

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE  
ANTRACITA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DURANTE EL PROCESO  
DE FABRICACIÓN DE ACERO**

**JAVIER ALBERTO GUALDRÓN PLATA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2018**

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE  
ANTRACITA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DURANTE EL PROCESO  
DE FABRICACIÓN DE ACERO**

**JAVIER ALBERTO GUALDRON PLATA**

**Trabajo de grado en investigación, para optar al título de Ingeniero  
Metalúrgico**

**Director**

**SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA**

**PhD. en investigación en corrosión ciencia de aleaciones ligeras**

**Codirector**

**JHON WILVER GUERRERO QUINTERO**

**MSc. en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

*Dedicado a Laura Marcela Londoño, siempre serás mi más linda historia de Amor,  
mi recuerdo favorito, la sonrisa que le daba vida a mi alma y la mejor compañera  
de vida.*

*A mis padres por darme la vida y enseñarme como ser una buena persona, nunca  
dejarme desfallecer y apoyarme en todo momento, espero estén orgullosos de mí.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Metalúrgica por tener esas fabulosas instalaciones donde me pude formar como profesional.*

*A Ternium por permitirme realizar las pruebas de este proyecto y aportar una mejora a la empresa.*

*A la profesora Sandra García, por su colaboración durante este proceso, admiro mucho su entrega hacia la escuela.*

*Al ingeniero Jhon Guerrero, por su enseñanza, colaboración y por ser mi guía durante mi estancia en la empresa.*

*Al profesor Pedro Delvasto por encontrar en él una gran amistad.*

*A los técnicos de laboratorio Mario, Ambrosio, Oscar, Javier, Sergio y Domingo por su disposición hacia los estudiantes con la mejor actitud y humildad durante toda mi formación.*

*A Yaddy por su buena atención y disposición a ayudar a los estudiantes.*

*A mis amigos y compañeros de carrera Charris y Karol, Nestor y Paula, (las parejas del momento), Juanjo y Jefferson, Diana y Sergio Lorica por siempre estar a mi lado guiándome y por contar con su amistad en los buenos y malos momentos.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. ANTECEDENTES .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	19
3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN .....	20
3.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL TDF Y SEPARACIÓN POR GRANULOMETRÍA .....	20
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL TDF Y SUS PROPIEDADES .....	21
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTRACITA .....	21
3.5 PRUEBAS DE CARGUE PARA DETERMINAR LA RELACIÓN TDF/ANTRACITA .....	21
3.5.1 Prueba 1. (Cargue de TDF sobre el metal fundido) .....	22
3.5.2 Prueba 2. (Cargue de TDF mezclado con la materia prima) .....	22
3.6 CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS .....	22
3.7 ANÁLISIS DE VARIABLES .....	23
3.8 ANÁLISIS DE COSTOS .....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
4.1 SELECCIÓN DE LOS TDF SEGÚN LA GRANULOMETRÍA .....	25
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL TDF POR ANÁLISIS PROXIMAL Y SUS PROPIEDADES .....	27
4.3 CARACTERIZACIÓN POR ANÁLISIS PROXIMAL DE LA ANTRACITA .....	28
4.4 PRUEBAS DE CARGUE PARA DETERMINAR LA RELACIÓN TDF/ANTRACITA .....	29

4.5 PRUEBA 1 (CARGUE DE TDF SOBRE EL METAL FUNDIDO).....	30
4.6 PRUEBA 2 (CARGUE DE TDF MEZCLADO CON LA MATERIA PRIMA). ....	32
4.7 CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS .....	34
4.8 ANÁLISIS DE VARIABLES .....	36
4.9 ANÁLISIS DE COSTOS.....	37
5. CONCLUSIONES .....	40
6. RECOMENDACIONES .....	42
BIBLIOGRAFIA.....	43
ANEXOS.....	45

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Datos de operación EAF. ....	20
Tabla 2. Clasificación por granulometría y comportamiento del TDF dentro del EAF. ....	25
Tabla 3. Caracterización del TDF. ....	28
Tabla 4. Caracterización de la antracita. ....	28
Tabla 5. Resultados relación TDF/Antracita. ....	30
Tabla 6. Resultados escoria con antracita. ....	34
Tabla 7. Resultados de escoria con TDF. ....	35
Tabla 8. Consumo de energía. ....	36
Tabla 9. Precio de la receta actual. ....	38
Tabla 10. Precio del TDF. ....	38
Tabla 11. Costos de las relaciones TDF/Antracita. ....	39

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso experimental.....	19
Figura 2. a) Neumáticos enteros. b) Tamaño TDF de grano grueso. c) Tamaño TDF de grano mediano. d) Tamaño TDF de grano polvo. ....	25
Figura 3. Rotura de electrodo número 2 por aislamiento eléctrico y sobre esfuerzo de carga. ....	26
Figura 4. Mangas quemadas por partículas incandescentes. a) Parte inferior de la manga con quemaduras. b) Mangas con presencia de quemaduras en la misma área.....	27
Figura 5. Tendencia del comportamiento de la temperatura humos cámara de sedimentación respecto al segundo cargue el cual se determina con el tiempo On del horno. ....	31
Figura 6. a) Carga de los trozos de TDF en los alistadores. b) Arco eléctrico del horno. c) Llamada producida al agregar caucho en el segundo cargue. ....	31
Figura 7. Trozos de TDF con el tamaño aceptable .....	32
Figura 8. a) Cesta cargada con TDF. b) Descargue del primer cargue. ....	33
Figura 9. Comportamiento de temperaturas antes de la entrada a filtros en el sistema de humos.....	34
Figura 10. Comparación de los consumos de energía.....	37

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Producción mundial de acero crudo de 1950 a 2017 [1]. .....	45
Anexo B. Análisis de talegas que se quemaron debido a las altas temperaturas generadas por el uso de TDF en el segundo cargue. ....	47
Anexo C. Picos de temperatura registrados en el segundo cargue con TDF. Picos de temperatura registrados en el segundo cargue con TDF. ....	48
Anexo D. Tabla con los datos de las coladas a las cuales se les realizó la muestra de escoria. ....	49
Anexo E. Gráfica con el comportamiento de azufre en las coladas antes, durante y después de la prueba.....	50

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ANTRACITA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO\*

**AUTORES:** Gualdrón Plata, Javier Alberto\*\*

**PALABRAS CLAVES:** TDF: Combustible Derivado de Neumáticos EAF: Horno de Arco Eléctrico  
RT: Llantas Recicladas

### DESCRIPCIÓN:

En Colombia el abastecimiento de antracita bituminosa requerida por las industrias de acero se hace cada vez más difícil, esto debido a que los proveedores tienen una tecnología muy limitada lo cual genera un sobre costo y eleva sus precios, poniendo en riesgo la continuidad operativa de las fábricas de acero, ya que la antracita es uno de los insumos más importantes para la producción de este metal. Actualmente la antracita se emplea en el horno de arco eléctrico como una fuente de energía muy útil en la espumación, carburación y reducción del óxido de hierro en el proceso de fabricación del acero. Sin embargo, teniendo en cuenta que se trata de un recurso no renovable y presenta dificultad en el abastecimiento, existe la posibilidad de sustituirlo parcial o definitivamente con el uso de combustible derivado de llantas Tire Derived Fuel, las cuales en este estudio se agregaron al horno de arco eléctrico con un tamaño de grano específico y en una proporción de caucho/antracita que se determinó de acuerdo al comportamiento y análisis de los datos obtenidos con las pruebas realizadas en planta. Se encontró que el combustible TDF utilizado genera una gran fuente de energía química, el cual, al momento de realizar las pruebas trajo una gran mejoría ya que contribuía al suministro de energía del proceso. Es decir que el proyecto trae consigo varias ventajas, una de ellas es la sustitución o disminución del consumo de antracita, por otro lado el aprovechamiento de generación de energía adicional a partir de un residuo sólido como materia prima y por último la contribución al medio ambiente.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director: Dra. Sandra Judith García Vergara. Codirector: MSc. Jhon Wilver Guerrero Quintero

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF ALTERNATIVES TO REDUCE ANTHRACITE CONSUMPTION IN THE ELECTRIC ARC FURNACE DURING THE STEEL MANUFACTURING PROCESS\*

**AUTHORS:** Gualdrón Plata, Javier Alberto\*\*

**KEYWORDS:** TDF: Tire Derived Fuel EAF: Electric Arc Furnace RT: Recycled Tires

### DESCRIPTION:

In Colombia, the supply of bituminous anthracite required by the steel industries is becoming increasingly difficult, due to the fact that suppliers have a very limited technology which generates an extra cost and raises their prices, putting at risk the operational continuity of the factories steel since anthracite is one of the most important inputs for the production of this metal. Currently the anthracite is used in the electric arc furnace as a very useful source of energy in the foaming, carburization and reduction of iron oxide in the steelmaking process. However, taking into account that it is a non-renewable resource and presents difficulty in the supply, there is the possibility of replacing it partially or definitively with the use of Derived Fuel tires, which in this study were added to the furnace of electric arc with a specific grain size and in a proportion of rubber / anthracite that was determined according to the behavior and analysis of the data obtained with the tests carried out in the plant. It was found that the TDF fuel used generates a large source of chemical energy, which, at the time of the tests, brought a great improvement as it contributed to the energy supply of the process. That is to say that the project brings with it several advantages, one of them is the substitution or reduction of the consumption of anthracite, on the other hand the use of additional energy generation from a solid waste as a raw material and finally the contribution to the steel manufacturing process.

