente, se presenta un procedimiento, teniendo en cuenta parámetros como el peso de la torta de coque y los coeficientes de fricción, para hallar la fuerza de rozamiento y empuje. Experimentalmente, se realizaron mediciones en un entorno real

aplicando una metodología propuesta por los autores, para calcular la fuerza que necesita el motor en la extracción del coque, desde variables como el voltaje, el amperaje, la eficiencia, la velocidad máxima de la viga de empuje y el factor de potencia.

El procedimiento de diseño aquí presentado para el cálculo de la fuerza de empuje tiene como fundamento de diseño lo sustentado, analítica y teóricamente, en el trabajo de Badiuzzaman, M. [13]. Para este estudio, este procedimiento se adaptó a la necesidad de diseño solicitada, pues en el trabajo de [13], los requisitos y parámetros de diseño iniciales utilizados, se presentan para el cálculo de la fuerza de empuje en hornos verticales, donde su geometría y su capacidad de producción de coque son totalmente diferentes para hornos solera; además, los gradientes de temperatura y/o presión varían considerablemente durante la plastificación, ocurrida en el proceso de carbonización para ambos tipos de hornos, es por esto, que los esfuerzos presentados en la pared y el suelo del horno durante la plastificación o empuje para la extracción del coque, difieren en gran medida, pues, factores determinantes para la fuerza de empuje necesaria para mover la torta de coque, como el área de contacto del coque con la mampostería del horno, la cantidad y calidad de carbón utilizado, la calidad del coque obtenido del proceso y el estado de los hornos, varían considerablemente [13], [19].

### **Fuerzas a vencer por la pala de empuje**

Antes de definir qué comprende la fuerza de empuje, se aclara, que por derechos de propiedad intelectual pueda existir información, pasos o variables de diseño que se omitan en el proceso metodológico a exponer a continuación, pues solo se mostrarán los parámetros de diseño utilizados para el cálculo de la fuerza de empuje. Desde el momento en que el coque es empujado por la pala, esta debe superar las siguientes fuerzas:

Fuerza de inercia de la masa estática del coque  
Fuerza de resistencia a la fricción entre el coque y el suelo y la pared del horno.

La fuerza de inercia del coque existe sólo al principio del empuje; mientras que la fuerza por fricción debida a la resistencia entre el coque y la mampostería, permanece a lo largo

del trayecto de la pala de empuje, disminuyendo constantemente hasta el final del horno, lo que significa que la fuerza total de empuje varía durante su recorrido [13]. En la Figura 4, se observa como la fuerza de empuje disminuye conforme la pala avanza a través del horno.

### **Fuerzas inerciales**

Aunque su efecto supone un porcentaje pequeño de la fuerza total de empuje, en este estudio se consideró de acuerdo a:

$$F_1 = W_2 * \left(\frac{v}{t}\right) \quad (1)$$

Siendo  $W_2$  el peso de la torta de coque,  $v$  la velocidad máxima de la pala de empuje, y  $t$  el tiempo de aceleración de la torta de coque.

### **Fuerzas de fricción**

La fuerza de fricción que experimentará la pala durante el empuje de la masa de coque depende del coeficiente de fricción  $K_1$  entre el coque y el suelo del horno, y del coeficiente  $K_2$ , que tiene en cuenta la resistencia adicional derivada de la fricción entre el coque y la pared de la cámara del horno

La fuerza de fricción normal se calcula de acuerdo a (2):

$$F_2 = W_2 * g * K_1 * K_2 \quad (2)$$

Siendo  $g$  la aceleración de la gravedad. Es posible que exista una condición pegajosa, llamada sticky, por la presencia de alquitrán, o un atascamiento o un flujo estrecho de la masa de coque, para lo cual, se debe tener en cuenta un factor de amplificación  $K_3$ , que permita considerar estos efectos y poder calcular la fuerza excesiva no deseada creada durante el funcionamiento del horno solera.

