

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
MECÁNICAS DE LA PASTA ELECTRÓDICA EMPLEADA EN  
LA CONFORMACIÓN DE ELECTRODOS DE AUTO –  
COCCIÓN TIPO SÖDERBERG”**

**REALIZADO POR:**

**MARLLELYN VIDELIS AROCHA RIVERO**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**BARCELONA, ABRIL DE 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
MECÁNICAS DE LA PASTA ELECTRÓDICA EMPLEADA EN  
LA CONFORMACIÓN DE ELECTRODOS DE AUTO –  
COCCIÓN TIPO SÖDERBERG”**

**ASESORES**

---

**Ing. Quím. Frank Parra**

**Asesor Académico**

---

**Ing. Quím. Enrique Moreno**

**Asesor Industrial**

**BARCELONA, ABRIL DE 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
MECÁNICAS DE LA PASTA ELECTRÓDICA EMPLEADA EN  
LA CONFORMACIÓN DE ELECTRODOS DE AUTO –  
COCCIÓN TIPO SÖDERBERG”**

---

**Ing. Quím. Parra Frank**

**Asesor Académico**

---

**Ing. Mecánico Bittar Simón**

**Jurado Principal**

---

**Ing. Quím. Ochoa Osvaldo**

**Jurado Principal**

**BARCELONA, ABRIL DE 2010**

## **RESOLUCIÓN**

De Acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a la memoria de mi abuela “MARÍA ARIAS”, quien en vida fue quien me cuidó y brindó su más sincero amor, se que donde te encuentras estás al igual que yo FELIZ y ORGULLOSA por éste tan anhelado logro. A mis Padres porque sin ellos fuese sido imposible lograr esta meta.*  
**ESTA CONQUISTA ES SOLO NUESTRA.**  
*“...porque solo triunfa quien se atreve a atreverse....”*  
**¡¡¡VALIO LA PENA!!!**

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios Todopoderoso**, por permitirme la vida, guiarme y concederme el triunfo ante todos los obstáculos enfrentados.

Eternamente agradecida a mi **Abuela María Arias**, por su amor y cuidados. Aunque no te encuentres físicamente siempre estas presente en cada día de mi vida.

A mis padres **María Rivero y Vidal Arocha** pilares fundamentales para el logro de esta meta. Gracias por brindarme su apoyo incondicional y haberme dado la oportunidad de formarme como profesional en la especialidad de Ingeniería Química. A ustedes debo todo lo que soy, espero haber superado las expectativas, muchas gracias.

A mis hermanos **Marilyn, José y Marlyn Arocha**, y sobrinos **José Alexander, Jhon Alberto, Edmilso Alejandro, Johelis de Jesús y María Alejandra**. Gracias por formar parte de mi familia.

Especial agradecimientos a personas que considero parte de mi familia, y por ello les aprecio y recuerdo cada día de mi vida por estar siempre pendiente de mí. A **Madrina Irima Marcano, Madrina Carmen Luna y Tía Thairit Sifontes**.

A **Ana María Hernández** por su apoyo incondicional, por estar siempre allí en los momentos difíciles de mi vida, por su confianza y amistad. A ti y tu familia muchísimas gracias por su apoyo.

A mis amigas **Elisbeth Tovar y Mary Brito**, por estar presentes en esta etapa compartiendo momentos gratos de mi vida. **Las quiero mucho, ha sido un honor poder contar con su amistad.**

A mis amigas y compañeros de estudios **Yulis Jonte, Bineida Arias, Yoliset Franco, Suely Alves, Iliana Cicolini, Isabel Contino, Yeissica, Xiomara Guariquez, Rut González, Maira Ibáñez, Maira Hernández y Giovel Rodríguez**, por acompañarme en esta travesía y formar parte de mi historia.

Al señor **Aljedre Brito**, por el apoyo brindado para mi ingreso a la empresa Ferrovén, S.A. eternamente agradecida con usted. **Gracias que Dios lo bendiga....**

Al **Ing. Frank Parra** por el tiempo dedicado en el desarrollo de éste trabajo, muchas gracias por haber aceptado el compromiso de ser mi asesor académico.

Al **Ing. Enrique Moreno** por darme la oportunidad de realizar la pasantía y ser mi tutor industrial en la empresa Ferroatlántica de Venezuela, S.A.

A la **Ing. María Hernández** por el soporte brindado durante la realización de los ensayos y los conocimientos aportados. **Muchas gracias...**

Al **Ing. Edgar Jiménez y al Señor Pompa**, por la ayuda brindada durante mi estadía en planta de pasta electrodica. Así mismo agradezco al personal técnico y operativo de esta planta, muy especialmente a **Rivas, Vargas, Puerta, Boris y José**.