---

\* Degree project

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Adviser: Dra. Sandra Judith García Vergara. Coadviser: MSc. Jhon Wilver Guerrero Quintero

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la antracita se emplea en el horno de arco eléctrico (EAF) como una fuente de energía muy útil en la espumación, carburación y reducción del óxido de hierro en el proceso de fabricación del acero, sin embargo, teniendo en cuenta que se trata de un recurso no renovable, su precio y dificultad en el abastecimiento, ha surgido la necesidad de sustituirlo parcial o definitivamente. En este sentido, el presente proyecto plantea el uso de neumáticos de desecho o TDF sus siglas en inglés, como fuente alternativa para sustituir parcialmente el uso de la antracita gruesa los cuales serán agregados en el proceso del horno de arco eléctrico ya sea mediante el uso de cestas o Co-inyectados. En el primer caso se van a realizar las adiciones en el centro de las cestas con el fin de evitar el contacto directo de las llantas con el acero líquido, es importante aclarar que las llantas (caucho TDF) se pueden agregar completas o en trozos de diferente medida, aunque la granulometría juega un papel esencial debido a que las mejores características alcanzadas en los diferentes trabajos investigativos se han conseguido con un tamaño de partícula pequeño. En el segundo caso, se realizan pruebas mezclando los neumáticos con otras materias primas, en el desarrollo, la mezcla fue con coque o antracita. Para ello es necesario analizar el rendimiento con diferentes granulometrías del caucho TDF, ya que su comportamiento puede variar y se podría tener un mayor aprovechamiento de las temperaturas emitidas en el momento de la fusión.

Complementando se debe aludir que los rendimientos obtenidos de la literatura respecto a los consumos de antracita, energía, gas natural y oxígeno son el resultado de los ahorros obtenidos por otras siderúrgicas que implementaron los neumáticos de desecho en su proceso de producción, luego es necesario corroborar los beneficios que se lograrían alcanzar con dicha sustitución.

## 1. ANTECEDENTES

La producción anual de acero en Sudamérica fue de 43.700.000 Tn en 2017, un incremento de 8.7% respecto al 2016 tal como se muestra en el Anexo A <sup>1</sup>. Brasil fue el mayor productor en Sur América con un total 34.400.000 Tn en 2017, un aumento de 9.9% en comparación con 2016<sup>2</sup>. Esto evidencia que aumentaron los productos de acero elaborados en la región y el buen manejo de las industrias para intentar seguir ganando terreno respecto al mayor productor mundial que es el acero Chino, adjuntamente con esto el uso de los hornos de arco eléctrico (EAF) se ve en aumento significativamente para cubrir la producción que previamente en la mayoría de veces su materia prima es 100% de chatarra de acero que se funde y se convierte en acero de alta calidad utilizando la energía química y energía eléctrica a partir del proceso de formación de arco.

La práctica de utilizar neumáticos de desecho inició por primera vez en Japón en 1998 y continuó en Francia en 2003 <sup>3</sup>. Más tarde, en 2005 en Europa, un esfuerzo conjunto entre dos socios industriales, la industria de los neumáticos y las plantas de fabricación de acero, en sus estudios de laboratorio y de planta, llegaron a la conclusión de que los neumáticos triturados se pueden añadir a los hornos EAF <sup>4</sup>.

En 2003 los hornos de arco eléctrico en los Estados Unidos comenzaron a utilizar los neumáticos de desecho como fuente de carbono para la fabricación de productos de acero de alto carbono mediante la introducción de neumáticos enteros en un cubo de carga. Al obtener buenos resultados con las pruebas de sustitución

---

<sup>1</sup> WORLD STEEL ASSOCIATION. World crude steel output increases by 5,3% in 2017. Worldsteel Association. 2017

<sup>2</sup> *Ibíd.*

<sup>3</sup> ZAHARIA, M., SAHAJWALLA, V., KHANNA, R., & KOSHY, P. Carbon/Slag Interactions between Coke/Rubber Blends and EAF Slag at 1 550 C. *ISIJ international*, 49(10), 2009 1513-1521

<sup>4</sup> *Ibíd.*

de antracita por caucho TDF en algunas de las empresas han comenzado a utilizar los neumáticos de desecho en el proceso de fabricación de acero <sup>5</sup>.

La iniciativa de utilizar los neumáticos al final de su vida útil se implementó en una base industrial completa en los Lamine's Marchands Europe'ens (LME) en Trith-Saint-Leger, Francia, donde la antracita fue reemplazada por neumáticos usados. La investigación inicial realizada en la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW) mostró que los plásticos se podrían utilizar como inyección de carbón para una mejor espumación de la escoria. En base a esto en 2006 OneSteel adoptó una nueva técnica que consiste en la inyección de plásticos en la fabricación de acero EAF. En 2007, el caucho de neumáticos fue probado en las plantas como fuente de carbono. Los ensayos indicaron que se puede lograr una reducción en el consumo total de energía (en el orden de millones de kWh / año) <sup>6</sup>. En el 2009, Zaharia M y colaboradores evaluaron el efecto de la adición de neumáticos de desecho como inyección de carbono en la fabricación de acero en los hornos de arco eléctrico (HEA) y estimaron su comportamiento en la combustión. Además, utilizaron un horno de tubo de caída con atmósfera protectora de 100% N<sub>2</sub> y una mezcla de 20% de O<sub>2</sub> y 80% de N<sub>2</sub>, llevándolo hasta 1200 °C con el fin de determinar la pérdida de masa respecto al tiempo de calentamiento mediante termogravimetría. También realizaron difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) de las diferentes muestras. De todo lo anterior se concluyó que la mayoría de las mezclas de caucho mostraron mayores eficiencias de combustión que las del coque, al mismo tiempo, establecieron que la tasa de pérdida de peso de estas comparadas con las de la antracita, era mayor debido a la volatilidad del caucho <sup>7</sup>. En el 2013 Ransford J y Koshy P presentaron un trabajo investigativo y experimental que tenía

---

<sup>5</sup> *Ibíd.*

<sup>6</sup> SAHAJWALLA, V., ZAHARIA, M., RAHMAN, M., KHANNA, R., SAHA-CHAUDHURY, N., O'KANE, P. & KNIGHTS, D. Recycling Rubber Tyres and Waste Plastics in EAF Steelmaking. *Steel Research*, 82, 2011 567-567

<sup>7</sup> ZAHARIA, M., SAHAJWALLA, V., KIM, B. C., KHANNA, R., SAHA-CHAUDHURY, N., O'KANE, P. & KNIGHTS, D. Recycling of rubber tires in electric arc furnace steelmaking: simultaneous combustion of metallurgical coke and rubber tyres blends. *Energy & Fuels*, 23(5), 2009 2467-2474

como finalidad la producción de hierro metálico a partir del óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en forma de pellets, utilizando como agente reductor los neumáticos al final de su vida útil, el coque metalúrgico y mezclas de RT/CM en proporciones de (10:90, 20:80, 30:70 y 40:60 respectivamente). Las pruebas se hicieron en un horno de tubo horizontal a escala de laboratorio, el cual se llevó a  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  bajo atmósfera protectora de argón, con el fin también de evaluar las emisiones de CO y  $\text{CO}_2$  mediante absorción infrarroja (IR). Los resultados mostraron que el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  podía reducirse eficazmente con RT y sus mezclas con CM. Así mismo, que el grado de reducción mejoraba a medida que el coque se mezclaba parcialmente con el RT y el nivel de carburación incrementaba significativamente con el aumento en la adición de RT a la mezcla. Finalmente establecieron que el uso de los neumáticos al final de su vida útil permitía disminuir considerablemente las emisiones de  $\text{CO}_2$  en comparación con el uso del solo coque <sup>8</sup>.

Finalmente, Madías J. realizó una recopilación de diferentes empresas siderúrgicas con horno de arco eléctrico que implementaron el uso de neumáticos de desecho como materia prima para la alimentación de los mismos. En estos resultados el investigador mostró de qué manera se hacen las adiciones y los beneficios que obtienen dichas industrias con el uso de esta nueva fuente alternativa <sup>9</sup>. Encontró que desde el 2002 la empresa Nucor Steel Auburn en Nebraska (Estados Unidos) reemplazó el carbón o coque por neumáticos de desecho como fuente de energía química, dicha sustitución permitió emisiones con 19.5 % menos de dióxido de carbono que con el coque que se inyectaba en la práctica normal. Cabe mencionar que las llantas se adicionaban enteras, mediante cestas <sup>10</sup>.