$$F_2' = F_2 * K_3 \quad (3)$$

### **Fuerza total de empuje**

La fuerza total de empuje como se definió anteriormente, está comprendida, en condiciones

Oscar Manuel Duque-Suarez, Marco José Duarte-Márquez, Leopoldo Valero-Jaimes, Elio Alarcón-Suarez, Sergio Andres Davila-Sepulveda normales, por F1 y F2,

$$F_3 = F_1 + F_2 \quad (4)$$

Mientras que en condición sticky la fuerza total de empuje, está comprendida por F1 y F2',

$$F_4 = F_1 + F_2' \quad (5)$$

### Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales para lograr el cálculo correcto de la fuerza de fricción a vencer para extraer la torta de coque se tomaron teniendo en cuenta las características del horno, de la materia prima, y del proceso de coquización. Los cuales son factores determinantes que tienen influencia directa en los coeficientes de rozamiento entre el coque y las paredes y suelo del horno. Estas condiciones son las siguientes:

Tiempo de vida de la mampostería del horno de 1 año

Estado del horno en condiciones normales

Tiempo normal de coquización de 48 horas [7].

Suposición de una cocinada del carbón en condiciones aceptables con zonas dentro del horno con sticky del coque

Buena calidad del carbón [20].

Se aclara que por razones de confidencialidad y negociaciones en curso con algunos empresarios del coque que trabajan en sus plantas con hornos solera no será posible mostrar más que el esquema dado en la Figura 2.

### Parámetros de diseño

En este estudio, los parámetros de diseño utilizados para el cálculo de la fuerza de empuje, se obtuvieron para un horno solera con capacidad de carga de carbón de 4000 kg y cuyas dimensiones se muestran a continuación.

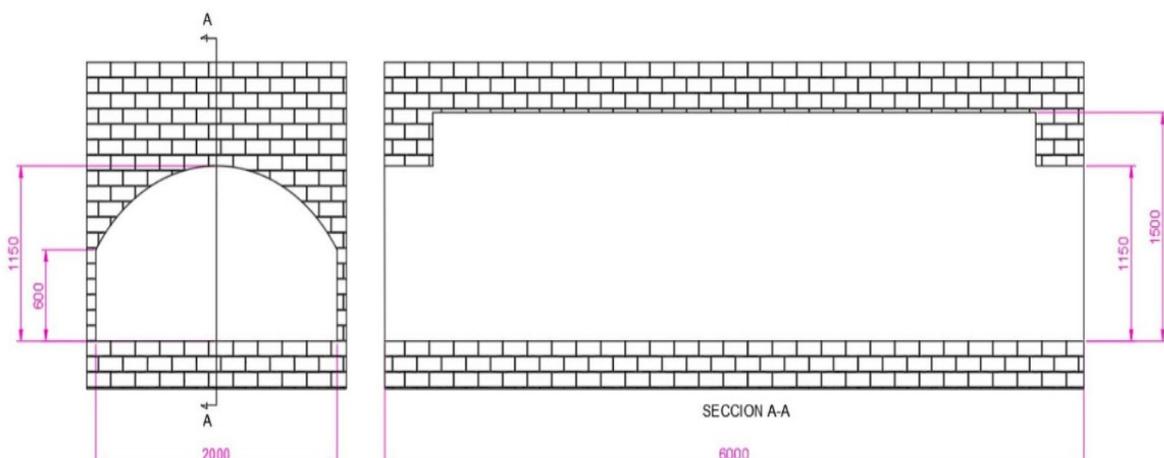


Figura 2. Detalles del horno solera

La siguiente tabla muestra los parámetros generales que se deben tener en cuenta para el cálculo de la fuerza de empuje, donde el peso de la torta de coque se obtiene teniendo en cuenta una eficiencia del 70% del horno [21]. Los coeficientes de rozamiento dependen de los factores dados anteriormente y se tomaron de manera conservadora de acuerdo a [13].