A la empresa **Ferroatlántica de Venezuela, S.A.** por permitir desarrollar mi proyecto en sus instalaciones y agradeciendo toda la ayuda brindada y que mis estudios puedan servirles como referencia.

A todo el equipo de albañilería que labora en horno III, y personal obrero de planta de pasta así como también al **Ing. Marcano Jonny**, por la ayuda brindada, gracias a todos... porque con su valiosa ayuda hicieron posible la realización de este proyecto de investigación.

A la *Universidad de Oriente* por haberme permitido formarme como profesional en la especialidad de *Ingeniería Química*.

*Agradezco toda la valiosa colaboración brindada por todas las personas que de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de este proyecto de investigación que Dios los bendiga.*

*¡Hoy no solo soy lo que he querido ser sino lo que han ayudado a formar!  
Muchas gracias por haber contribuido a cumplir mi más anhelado sueño.*

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA PASTA ELECTRÓDICA EMPLEADA EN LA CONFORMACIÓN DE ELECTRODOS DE AUTO – COCCIÓN TIPO SÖDERBERG”**

**AUTOR: Marllelyn V. Arocha Rivero**

**RESUMEN**

La presente investigación está dedicada a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la pasta electródica empleada en la conformación de electrodos de auto – cocción tipo Söderberg, con la finalidad de incrementar su eficiencia dentro del proceso de reducción de metales llevado a cabo en hornos de arco eléctrico sumergido; mediante caracterización física del material sólido alimentado al proceso, medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán empleada como aglomerante del agregado seco, fabricación de pasta a relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 50:50; 60:40; 70:30 y 80:20; y caracterización física de la pasta cruda a través de ensayos de densidad aparente y plasticidad. Así mismo se determinará la apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente, niveles de compresión y flexión presentada por la pasta electródica cocida, estando todos los ensayos rigidos por procedimientos establecidos por Elkem A/S y normas ISO para materiales carbonosos. Obteniéndose un alto contenido de partículas con tamaño menor a 0,075mm en el material fino de AEC, variaciones en la composición del material grueso de AEC presentando éste un contenido inferior en la cantidad de partículas con tamaños de 12,50; 9,50 y 0,60 mm; además de evidenciarse una desviación del 21% respecto a los valores establecidos en la PFV-PRO021 para el contenido de partículas de AEC con tamaño de grano superior a 6,30 e inferior a 9,50 mm. Los resultados obtenidos del ensayo de punto de ablandamiento arrojó como temperatura de reblandecimiento para la brea de alquitrán alimentada actualmente al proceso de producción de pasta electródica un valor de 55°C, encontrándose por debajo del valor mínimo establecido por la empresa Ferroven, S.A. para la fabricación de pasta cuyo rango oscila entre 60° y 70°C, estando la temperatura de ablandamiento asociada al grado de deformación que presenta la pasta electródica durante su almacenamiento. En cuanto a las propiedades físicas de la pasta cruda, se observó que las relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 70:30 y 80:20, respectivamente, presentaron plasticidad infinita mientras que las relaciones 50:50 y 60:40, cumplieron con los parámetros de calidad establecidos por la empresa Ferroven, S.A. siendo éstas seleccionadas para la aplicación de los ensayos mecánicos presentando la relación 60:40 un valor de módulo de rotura igual a 39,85 kg-f/cm<sup>2</sup> y para la 50:50 se obtuvo 33,22 Kg-f/cm<sup>2</sup>. La relación grueso/fino en la mezcla que proporcionó propiedades físicas y mecánicas más adaptadas a las exigencias de incrementar la eficiencia en la calidad de la pasta cocida fue la relación 60:40.



# ÍNDICE

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| RESOLUCIÓN.....       | iv    |
| DEDICATORIA.....      | v     |
| AGRADECIMIENTOS.....  | vi    |
| RESUMEN.....          | viii  |
| ÍNDICE.....           | ix    |
| ÍNDICE DE FIGURA..... | xv    |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xviii |

## CAPÍTULO I

|  |           |
|--|-----------|
| EL PROBLEMA.....   | 19        |
| <b>1.1 Ferroatlántica de Venezuela (Ferrogen), s.a. ....</b> | <b>19</b> |
| 1.1.2 Ubicación geográfica.....                              | 21        |
| 1.1.3 Políticas.....   | 22        |
| 1.1.4 Estructura organizativa.....                           | 22        |
| 1.1.5 Proceso productivo.....                                | 23        |
| 1.1.5.1 Ferrosilicio(FeSi).....                              | 24        |
| 1.1.5.2 Ferromanganeso (FeMn).....                           | 25        |
| 1.1.5.3 Silicomanganeso (SiMn).....                          | 26        |
| 1.1.5.4 Microsilíce.....                                     | 26        |
| 1.1.5.5 Antracita calcinada.....                             | 28        |
| 1.1.5.6 Pasta electrodica.....                               | 29        |
| <b>1.2 Planteamiento del problema.....</b>                   | <b>30</b> |
| <b>1.3 Objetivos.....</b>                                    | <b>32</b> |
| 1.3.1 Objetivo general.....                                  | 32        |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                             | 32        |