---

<sup>8</sup> DANKWAH, J. R., & KOSHY, P. Production of Metallic Iron from Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) using End-of-Life Rubber Tyre and its Blends with Metallurgical Coke as Reductants. In International Journal of Engineering Research in Africa (Vol. 10, pp. 1-12). 2013

<sup>9</sup> MADIAS J. Un aporte de la industria del acero a la comunidad. Dossier tecnológico .14 pp. Argentina. 2011

<sup>10</sup> Ibíd.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la sustitución parcial de antracita por TDF en el horno de arco eléctrico como alternativa en el proceso de fabricación de acero.

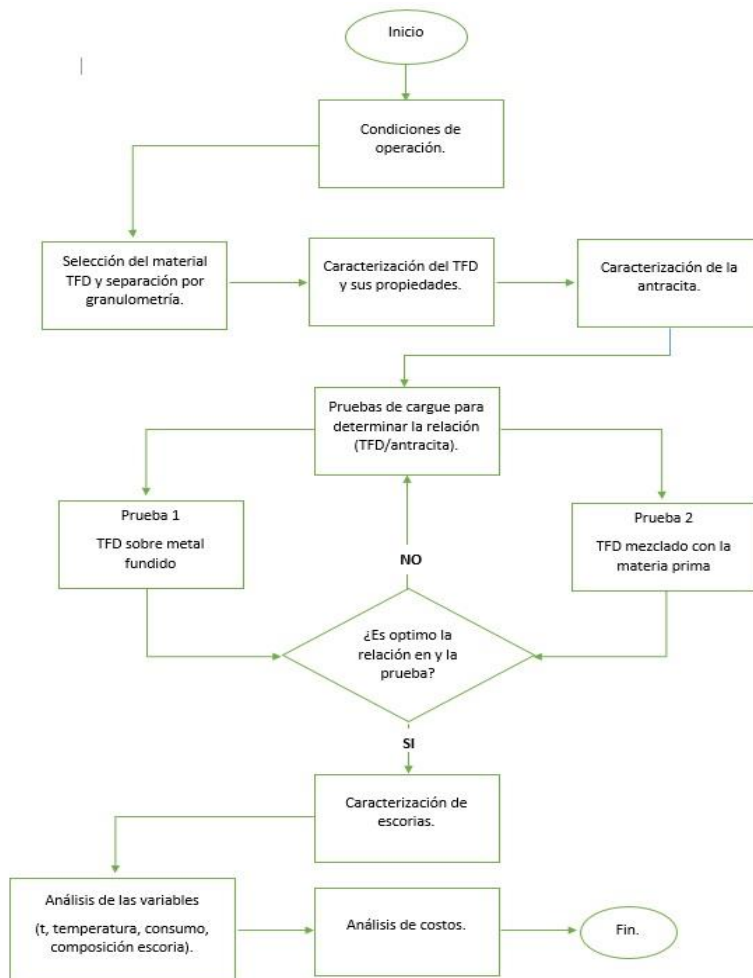
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar el comportamiento del horno respecto a las diferentes cantidades de TDF agregadas durante las coladas.
- Diseñar la relación porcentual más óptima entre el uso de antracita y TDF en el proceso.
- Comparar los cambios en las propiedades químicas de la escoria antes del uso del TDF y con el uso de este.
- Validar la viabilidad económica en la utilización de un material alternativo como el TDF para la fabricación de acero.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se detallan las etapas que se realizaron para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto, basado en el análisis del comportamiento del horno de arco eléctrico y las variables al usar neumáticos de desecho como fuente alternativa para sustituir parcialmente el uso de la antracita gruesa, el cual se llevó a cabo buscando la relación óptima (TDF/Antracita) teniendo en cuenta la granulometría del TDF, consumos y mejoras en el proceso como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso experimental.



### 3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para realizar los procesos de fundición por medio del horno de arco eléctrico (EAF), se utilizó un horno con tres electrodos de grafito y capacidad máxima de 42 toneladas por colada. Se realizó la verificación de las condiciones que se necesitan para el buen funcionamiento y proceso del horno de arco eléctrico (EAF) tales como el número de cargues para completar una colada, peso de los cargues, temperaturas de trabajo, cantidad de materiales a adicionar y tiempos de fundición como se observa en la Tabla 1 <sup>11</sup>.

**Tabla 1. Datos de operación EAF.**

Carga de chatarra	44.293 Kg
Dolomita	400 Kg
Cal viva	500 Kg
Antracita	500 Kg
Temperatura del proceso	1553 °C
O <sub>2</sub> inyectado	1073 m <sup>3</sup>

En la tabla se puede observar las cantidades estándares para la realización de una colada en el horno de arco eléctrico, agregando los 44.293 Kg de chatarra en 4 o 5 cargues, estos datos pueden variar debido al tipo de chatarra y propiedades químicas de la cal y antracita.

### 3.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL TDF Y SEPARACIÓN POR GRANULOMETRÍA

En el almacén de depósitos de materiales, ingresaron 72 sacos con un total de 21.6 Tn de material de caucho granulado (grueso, mediano, polvo) los cuales se seleccionaron y se separaron respectivamente de acuerdo al tamaño para diferenciarlos cumpliendo las siguientes especificaciones:

---

<sup>11</sup> SHULMAN, V. L. Tyre recycling after 2000: status and options. 2000

- Empacado en big bag (bolsones) en gramaje aproximados de 200 a 300 Kg.
- Granulometrías: Grande (15cm - 30cm), mediano (5cm - 15cm), polvo (0cm -1.5 cm).
- Por medidas de seguridad el material no puede estar contaminado con grasas o cualquier material inflamable.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DEL TDF Y SUS PROPIEDADES**

Se realizó un análisis proximal con una muestra de 1 kg de caucho para determinar las especificaciones del material, composición, poder calorífico, materias volátiles, cenizas, humedad del TDF, con el fin de comprender las posibles reacciones dentro del proceso <sup>12</sup>.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTRACITA**

Se realiza un análisis proximal de una muestra de 1 kg de antracita con el fin de obtener la especificación del material composición, poder calorífico, materias volátiles, cenizas, humedad como medida de calidad del proceso para la fabricación de acero <sup>13</sup>.

### **3.5 PRUEBAS DE CARGUE PARA DETERMINAR LA RELACIÓN TDF/ANTRACITA**

Para determinar la relación se procede a realizar coladas agregando el TDF al horno de arco eléctrico de la planta TERNIUM SIDERURGICA DE CALDAS y analizar su comportamiento en el proceso. Se determinan dos pruebas y se verifica cual tiene mejor desempeño al añadir el TDF para no generar riesgos de operación. Para ello se probó la adición de TDF en 3 tamaños de grano diferentes: grande (15cm - 30cm), mediano (5cm -

---

<sup>12</sup> ZAHARIA, M., SAHAJWALLA, V., KIM, B. C., KHANNA, R., SAHA-CHAUDHURY, N., O'KANE, P. & KNIGHTS, D. Op. Cit.

<sup>13</sup> Ibíd.

15cm), polvo (0cm - 1.5 cm), agregando primero 300 Kg de TDF y 150 Kg de antracita gruesa y así ir probando las relaciones (TDF/ANTRACITA), 300Kg/200Kg, 200Kg/200Kg, 200Kg/150Kg, 200Kg/100Kg, 150Kg/150Kg, y de acuerdo con los resultados recopilados se determina la relación favorable para trabajar.

**3.5.1 Prueba 1. (Cargue de TDF sobre el metal fundido).** Se realizaron 86 pruebas con las diferentes relaciones TDF/Antracita indicadas en el numeral 3.5, con el fin de recopilar la mayor cantidad de datos y observar el comportamiento y los resultados de cada colada, agregando la mezcla sobre el metal fundido en el primer cargue de chatarra.

**3.5.2 Prueba 2. (Cargue de TDF mezclado con la materia prima).** La realización de esta prueba tiene como diferencia que el TDF se agrega en la mitad de la cesta del primer cargue, con el que se va iniciar un nuevo proceso de colada <sup>14</sup>. Para identificar las variables y el comportamiento dentro del horno con la mezcla de materia prima para así, recopilar los datos y poder comparar los distintos tipos de prueba para analizar en que cargue se obtendrán mayores beneficios.

### **3.6 CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS**

Se realizó la toma de 3 muestras del vaciado por la piqueta de escoria del horno de arco eléctrico, las tres primeras muestras corresponden a la escoria producida por el proceso utilizando la relación de TDF/Antracita y las otras 3 del proceso normal con el uso de solo antracita en el proceso de fabricación de acero se caracterizaron mediante el análisis de Fluorescencia de rayos X (FRX) para comparar la composición de la escoria que se fabricó con TDF <sup>15</sup>, respecto a la que se fabricó solamente con el uso de antracita.

---

<sup>14</sup> DANKWAH, J. R., & KOSHY, P. Op. Cit.

<sup>15</sup> Ibíd.

### **3.7 ANÁLISIS DE VARIABLES**

Para medir la eficiencia en el proceso se tuvo en cuenta los datos obtenidos a partir de la observación de las diferentes variables involucradas en cada etapa de elaboración de colada de acero, tales variables se indican a continuación:

- Relación equivalente aporte de carbono
- Adición de neumáticos [kg]
- Adición de antracita gruesa [kg]
- Antracita en polvo [kg]
- Consumo energético
- Tiempo [On]
- Tiempo [Off]
- Consumo de Oxígeno
- Consumo de Gas Natural
- Tipo de chatarra

Una vez conseguida la mejor relación (TDF/ANTRACITA) y el número de cargue donde se debe realizar la deposición del material, se procede a analizar los resultados de los consumos en la herramienta computacional Microsoft® Excel® mediante tablas y gráficas, con los parámetros dichos anteriormente.