**Tabla I.** Parámetros para el cálculo de la fuerza de empuje

Parámetro	Valor
Capacidad del horno	Caphorno=4000 kg
Rendimiento del horno	n=0.7
Peso de la torta de coque	W2=2800 kg
Tiempo de aceleración torta de coque	t=0.5 s
Velocidad máxima de la viga de empuje	v=0.27 m/s
Coefficiente de fricción en el suelo	K1=1.3
Coefficiente de fricción en las paredes	K2=0.75
Coefficiente amplificador por condición pegajosa	K3=1.8

### Procedimiento experimental

El procedimiento dado a continuación describe una metodología propia de los autores, la cual se apoya en las metodologías dadas en [22] y [23]. Mediante esta metodología se calculó la fuerza real de empuje necesaria para mover la torta de coque en la validación experimental.

Como materia prima, se utilizaron 4000 Kg de carbón coquizable de la región con aproximadamente, 7% máximo de cenizas, 7% humedad, 32-35% MV, 7.5% máximo de FSI, 0.004% de fósforo, 58% mínimo de Carbono Fijo [24]. La temperatura del horno se encuentra alrededor de los 1000 °C a 1200 °C. Las dimensiones del horno se muestran en la Figura 2.

Para determinar la fuerza y analizar las condiciones en las que debe operar el motor, el cual es trifásico a 220V, es necesario conocer la corriente que consume en los instantes de tiempo en que se empuja la torta de coque, utilizando los siguientes elementos:

**Tabla II.** Elementos requeridos para la prueba

Elemento	Descripción
Transformador de corriente	Medirá la corriente de línea del motor
Amperímetro	Convertirá la señal del transformador a Amperios
Tarjeta de procesamiento	Registrará los valores censados
Computador	Graficará los valores censados vs tiempo

Para evitar fallos en las pruebas, lesiones o malas mediciones, es necesario realizar la siguiente inspección.

- Inspección visual del tablero de control
- Inspección visual del cableado del motor
- Inspección de la programación del arrancador suave
- Tablero de control energizado
- Señal de condición de uso activa
- Transformador de corriente instalado
- Correcto uso del EPP

El objetivo principal de medir la corriente del motor, es determinar la fuerza ejercida por este para empujar la torta de coque. Se realizarán entonces, las siguientes pruebas de medición:

1. *Medición del amperaje del motor en vacío (sin pala):* se realiza para conocer la corriente que consume el motor sin carga. Se debe desarticular el motor de la pala y graficar la corriente obtenida.

Esta grafica revela la corriente de arranque y en vacío del motor.

2. *Medición del amperaje del motor con la pala sin carga (Coque):* para este caso, se articula el motor a la pala de empuje; al graficar esta señal, se obtiene la corriente que consume el motor al aplicarle la carga de la pala. Con esta corriente también se puede calcular la fuerza de empuje que ejerce el motor con la articulación.

3. *Medición del amperaje del motor con la pala con carga (Coque):* Consiste en realizar la medición de la corriente en campo al extraer el coque del horno, graficando esta corriente se obtendrá la fuerza ejercida por el motor para empujar la carga. De aquí se puede calcular la inercial del coque en estado estático, la fricción entre el coque y las paredes y el suelo del horno.

4. Con los datos tomados en los pasos anteriores, se calcula la potencia respecto a la corriente obtenida, de acuerdo a (6), dada en cualquier manual de motores eléctricos, en este caso, [25]:

$$F = \frac{30}{\pi * n * r} * P \quad (7)$$

Donde:

V0= Voltaje del motor de empuje (220 V).

A(i)= Corriente consumida por el motor de empuje en los instantes de tiempo muestreados.

FP= Factor de potencia del motor trifásico (0,85).

η= Eficiencia de transmisión del motor de empuje (0,91).