## **CAPÍTULO II**

|  |           |
|--|-----------|
| MARCO TEÓRICO .....  | 33        |
| <b>2.1 Antecedentes .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>2.2 Antracita .....</b>   | <b>34</b> |
| 2.2.1 Propiedades físico - químicas de la antracita .....                    | 36        |
| 2.2.1.1 Propiedades físicas .....  | 36        |
| 2.2.1.2 Propiedades químicas .....   | 36        |
| 2.2.2 Tratamientos físico-químicos aplicados a la antracita .....            | 36        |
| 2.2.2.1 Tratamiento químico.....   | 36        |
| 2.2.2.2 Tratamiento físico.....  | 38        |
| <b>2.3 Distribución granulométrica de partículas sólidas .....</b>           | <b>40</b> |
| 2.3.1 Análisis diferencial .....   | 41        |
| <b>2.4 Brea de alquitrán de hulla .....</b>                                  | <b>42</b> |
| 2.4.1 Propiedades físico – químicas de la brea de alquitrán .....            | 43        |
| 2.4.1.1 Propiedades físicas .....  | 43        |
| 2.4.1.2 Propiedades químicas .....   | 44        |
| <b>2.5 Punto de ablandamiento o reblandecimiento.....</b>                    | <b>44</b> |
| <b>2.6 PASTA EECTRÓDICA .....</b>  | <b>45</b> |
| 2.6.1 Tipos de pasta electrodica.....  | 47        |
| 2.6.2 Materia prima empleada en la fabricación de la pasta electrodica ..... | 48        |
| <b>2.7 Fabricación de pasta electrodica .....</b>                            | <b>48</b> |
| 2.7.1 Proceso de fabricación de pasta electrodica.....                       | 49        |
| 2.7.2 Etapas fundamentales del proceso productivo .....                      | 51        |
| 2.7.2.1 Calcinación .....  | 51        |
| 2.7.2.2 Molienda.....  | 52        |
| 2.7.2.3 Fundición y circulación de brea.....                                 | 52        |
| 2.7.2.4 Pesaje de antracita eléctricamente calcinada (AEC) y mezclado ..     | 53        |
| 2.7.2.5 Descarga, moldeo y compactación .....                                | 53        |
| 2.7.2.6 Enfriamiento, desmoldeo y almacenamiento.....                        | 54        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.7.3 Factores que intervienen en la fabricación de la pasta electrodica .....    | 54        |
| 2.7.4 Parámetros que afectan las propiedades físicas de la pasta electrodica..... | 54        |
| 2.7.4.1 Temperatura de calcinación de la antracita .....                          | 54        |
| 2.7.4.2 Calidad de la brea de alquitrán .....                                     | 55        |
| 2.7.4.3 Grado de compactación .....   | 55        |
| <b>2.8 Propiedades físicas y mecánicas de la pasta electrodica .....</b>          | <b>56</b> |
| 2.8.1 Densidad aparente .....   | 56        |
| 2.8.2 Plasticidad .....   | 56        |
| 2.8.3 Resistividad eléctrica .....  | 57        |
| 2.8.4 Porosidad.....  | 57        |
| 2.8.5 Resistencia a la compresión .....   | 58        |
| 2.8.6 Resistencia a la flexión .....  | 58        |
| <b>2.9 Aplicación de la pasta electrodica .....</b>                               | <b>58</b> |
| 2.9.1 Pasta electrodica tipo “A” .....  | 58        |
| 2.9.2 Pasta electrodica tipo “C” .....  | 59        |
| 2.9.3 Pasta electrodica tipo “D” .....  | 59        |
| <b>2.10 Electrodo</b> .....   | <b>59</b> |
| 2.10.1 Electrodo pre-cocidos ó de grafito .....                                   | 60        |
| 2.10.2 Electrodo de auto-cocción o Söderberg.....                                 | 60        |
| 2.10.2.1 Propiedades.....   | 62        |
| 2.10.2.2 Principio de funcionamiento.....   | 65        |
| 2.10.2.3 Columna ó virola del electrodo .....                                     | 68        |
| 2.10.2.4 Roturas del electrodo .....  | 71        |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO III</b>   |           |
| <b>DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>3.1 Caracterización física de la antracita eléctricamente calcinada .....</b>  | <b>74</b> |
| 3.1.1 Muestreo .....  | 74        |
| 3.1.2 Análisis granulométrico .....   | 75        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.2.1 Procedimiento experimental.....   | 75        |
| 3.1.3 Resistividad eléctrica .....  | 75        |
| 3.1.3.1 Preparación de la muestra.....  | 76        |
| 3.1.3.2 Procedimiento experimental.....   | 76        |
| <b>3.2 Medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán, usada como materia prima en la fabricación de pasta eléctrica, a través de la norma ASTM D36 – 06.....</b>  | <b>77</b> |
| 3.2.1 Preparación de la muestra .....   | 77        |
| 3.2.2 Procedimiento para obtener el punto de ablandamiento a 80°C o por debajo.....   | 77        |
| <b>3.3 Fabricación de pasta eléctrica con relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada de 80:20; 70:30; 60:40 y 50:50 respectivamente, según procedimiento de fabricación de pasta eléctrica PFV – PRO021, y caracterizarlas físicamente en crudo a través de ensayos de densidad aparente y plasticidad.....</b> | <b>78</b> |
| 3.3.1 Elaboración de pasta eléctrica tipo “A” .....   | 79        |
| 3.3.2 Análisis granulométrico .....   | 79        |
| 3.3.3 Densidad aparente.....  | 79        |
| 3.3.4 Plasticidad.....  | 80        |
| 3.3.4.1 Preparación de la probeta .....   | 80        |
| 3.3.4.2 Procedimiento experimental.....   | 81        |
| <b>3.4 Determinación de apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente y niveles de compresión y flexión, que presenta la pasta eléctrica cocida mediante métodos estandarizados para materiales carbonosos .....</b>   | <b>81</b> |
| 3.4.1 Preparación de la muestra .....   | 82        |
| 3.4.2 Apertura de poros.....  | 83        |
| 3.4.3 Resistividad eléctrica .....  | 83        |
| 3.4.4 Densidad aparente.....  | 84        |
| 3.4.5 Nivel de compresión .....   | 84        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.4.6 Nivel de flexión.....  | 85         |
| <b>3.5 Muestra de cálculo .....</b>  | <b>87</b>  |
| 3.5.1 Cálculo de la resistividad eléctrica de material grueso y mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC).....  | 87         |
| 3.5.2 Cálculo de la cantidad de material a alimentar a los mezcladores para la producción de pasta electrodica a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada..... | 88         |
| 3.5.3 Cálculo de la densidad aparente de la pasta electrodica cruda .....  | 94         |
| 3.5.4 Cálculo de apertura de poros.....  | 96         |
| 3.5.5 Cálculo de la resistividad eléctrica, densidad aparente, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de la pasta electrodica cocida .....   | 97         |
| <b>3.6 Descripción de equipos, materiales y sustancias .....</b>   | <b>103</b> |
| 3.6.1 Equipos .....  | 103        |
| 3.6.2 Materiales.....  | 110        |
| 3.6.3 Sustancias.....  | 111        |