### **3.8 ANÁLISIS DE COSTOS**

En esta etapa se realizó un análisis comparativo del precio y beneficios que puedan aportar el uso de la relación implementada TDF/Antracita de acuerdo a los resultados obtenidos en la fabricación de acero y las reducciones de costos operacionales como los son:

- Ahorro de sustitución de antracita por TDF.

- Ahorro de consumo energético.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 SELECCIÓN DE LOS TDF SEGÚN LA GRANULOMETRÍA

Se realizó la respectiva separación por tamaño del caucho TDF tal como se muestra en la Figura 2, en la cual se indica el tamaño de algunos trozos de este compuesto suministrados por la empresa para las pruebas realizadas <sup>16</sup>. Esto con el fin de tener una exactitud de la cantidad de material con el que se cuenta para la realización de las pruebas e identificar cual tiene mejor comportamiento en el proceso de acuerdo a su granulometría como lo indica la Tabla 2.

**Figura 2. a) Neumáticos enteros. b) Tamaño TDF de grano grueso. c) Tamaño TDF de grano mediano. d) Tamaño TDF de grano polvo.**



**Tabla 2. Clasificación por granulometría y comportamiento del TDF dentro del EAF.**

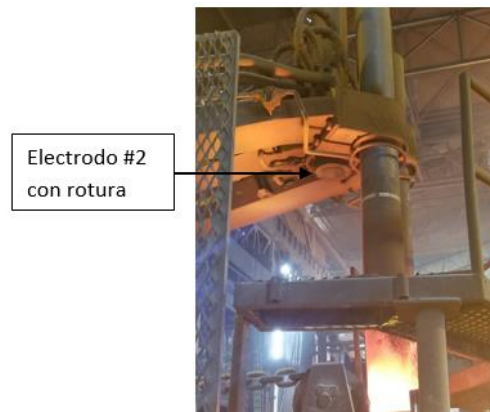
<b>Tamaño</b>	<b>Comportamiento</b>
<b>Neumáticos enteros</b>	Causan aislamiento eléctrico y roturas en los electrodos de grafito.
<b>Grano Grueso ± 150 – 300 mm</b>	Se puede usar, pero no eficiente ya que puede generar aislamiento eléctrico.
<b>Grano Mediano ± 50 – 150 mm</b>	Es la de mejor comportamiento en el proceso.

<sup>16</sup> SHULMAN, V. L. Op. Cit.

Tamaño	Comportamiento
Grano Polvo $\pm 0 - 15 \text{ mm}$	No recomendada por ser aspirada por el sistema de humos generando quemaduras en los filtros.

En la observación del comportamiento de cada granulometría, resultó que al agregar trozos mayores a 15 cm se generaron aislamientos de los electrodos, debido a que los neumáticos por su gran tamaño obstruían la generación de arco eléctrico, lo cual generaba que el sistema no detectara el componente no conductor ocasionando la rotura de los electrodos, debido al sobre esfuerzo realizado por el sistema en búsqueda de generar arco eléctrico, como se observa en la Figura 3.

**Figura 3. Rotura de electrodo número 2 por aislamiento eléctrico y sobre esfuerzo de carga.**



Para la granulometría tamaño en polvo se presenta la mayor afectación con respecto a los otros tipos de tamaños en el proceso, debido a que el sistema de aspiración de humos se ve comprometido con daños producidos por las partículas que viajan incandescentes hasta el sistema de filtración de polvos, generando quemaduras en las mangas tal como se ve en el análisis realizado a las mangas que presentaron problemas como se evidencia en la Figura 4. En el anexo B se presentan algunas fotografías de las zonas dañadas.

**Figura 4. Mangas quemadas por partículas incandescentes. a) Parte inferior de la manga con quemaduras. b) Mangas con presencia de quemaduras en la misma área.**



La granulometría que presenta mejor desempeño para el proceso es la de tamaño de grano mediano, ya que una de sus ventajas es una mejor manipulación para los alistadores al momento de realizar el cargue de este en la cesta, otro beneficio que presenta es que, al momento de agregarse para la disposición de la colada, este se esparce en los espacios no ocupados por la chatarra lo cual no afecta la densidad de la materia prima del proceso dentro del horno.

#### **4.2 CARACTERIZACIÓN DEL TDF POR ANÁLISIS PROXIMAL Y SUS PROPIEDADES**

Los resultados del análisis próximo permiten identificar, como elementos relevantes la alta presencia de azufre y carbono fijo en este compuesto y un alto poder calorífico y gran volatilidad respecto a la antracita como se observa en la Tabla 3 <sup>17</sup>, este análisis se realizó a 1 Kg de neumático triturados de granulometría mediana.

---

<sup>17</sup> DANKWAH, J. R., & KOSHY, P. op. Cit.

**Tabla 3. Caracterización del TDF.**

<b>Análisis TDF</b>	<b>Resultados</b>
%Humedad	0.72
%Material volátil	62.17
%Cenizas	6.22
%Carbono fijo	31.6
% Azufre	1.87
Poder calorífico (J/g)	37012

#### **4.3 CARACTERIZACIÓN POR ANÁLISIS PROXIMAL DE LA ANTRACITA.**

Los resultados hechos por análisis proximal permitieron identificar que la antracita no cumplía las especificaciones de calidad que exige la empresa, debido a que tenía un alto porcentaje de humedad como evidencia en la Tabla 4.

**Tabla 4. Caracterización de la antracita.**

<b>Análisis Antracita</b>	<b>Resultados</b>
%Humedad	2.28
%Material volátil	6.83
%Cenizas	9.23
%Carbono fijo	82.9
% Azufre	0.71
Poder calorífico (J/g)	34300

Comparando los valores obtenidos en los análisis de caracterización se observa una mayor volatilidad en las muestras de TDF respecto a la de antracita esto sumado a una gran diferencia de poder calorífico, lo cual genera una mejor carbonización a pesar de que tenga una menor presencia de carbono fijo ya que la presencia de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> favorece que haya mayor cantidad de reacciones en el sistema <sup>18</sup> como las ecuaciones 1 y 2.

---

<sup>18</sup> MADIAS J. Op. Cit.



#### **4.4 PRUEBAS DE CARGUE PARA DETERMINAR LA RELACIÓN TDF/ANTRACITA.**

Se realizaron 113 coladas en total para determinar cuál era la relación más favorable al momento de fabricar acero en el horno de arco eléctrico. En estas pruebas se tuvieron en cuenta variables como la eficiencia energética, consumo de oxígeno, y porcentaje de carbono con el que sale para el afino de la colada en el horno olla (en el cual se realiza la metalurgia secundaria), el carbono debe tener un porcentaje mínimo para ser aceptable en un rango de alrededor de 0.04% de C, debido a que si este se encuentra por debajo indica que la colada se encuentra oxidada y se debe inyectar mayor antracita en polvo, lo que provoca mayores consumos. Los valores obtenidos en las coladas realizadas se muestran en la Tabla 5.

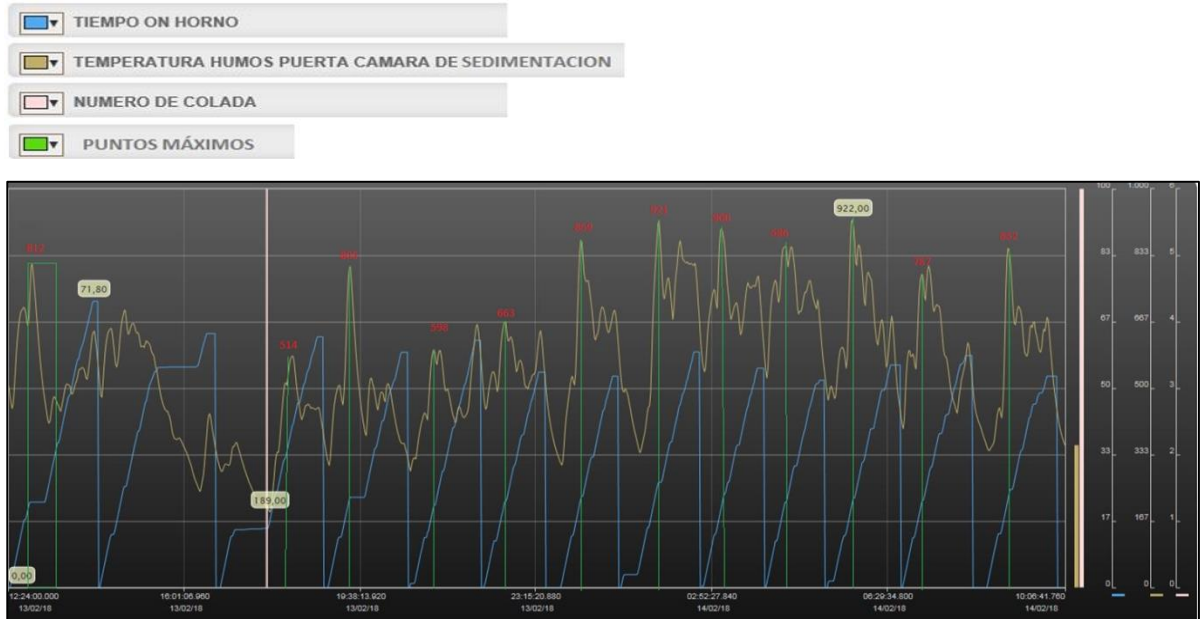
**Tabla 5. Resultados relación TDF/Antracita.**