Hallada la potencia en el paso anterior, se procede a calcular la fuerza respecto a los consumos de corriente, de acuerdo a la siguiente ecuación

$$P = \sqrt{3} * V_0 * A_{(i)} * FP * \eta \quad (6)$$

Donde:

n= rpm de salida del moto reductor de empuje (26 rpm)

r= Radio del círculo primitivo del engrane impulsor de la pala de empuje (0,1 m)

Se registraron los valores experimentales con una frecuencia de muestreo de 1 segundo en la tabla siguiente.

Tabla III. Tabla de resultados experimentales de la fuerza total de empuje

Tiempo (s)	Corriente (A)	F (kN)
1	7,8	8,44
2	13,1	14,18
3	20,3	21,98
4	29,3	31,72
5	36,7	39,73
6	40,2	43,52
7	38,3	41,46
8	30	32,48
9	27	29,23
10	26	28,15
11	25,1	27,17
12	23,2	25,11
13	22,3	24,14
14	19,3	20,89
15	17,5	18,94
16	15,6	16,89
17	14,6	15,81
18	13,3	14,40
19	12,5	13,53
20	8,2	8,88
21	7,3	7,90
22	6,2	6,71

Para hallar la fuerza de fricción correspondiente a la fuerza de empuje  $F$  dada por (6), solo deberá restarse a esta la fuerza de inercia del coque  $F_1$  (1),

$$F_r = F - F_1 \quad (8)$$

A continuación se muestra de manera esquemática el resumen del procedimiento para el cálculo de la fuerza de fricción



Figura 3. Resumen del procedimiento para el cálculo de la fuerza de fricción.

Tabla IV. Resultados de las fuerzas obtenidas

Nombre	Fuerza	Resultado (kN)
Fuerza de inercia	$F_1$	1.51
Fuerza por fricción en condiciones normales	$F_2$	26.8
Fuerza axial máxima en condición de sticky	$F_{2'}$	48.2
Fuerza de empuje en condiciones normales	$F_3$	28.5
Fuerza de empuje en condición de sticky	$F_4$	49.71

Tabla V. Resultados de las fuerzas obtenidas de validación experimental

Nombre	Fuerza	Resultado (kN)
Fuerza de inercia	$F_1$	1.51
Fuerza de fricción en condición de sticky	$F_r$	42,01
Fuerza de empuje en condición de sticky	$F$	43,52

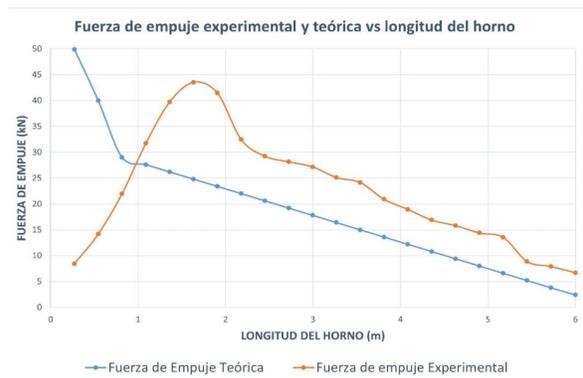


Gráfico 1. Comportamiento de la fuerza de empuje a lo largo de la longitud del horno.

## Resultados y Discusión

De forma analítica, mediante (5) se obtuvo una fuerza de empuje máxima en condición de sticky de 50 kN al inicio del recorrido de la pala de empuje dentro del horno. La Figura 4 muestra de manera simplificada la variación de la fuerza de empuje a lo largo del horno.

Mediante la validación experimental se evidencia que la máxima fuerza de empuje ejercida por el motor es aproximadamente a 1,6m del recorrido de la pala de empuje dentro del horno, siendo esta de 43.52 kN. Esto es debido a que se había despreciado el espesor de las puertas la cual es aproximadamente los primeros 0,4m de recorrido de la pala, por lo que marca una fuerza en vacío y seguido a esto, empieza a aumentar rápidamente la fuerza al hacer contacto con la torta de coque, comprimiéndola contra las paredes del horno generando una resistencia y una mayor fricción hasta que la pala de empuje logra vencer finalmente la condición de sticky debido a la fuerza aplicada y empieza a descender la fuerza siguiendo un patrón similar al cálculo teórico. Cabe resaltar que la fuerza teórica de empuje en condición de sticky fue de 49.71 kN, siendo esta muy similar a la obtenida experimentalmente, logrando con este procedimiento una prueba exitosa.