Colada	Caucho TDF	Antracita	%C	Energía Total HW	Consumo O2	Consumo antracita polvo	%Fragmentada	Peso 1er Cargue
A0079628	150	300	0.10	16630	1427	327	49%	14
A0079629	150	300	0.08	15650	1302	283	50%	13.3
A0079650	150	300	0.10	15860	1454	220	52%	13.8
A0079651	150	300	0.07	15800	1399	448	66%	13.4
A0079663	150	300	0.07	16960	1263	188	40%	16
A0079630	200	200	0.11	15710	1340	173	42%	13.6
A0079631	200	200	0.16	15920	1429	267	50%	14.4
A0079633	200	200	0.05	15800	1502	306	40%	14.8
A0079632	300	200	0.06	15860	1422	228	48%	15.4
A0079634	300	200	0.25	16680	1411	426	50%	15.5
A0079646	300	100	0.08	16630	1363	161	52%	14.1
A0079647	300	100	0.05	15650	1376	143	50%	13.8
A0079648	300	100	0.07	15710	1389	340	54%	13
A0079649	300	200	0.14	15920	1427	248	41%	14
A0079667	300	300	0.07	15920	1364	323	42%	14.1
A0079668	300	300	0.07	15300	1319	266	53%	12.6
A0079681	300	150	0.07	16850	1350	281	53%	11.4
A0079661	450	0	0.06	16680	1451	267	50%	14.6
A0079662	450	0	0.05	15780	1320	185	42%	18.4
A0079664	450	0	0.05	14850	1353	199	41%	14.9
A0079665	450	0	0.04	17740	1608	358	50%	14
A0079666	450	200	0.06	16520	1390	349	54%	13.3
A0079678	450	0	0.06	15310	1388	266	50%	13.1
A0079679	450	150	0.09	16010	1332	255	51%	13
A0079680	450	100	0.05	15230	1355	172	54%	12.7
A0079682	450	100	0.06	15650	1387	381	50%	13
A0079683	450	200	0.09	15430	1293	322	55%	14.2

#### 4.5 PRUEBA 1 (CARGUE DE TDF SOBRE EL METAL FUNDIDO)

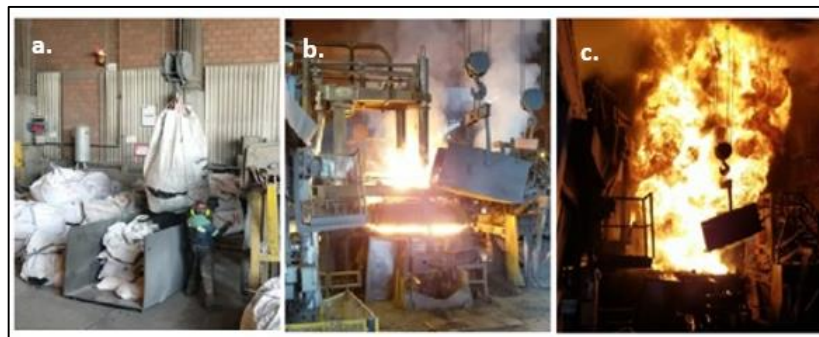
Se inician pruebas con la colada No A078159 agregando una relación TDF/Antracita 300/100 Kg, pero debido al gran tamaño del caucho (TDF), dentro del horno se ocasionó la rotura de un electrodo debido a que no permite que se genere el arco eléctrico por ser un material no conductor, por lo anterior se suspendió la prueba y se renovó en la colada A078161 agregando una relación 150/150 Kg, Se realizaron 10 coladas en total con la relación TDF/Antracita en la cual el tamaño de grano de la antracita era de 50 a 150 mm, en la cual, se destaca que el aumento de la temperatura de los gases en la puerta de la cámara de sedimentación, fue significativo emitiendo los picos más altos registrados durante todo el mes, como se observa en la Figura 5. Se descartaron las cargas con uso de neumático triturado con un tamaño superior a los 15 cm y cantidades mayores a 300 Kg.

**Figura 5. Tendencia del comportamiento de la temperatura humos cámara de sedimentación respecto al segundo cargue el cual se determina con el tiempo On del horno.**



Esta prueba no Fue aprobada, debido a que genera grandes llamaradas como se evidencia en la Figura 6 y Anexo C debido al contacto directo entre el caucho y el acero fundido generando riesgos en la seguridad del proceso ya que pueden llegar a comprometer al operador de grúa móvil.

**Figura 6. a) Carga de los trozos de TDF en los alistadores. b) Arco eléctrico del horno. c) Lllamarada producida al agregar caucho en el segundo cargue.**



#### **4.6 PRUEBA 2 (CARGUE DE TDF MEZCLADO CON LA MATERIA PRIMA).**

El material TDF se incorporaron sin presentar inconvenientes en la carga del horno arco eléctrico, haciéndolo en la cesta en la que se realiza el primer cargue de chatarra utilizando neumáticos triturados en fracciones cuyas dimensiones estén entre  $\pm 50 - 150$  mm como se observa en la Figura 7; tratando de que se agregue sobre una cama de chatarra de oxicorte si es posible ,con el fin de que el caucho tenga un mejor esparcimiento durante el cargue, se debía evitar el uso de viruta (tipo de chatarra) en el llenado de la primera cesta porque generaba gran cantidad de humo.

**Figura 7. Trozos de TDF con el tamaño aceptable**



Esta metodología muestra un mejor funcionamiento del horno y aumenta la seguridad del proceso, ya que al no haber contacto directo con acero líquido la llamarada producida generada por el TDF no se genera instantáneamente, sino, que hay mayor tiempo para que se alcance a cerrar la tapa del horno y no afectar a los operadores de grúa móvil los cuales recibirían la onda de calor.

Otra de las ventajas de esta prueba es que no afecta los tiempos en el proceso ya que se coordina con el operador de puente grúa y el alistador de materiales para realizar el cargue del TDF en la cesta durante el tiempo de vaciado de acero líquido

en el horno olla. En la Figura 8 se muestra el proceso de cargue en la cesta y descargue en el horno.

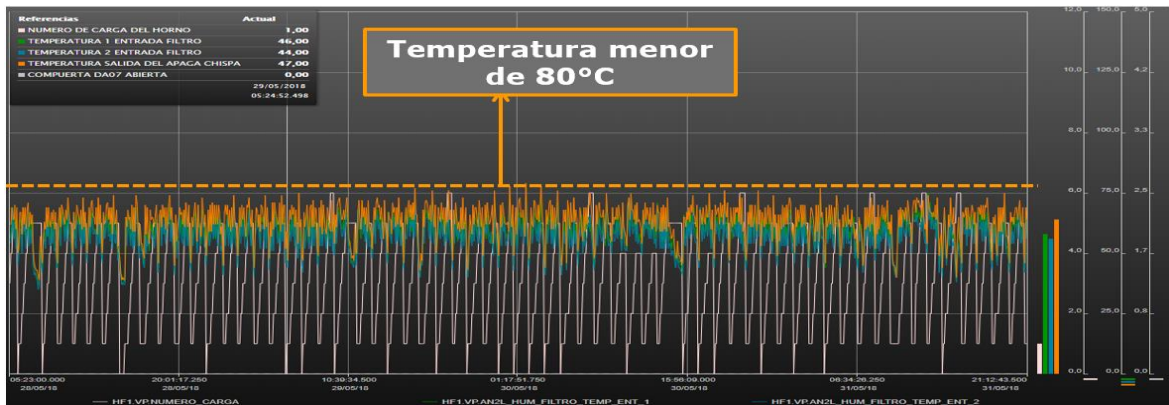
**Figura 8. a) Cesta cargada con TDF. b) Descargue del primer cargue.**



La figura 8 muestra el momento en que se realiza el cargue de TDF en la cesta que se dispone para el primer cargue, este se adiciona en la mitad de la carga de chatarra, y al terminar de llenar la cesta con la chatarra faltante se procede como lo muestra la figura 8. a realizarse el primer cargue en el horno de arco eléctrico.

En comparación con el anterior proceso en el cual se agregaba el TDF en el metal fundido y registraba altas temperaturas en el sistema de aspiración de humos, este proceso mantuvo un comportamiento homogéneo y no presentó ningún pico de temperatura por encima de los 80 °C como se observa en la Figura 9. El cual puede afectar las mangas de filtración de polvos, atendiendo el cambio de proceso, para esto se modificaron los parámetros de succión con el fin de garantizar un mejor trabajo en el Sistema de Aspiración de Humos ya que se necesita menos succión en el segundo cargue porque no se está agregando antracita.

**Figura 9. Comportamiento de temperaturas antes de la entrada a filtros en el sistema de humos.**



#### 4.7 CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS

En las tablas 6 y 7 se presenta el análisis de composición porcentual para los compuestos presentes obtenidos por FRX en 6 muestra de escoria del proceso <sup>19</sup>

**Tabla 6. Resultados escoria con antracita.**

Colada (uso de antracita)	1	2	3
%MgO	11,14	8,57	11,34
%CaO	30,75	25,58	31,25
FeO+MnO	29,02	34,13	27,83
%FeT	22,75	26,71	21,74
%FeO	20,475	24,039	19,566
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,15	7,19	6,85
%SiO <sub>2</sub>	15,28	15,36	15,05
%Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	9,19	10,85	8,89
%MnO	8,55	10,09	8,27
%Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,77	3	2,12

<sup>19</sup> SAHAJWALLA, V., ZAHARIA, M., MANSURI, I., RAJARAO, R., DHUNNA, R., & YUNOS, F. N. The power of steelmaking-harnessing high-temperature reactions to transform waste into raw material resources. *Iron and Steel Technology*, 10(8), 68-83. 2013

<b>Colada (uso de antracita)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,01	0,01	0,01
<b>%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,39	0,52	0,45
<b>%TiO<sub>2</sub></b>	0,79	0,84	0,74
<b>Basicidad ternaria con el TiO<sub>2</sub></b>	1,384	1,094	1,38

**Tabla 7. Resultados de escoria con TDF.**

<b>Colada</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Relación (TDF/Antracita) Kg</b>	200/200	150/200	150/150
<b>%MgO</b>	11,2	10,66	9,72
<b>%CaO</b>	30,52	29,24	27,25
<b>FeO+MnO</b>	28,2	30,94	36,84
<b>%FeT</b>	22,59	25,93	32,57
<b>%FeO</b>	20,33	23,34	29,31
<b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,76	6,49	5,31
<b>%SiO<sub>2</sub></b>	16,47	15,61	13,22
<b>%Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	8,46	8,17	8,09
<b>%MnO</b>	7,87	7,6	7,52
<b>%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,09	1,91	2,02
<b>%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,15	0,15	0,13
<b>%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,41	0,39	0,36
<b>%TiO<sub>2</sub></b>	0,81	0,77	0,72
<b>Basicidad ternaria con el TiO<sub>2</sub></b>	1,27	1,279	1,416

Se observa una gran similitud en los resultados de todos los compuestos lo que demuestra que no hay incidencia significativa por el uso del TDF. Sin embargo, se observa una mayor presencia de %FeO en la colada número 3 (Tabla 7) respecto a las otras coladas, lo cual ocurre debido a que hubo un mayor número de cargues en la colada y la relación TDF/Antracita era de 150/150 Kg (Anexo D). No obstante, es recomendable realizar un mayor número de análisis de escoria para así tener resultados más veraces, debido a que se busca es obtener escorias espumosas en

el horno fusión y para esto se debe manejar una composición de cal viva que contribuya a aumentar la basicidad de las muestras de escoria.

#### 4.8 ANÁLISIS DE VARIABLES

Se determinó que al usar las relaciones TDF/Antracita agregándolas en mezcla con la materia prima, se obtuvieron mejores resultados en el comportamiento del horno durante la fundición de acero. Los tiempos de colada para ambos sistemas fueron muy similares, aunque los grandes beneficios que otorga la utilización de esta relación de TDF/Antracita es la reducción de consumo de energía en el primer cargue (Tabla 8), es decir, que se obtuvo un ahorro aproximado del 1,97% de energía respecto a las coladas evaluadas <sup>20</sup>. Si se tiene en cuenta en el proceso de fundición de acero que si se arranca una colada con una chatarra bien fundida de ahí en adelante el comportamiento de los siguientes cargues será muy similar, tanto así que en el desarrollo de estas pruebas se puede ver una disminución de consumo energético (Rojo) respecto al estándar (Azul) proyectado para cada día (28, 29, 30, 31) como se ve en el Figura 10.

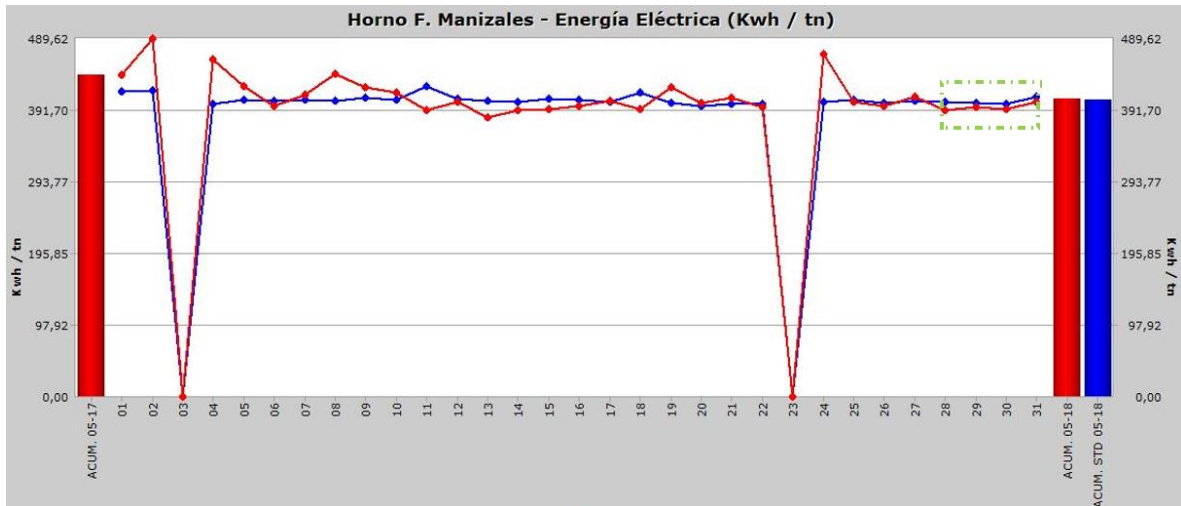
**Tabla 8. Consumo de energía.**

<b>Energía promedio de coladas en el primer cargue</b>	
27 Colada (solo antracita)	27 Coladas (Antracita + Caucho TDF)
3354 Kw/h	3288Kw/h

---

<sup>20</sup> CLAUZADE, C. End-of-life tires in electric arc furnaces: an industrial success story. *ALIAPUR report*. 2006

**Figura 10. Comparación de los consumos de energía.**



Se realizó un comparativo de análisis proximal para la antracita y el TDF y se observa que la mayor ventaja que tiene el TDF con respecto a la antracita, es que aporta mayor energía, lo anterior debido a la gran cantidad de volátiles, también habría una disminución en las emisiones de gases de tipo invernadero, tales como CO<sub>2</sub>, ya que el contenido de carbono por unidad de energía es menor que en la antracita <sup>21</sup>. No se observó aumento significativo en los niveles de azufre de acero utilizando TDF (Anexo E).

#### 4.9 ANÁLISIS DE COSTOS

Teniendo en cuenta los resultados de las relaciones TDF/Antracita se hace un análisis del precio final del caucho y la antracita respecto a la receta original comparándolo con el precio del consumo de antracita (Tabla 9).

<sup>21</sup> RAMOS, G., ALGUACIL, F. J., & LÓPEZ GÓMEZ, F. A. The recycling of end-of-life tyres. Technological review. 2011

**Tabla 9. Precio de la receta actual.**

<b>Receta con solo Antracita</b>	
<b>Peso</b>	<b>Precio</b>
1 Kg	\$ 414
500 Kg	\$ 207.000

Para el precio del TDF hay que aclarar que, debido a la diferencia de presentaciones en el tamaño de grano, no siempre se puede obtener la misma carga total, que por lo general son 30 Ton, por lo que, para la prueba se obtuvo una carga total de 21 Ton en el camión que lo transportaba; por tal razón el precio del flete por kilogramo va a cambiar y por ende el precio final de TDF/Kg. En la Tabla 10 se observa que el TDF obtuvo un mayor costo debido al aumento del flete en la prueba, y se obtuvo un precio de \$215 pesos por Kg de TDF.

**Tabla 10. Precio del TDF.**

<b>Flete</b>	<b>CAUCHO TDF</b>		
	<b>Precio/Kg</b>	<b>Flete Kg</b>	<b>Total/Kg</b>
<b>Por 21 Ton (prueba)</b>	\$140,00	\$112,89	<b>\$252,89</b>
<b>Por 30 Ton</b>	\$140,00	\$75,00	<b>\$215,00</b>

A continuación, se calcula el precio final del uso de las relaciones de TDF/Antracita y se evalúa el ahorro, manejando la diferencia del precio obtenido en la relación respecto al valor de la receta actual que se encuentra en la tabla 8. Luego se analiza, por medio del ahorro porcentual obtenido, que las relaciones encerradas con rojo son las que mejor comportamiento tienen en el proceso de fabricación de acero, tal como se evidencia en la Tabla 11.