Si se consideran condiciones adversas donde la pala de empuje debe realizar más fuerza debido a la condición de sticky u obstrucción del coque, la fuerza de fricción que debe vencer la pala, aumenta aproximadamente en un 85%, tal como se observa en la Tabla 4. En esta tabla también se demuestra que la fuerza de inercia constituye un 5,6 % de la fuerza total de empuje en condiciones

normales y un 3 % en condición pegajosa. Así mismo, como se observa en la tabla 5, la fuerza inercial en la prueba experimental constituye un 3,5% de la fuerza de empuje total en condición pegajosa.

La fuerza de fricción en condición de sticky que debe vencer la pala de empuje, puede variar, al verse afectada por distintos factores que deben controlarse en la medida de lo posible, que, a grandes rasgos, se dividen en aquellos que tienen su origen en las condiciones de carbonización, las propiedades del carbón o el estado del cuerpo del horno; teniendo en cuenta, que pueden variar, no solo de hornos de diferentes baterías, sino que también varía con hornos de la misma batería [13], [14].

Es por esto, que los coeficientes de fricción, dados en la Tabla 1, se ven afectados por el grado de daño en la pared o el suelo del horno. En hornos envejecidos, la influencia del daño en las paredes del horno es mayor. Además, la carga que trabaja en la pared del horno está determinada por el grado de deformación de la torta de coque hacia la pared del horno cuando se comprime y también por la longitud de la brecha entre la pared del horno y la torta de coque al final de la carbonización que se forma debido a la contracción del coque durante la carbonización (contracción lateral) [14].

Teniendo en cuenta esto, y, de acuerdo a [14], inmediatamente después que la fuerza de empuje comienza a actuar, la torta de coque empieza a comprimirse en dirección de la longitud del horno y se hincha al mismo tiempo en la dirección del ancho, aplicándose una carga a la pared del horno debida a la contracción

lateral, esto puede suceder debido a que las proyecciones y depresiones en la superficie del coque varían, y algunas secciones pueden estar en contacto con la pared del horno desde el principio; siendo muy probable que la presión originada sobre la pared por la contracción lateral sea mayor en un horno vertical, pues el tamaño de sus dimensiones y capacidad de carga es mucho mayor que un horno solera; por lo que basados en un diseño conservador, para este estudio se le dio más valor al rozamiento generado entre el coque y el suelo del horno, pues aunque el peso de la torta de coque es mayor en un horno vertical que en un horno solera, este último es aproximadamente unas 4 veces más ancho, siendo más significativo la carga por rozamiento con el suelo que con las paredes del horno; razón por la cual  $K_1$  es mayor que  $K_2$ . Por su parte, el coeficiente  $K_3$  es un valor difícil de estimar, ya que varía con el tipo de carbón, el estado del horno, el tiempo de coquización, la temperatura del coque y la variación de la temperatura a lo largo de la altura del horno [13], razón por la cual, se recomienda que la carbonización sea lo más óptima posible, desde el inicio, hasta el final de la obtención del coque.

## Conclusiones

Se observa, que, si se presentan condiciones de sticky del coque con la mampostería del horno al momento de la extracción, la fuerza de fricción que deberá vencer la pala, aumenta aproximadamente en un 85%. Además, se puede decir que la fuerza de inercia es despreciable, pues constituye un 5,6 % de la fuerza total de empuje en condiciones normales y un 3 % en condición sticky.