**Tabla 11. Costos de las relaciones TDF/Antracita.**

RELACIÓN		PRECIO	Ahorro \$	Ahorro %
Caucho Kg	Antracita Kg			
150	300	\$156.450	\$50.550	24%
200	200	\$125.800	\$81.200	39%
300	100	\$105.900	\$101.100	<b>49%</b>
300	200	\$147.300	\$59.700	29%
450	100	\$138.150	\$68.850	33%
450	0	\$96.750	\$110.250	<b>53%</b>

## 5. CONCLUSIONES

- En las coladas de prueba el cual se agregó el TDF en el primer cargue sobre una cama de chatarra de oxicorte, tuvieron un mejor comportamiento en el proceso de fundición en el horno de arco eléctrico, ya que si se agregaba en un cargue diferente se veía afectado el proceso por el contacto directo de TDF con acero líquido, generando problemas en el sistema de aspiración de humos mientras que el uso de TDF en el segundo cargue no es aceptable debido a que se generan grandes llamaradas y altas temperaturas en el sistema de aspiración de humos por la reacción directa entre acero líquido y el caucho, generando riesgo de quemaduras o golpes de calor a los operarios por su alta reacción.
- Se encontró que la mejor relación TDF/Antracita, consumo y ahorro de energía es de 450 Kg de TDF y cero de Antracita, y 300/100 respectivamente ya que se evidenció un buen comportamiento en el horno en cuanto seguridad y consumo energético.
- En los análisis obtenidos a lo largo del tiempo de pruebas no se encontró un cambio significativo debido a que las propiedades químicas analizadas con FRX no mostraron un cambio significativo.
- El ahorro que se obtiene utilizando la relación (300 Kg Caucho/ 100 Kg Antracita) o solamente 450 kg de caucho TDF sería aproximadamente del 50% en costo respecto a la receta actual que son 500 Kg de antracita, el cual, si se observa desde el punto de vista económico la empresa se ahorraría 150 mil dólares al año.

- Se observó que el tamaño más favorable en la práctica fue el mediano (50 – 150 mm), gracias a que tiene una mejor manipulación a la hora de depositar en la cesta y en el proceso se evidenció menor riesgo de generar aislamiento eléctrico con los electrodos, lo cual parece satisfacer mejor las demandas de una operación industrial, esto debido a que granulometrías inferiores o superiores afectan el sistema de aspiración de humos y la seguridad de los operados de grúa móvil.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis del impacto ambiental y huella de carbono del proceso de fabricación de acero utilizando TDF.

## BIBLIOGRAFIA

CLAUZADE, C. End-of-life tires in electric arc furnaces: an industrial success story. *ALIAPUR report*. 2006

DANKWAH, J. R., & KOSHY, P. Production of Metallic Iron from Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) using End-of-Life Rubber Tyre and its Blends with Metallurgical Coke as Reductants. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 10, pp. 1-12). 2013

KONGKARAT, S., KHANNA, R., KOSHY, P., O'KANE, P., & SAHAJWALLA, V. Recycling waste polymers in EAF steelmaking: Influence of polymer composition on carbon/slag interactions. *ISIJ international*, 52(3), 2012 385-393.

MADIAS J. Un aporte de la industria del acero a la comunidad. Dossier tecnológico .14 pp. ARGENTINA. 2011

RAMOS, G., ALGUACIL, F. J., & LÓPEZ GÓMEZ, F. A. The recycling of end-of-life tyres. Technological review. 2011

SAHAJWALLA, V., ZAHARIA, M., MANSURI, I., RAJARAO, R., DHUNNA, R., & YUNOS, F. N. The power of steelmaking-harnessing high-temperature reactions to transform waste into raw material resources. *Iron and Steel Technology*, 10(8), 68-83. 2013

SAHAJWALLA, V., ZAHARIA, M., RAHMAN, M., KHANNA, R., SAHA-CHAUDHURY, N., O'KANE, P. & KNIGHTS, D. Recycling Rubber Tyres and Waste Plastics in EAF Steelmaking. *Steel Research*, 82, 2011 567-567.

SHULMAN, V. L. Tyre recycling after 2000: status and options. 2000

WORLD STEEL ASSOCIATION. World crude steel output increases by 5,3% in 2017. Worldsteel Association. 2017

ZAHARIA, M., SAHAJWALLA, V., KHANNA, R., & KOSHY, P. Carbon/Slag Interactions between Coke/Rubber Blends and EAF Slag at 1 550 C. ISIJ international, 49(10), 2009 1513-1521.

ZAHARIA, M., SAHAJWALLA, V., KIM, B. C., KHANNA, R., SAHA-CHAUDHURY, N., O'KANE, P.& KNIGHTS, D. Recycling of rubber tires in electric arc furnace steelmaking: simultaneous combustion of metallurgical coke and rubber tyres blends. Energy & Fuels, 23(5), 2009 2467-2474.

## ANEXOS

### Anexo A. Producción mundial de acero crudo de 1950 a 2017 <sup>22</sup>

Años	Producción
1950	189
1955	270
1960	347
1965	456
1970	595
1975	644
1980	717
1985	719
1990	770
1995	753
1996	751

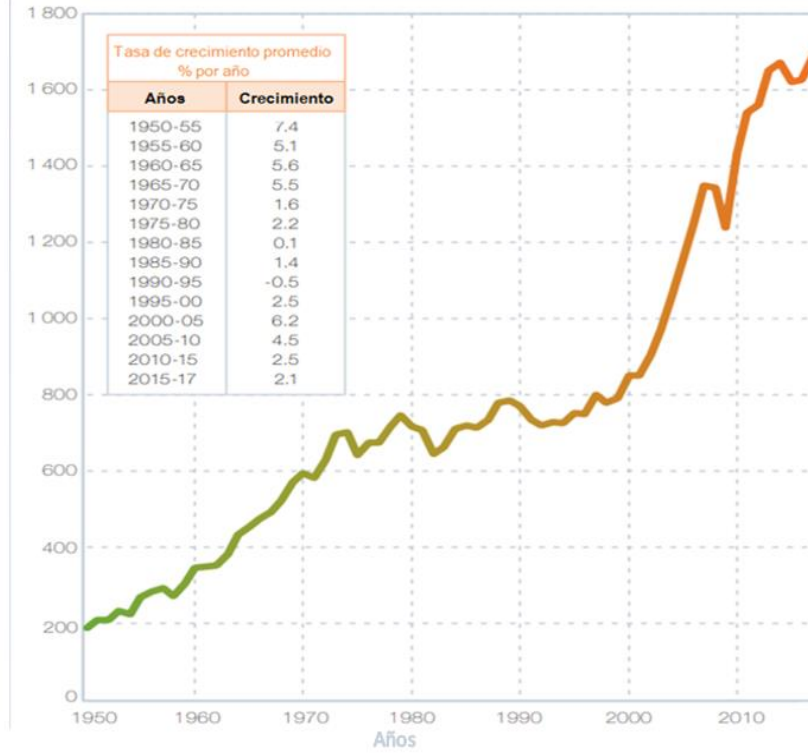
Años	Producción
1997	800
1998	779
1999	790
2000	850
2001	852
2002	905
2003	971
2004	1063
2005	1148
2006	1250
2007	1348

Años	Producción
2008	1343
2009	1239
2010	1433
2011	1538
2012	1560
2013	1650
2014	1669
2015	1620
2016	1627
2017	1689

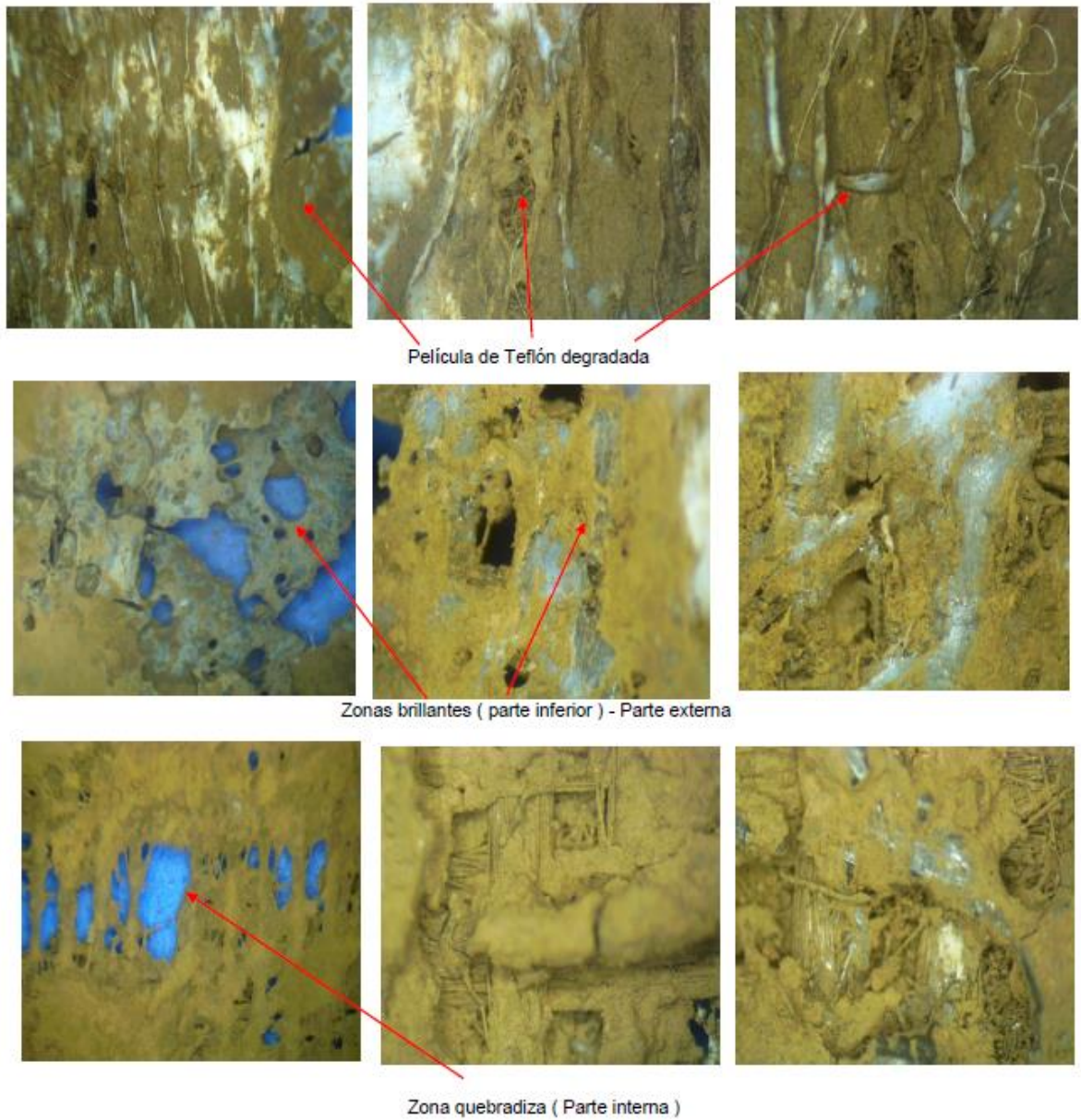
---

<sup>22</sup> WORLD STEEL ASSOCIATION. Op. Cit.

Millones de toneladas

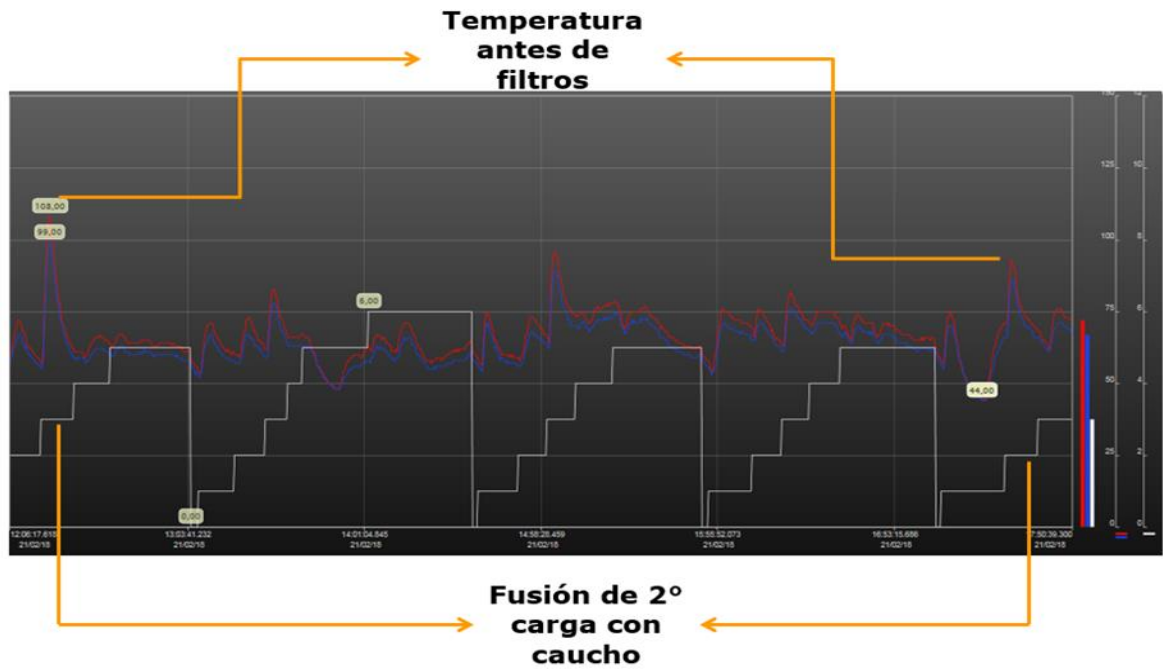


**Anexo B. Análisis de talegas que se quemaron debido a las altas temperaturas generadas por el uso de TDF en el segundo cargue.**



**Anexo C. Picos de temperatura registrados en el segundo cargue con TDF.**

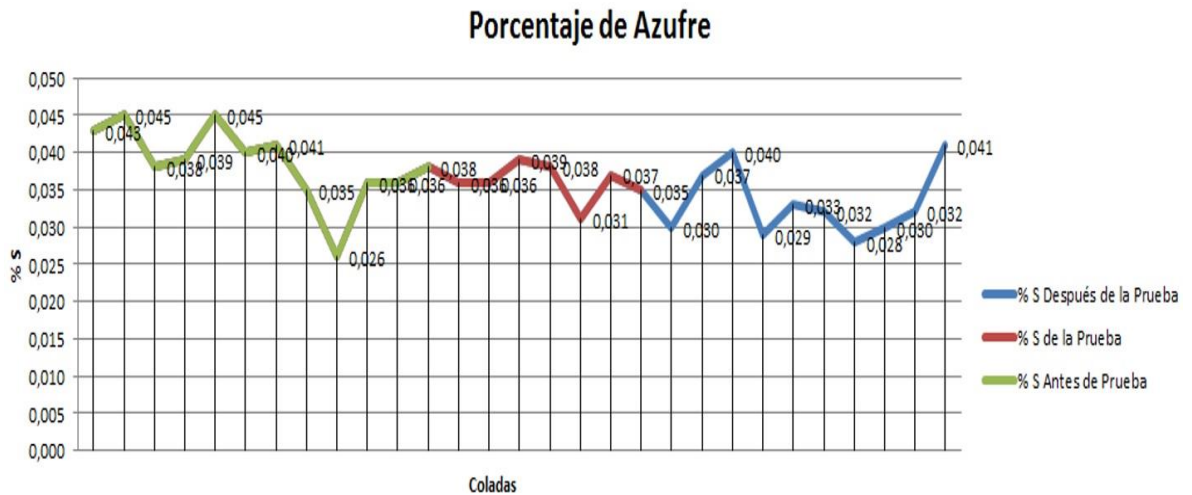
**Picos de temperatura registrados en el segundo cargue con TDF.**



**Anexo D. Tabla con los datos de las coladas a las cuales se les realizó la muestra de escoria.**

<b>Colada</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Toneladas de Chatarra</b>	44,293	42,106	42,038
<b>% Chatarra Fragmentada</b>	28%	51%	41%
<b>Nº Cargues</b>	4	5	6
<b>Antracita inyectada</b>	0	0	0
<b>Cal Viva [kg]</b>	500	500	500
<b>Cal Dolomítica [Kg]</b>	400	400	400
<b>Acondicionador [Kg]</b>	200	200	200
<b>O2 Cojet's [Nm³]</b>	1073	1614	1550
<b>%C entrada</b>	0,044	0,075	0,121
<b>ppm O2</b>	461,6	417,64	83,8

**Anexo E. Gráfica con el comportamiento de azufre en las coladas antes, durante y después de la prueba.**



- Tabla con los porcentajes de azufre en las pruebas con mejor desempeño.

Colada	Caucho TDF	Antracita	%C	%S
A0079628	150	300	0,10	0,032
A0079629	150	300	0,08	0,028
A0079650	150	300	0,10	0,026
A0079651	150	300	0,07	0,03
A0079663	150	300	0,07	0,028
A0079630	200	200	0,11	0,034
A0079631	200	200	0,16	0,035
A0079633	200	200	0,05	0,047
A0079632	300	200	0,06	0,032
A0079634	300	200	0,25	0,046
A0079646	300	100	0,08	0,031
A0079647	300	100	0,05	0,031
A0079648	300	100	0,07	0,033
A0079649	300	200	0,14	0,033

Colada	Caucho TDF	Antracita	%C	%S
A0079667	300	300	0,07	0,036
A0079668	300	300	0,07	0,039
A0079681	300	150	0,07	0,028
A0079661	450	0	0,06	0,03
A0079662	450	0	0,05	0,032
A0079664	450	0	0,05	0,028
A0079665	450	0	0,04	0,025
A0079666	450	200	0,06	0,032
A0079678	450	0	0,06	0,025
A0079679	450	150	0,09	0,032
A0079680	450	100	0,05	0,025
A0079682	450	100	0,06	0,031
A0079683	450	200	0,09	0,033