Se evidencia una correspondencia del 86.7% entre los datos teóricos de la fuerza máxima a ejercer para vencer la

condición de sticky con respecto a los datos obtenidos experimentalmente, al igual que con el resto del comportamiento hasta obtener la extracción total de coque del horno, teniendo solo una pequeña variación entre ambos, siendo los datos teóricos un poco mayor a los resultados experimentales, lo que nos permite concluir que para el caso de estudio es satisfactoria la estimación de los coeficientes usados teóricamente para la selección del motor y los componentes de la máquina, teniendo como principal objetivo lograr extraer eficientemente la torta de coque del horno.

Los coeficientes de fricción,  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$ , que se plantean en este estudio, se tomaron como referencia del diseño y dimensionamiento de una pala de empuje para extraer el coque de hornos verticales, donde las condiciones del proceso de obtención de coque varían considerablemente respecto de un horno solera; a partir de esto, los coeficientes calculados en el presente estudio permiten calcular correctamente la fuerza de fricción a vencer; tomando como referencia la batería de hornos en la que se realizó la validación experimental, la cual se encontraba en funcionamiento, teniendo aproximadamente un poco más de 1 año en funcionamiento desde el último mantenimiento de su mampostería. Esto es importante, pues la vida útil de los hornos solera está comprendida entre 3 a 5 años, lo que podría significar que los coeficientes deberían ser mayorados, si la batería está cumpliendo su vida útil, pues la fuerza real que aplicaría el motor para extraer la torta de coque podría ser un poco mayor.

El cálculo de la fuerza de fricción necesaria para extraer el coque de hornos solera y que permitió el diseño de un prototipo

de una máquina de empuje, es el punto de partida fundamental para este tipo de desarrollo. Independientemente del enfoque o distribución mecánica que un diseñador le dé a este tipo de máquinas, tendrá como común denominador la necesidad del cálculo efectivo de la fuerza de empuje para que el prototipo opere de manera efectiva y exista una correcta selección de materiales, accionamientos y un dimensionamiento óptimo; por tanto, este aporte del cálculo de la fuerza en mención, será un gran avance para este tipo de desarrollos.

### Agradecimientos

Agradecimientos sinceros, por el apoyo financiero, al Ministerio de Ciencias, y el apoyo técnico, al Tecnoparque Sena nodo Ocaña, para lograr llevar a cabo el desarrollo del prototipo de la máquina.

### Referencias

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética, “Carbón Metalúrgico Balance 2012-2016”, Enero 2018. [Online]. Disponible en: [https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL\\_carbonmetalurgico.pdf](https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_carbonmetalurgico.pdf) pp. 25, 27.
- [2] Gobernación de Norte de Santander, “Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019: Un Norte Productivo Para Todos”, Abril 2016. [Online]. Disponible en: [https://assets.ctfassets.net/27p7ivvbl4bs/2anQ2ua-QrykCMgSysAyWA8/e0def48d471fada70dd1d9c91fa8df9d/54\\_NortedeSantander\\_PDT\\_2016-2019.pdf](https://assets.ctfassets.net/27p7ivvbl4bs/2anQ2ua-QrykCMgSysAyWA8/e0def48d471fada70dd1d9c91fa8df9d/54_NortedeSantander_PDT_2016-2019.pdf) p. 28.
- [3] Unidad de Planeación minero energética, “Carbón-exportaciones de coque”, Julio 2021. [Online]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- [4] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, “Perfil económico: Departamento de Norte de Santander”, Junio 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=343b884d-95de-4e64-8f0f-f76334a7dd74> pp. 18, 25.
- [5] Diana Roció Chiquillo, Diego Galan y Yeny Ruiz Gonzáles, “Criterios de implementación de ISO 14001:2015 caso de estudio HSEQ-CYPRODYSER SA-Planta de coquización”, Noviembre 2019. [Online]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/30585/dcuillom.pdf?sequence=1&isAllowed=y> p. 3.
- [6] S. Seetharaman. Treatise on Process Metallurgy, Industrial Processes, Part A. Suecia: Royal Institute of Technology, 2014. p. 25.
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética, “Estudio de producción de coque y carbón metalúrgico, uso y comercialización”, Abril 2012. [Online]. Disponible en: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1107/1/Upme%20090%20estudio%20de%20produccion%20de%20coque.pdf> p. 55.
- [8] Sumitomo Heavy Industries Ltd, “Coke Oven Machines”, Marzo 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.shi.co.jp/english/products/environment/coke/index.html>
- [9] Thyssenkrupp, “Coke Oven Machines”, Enero 2014. [Online]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

- thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/coke-plants/coke-oven-machines
- [10] John M. Henderson, “Pusher Machines”, Octubre 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.johnmhenderson.com/coke-oven-machines/pusher-machines/>
- [11] Paul Wurth, “Coke Oven Machines”, Agosto 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.paulwurth.com/wp-content/uploads/2020/08/Brochure-Coke-Oven-Machines-en.pdf>
- [12] BEC Projects, “Coke oven machines on turnkey basis”, Marzo 2011. [Online]. Disponible en: <https://bec-group.com/projects/coke-oven-machines.php>
- [13] M. Badiuzzaman. Design optimization of coke pusher ram. Canadá: Mc Master University, 1969. p. 10, 15, 16.
- [14] S. Aizawa, M. Sakaida y M. Sugiura, “Analysis of factor that influence coke pushing force”, Nippon Steel Technical Report, no. 123, pp. 167-173. Marzo 2020.
- [15] Colciencias, Universidad Francisco de Paula Santander, Universidad del Rosario y Universidad de Pamplona, “Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación- PEDCTI 2014-2024, 2014. [Online]. Disponible en: <https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-norte-santander.pdf> pp. 479, 480.
- [16] MINCIENCIAS, “Convocatoria 851 de 2019-Línea de fomento a la innovación y desarrollo tecnológico en las empresas”, Enero 2020. [Online]. Disponible en: [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/banco\\_definitivo\\_de\\_elegibles\\_convocatoria\\_851\\_de\\_2019\\_-\\_consulta.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/banco_definitivo_de_elegibles_convocatoria_851_de_2019_-_consulta.pdf) p. 2.
- [17] I. C. Baez Beltrán, C. Olmedo Carrillo Bravo, O. Castebancho Marciales, F. J. Betancourt Cortez, G. Leguizamón Sierra, R. G. García y D. Mendoza Patiño, “Metodología de diseño de producto bajo la estructura de Innovación y Creatividad”, *Espacios*, vol. 39, no. 11, p. 20. Diciembre 2017.
- [18] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio. Metodología de la investigación. México, 2014. pp. 4, 90, 129.
- [19] J. A. Menéndez Díaz. El coque de petróleo como aditivo en la producción de coques metalúrgicos. España: Universidad de Oviedo, Departamento de Energía, 1994. pp. 6, 7.
- [20] J. E. Rodríguez Guevara, “Análisis de la logística del carbón en Norte de Santander”, *Mundo FESC*, vol. 6, no. 3, pp. 50-57. Noviembre 2013.
- [21] S. M. Romero Balaguera, “Aspectos prácticos de la coquización en Cundinamarca y Boyacá”, *I+D*, vol. 14, no. 2, pp. 37-41. Octubre 2014.
- [22] A. F. Echeverry Hurtado y M. Espinosa Guarín. Determinación de la eficiencia del motor de inducción trifásico de rotor devanado utilizando la Norma NTC 3477-2008. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de tecnología eléctrica, 2014.
- [23] FLUKE, “Herramientas de pruebas y

*diagnóstico de problemas en motores eléctricos*”, Septiembre 2013. [Online]. Disponible en: <https://suconel.com/wp-content/uploads/herramientasdepruebafluke.pdf>

[24] Excomin, “Ficha técnica de carbón coquizable”, Agosto 2016. [Online]. Disponible en: <http://ciexcomin.com/index-3.html#ccoquizable>

[25] Carlos Hoffman, “*Manual de motores eléctricos*”, Julio 2004. [Online]. Disponible en: <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/cys/DI/manual%20de%20motores%20electricos.pdf>