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .. 112**

#### **4.1 Caracterización física de la antracita calcinada a través de análisis diferencial y resistividad eléctrica .....**

4.1.1 Análisis diferencial de la antracita eléctricamente calcinada (AEC)..... 112

4.1.2 Resistividad eléctrica de la antracita eléctricamente calcinada (AEC)..... 115

#### **4.2 Medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán, usada como materia prima en la fabricación de pasta electrodica, a través de la norma ASTM D36-06 .....**

#### **4.3 Fabricación de pasta electrodica a relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada de 50:50, 60:40, 70:30 y 80:20 respectivamente, según procedimiento de fabricación de pasta electrodica PFV-PRO021, y**

|   |            |
|---|------------|
| <i>caracterizarlas físicamente en crudo a través de ensayos de plasticidad y densidad aparente</i> .....  | <b>120</b> |
| 4.3.1 Densidad aparente .....   | 120        |
| 4.3.2 Plasticidad .....   | 122        |
| <b>4.4 Determinación de apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente y niveles de compresión y flexión, que presenta la pasta electrodica cocida mediante métodos estandarizados para materiales carbonosos</b> ..... | <b>124</b> |
| 4.4.1 Apertura de poros .....   | 125        |
| 4.4.2 Resistividad eléctrica .....  | 126        |
| 4.4.3 Densidad aparente .....   | 127        |
| 4.4.4 Propiedades mecánicas .....   | 128        |
| <b>4.5 CONCLUSIONES</b> .....   | <b>133</b> |
| <b>4.6 RECOMENDACIONES</b> .....  | <b>135</b> |
| <br>BIBLIOGRAFÍA CITADA .....   | <br>136    |
| BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL .....  | 139        |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO: .....  | 141        |

## ÍNDICE DE FIGURA

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 1.1 Ubicación Geográfica de Ferroatlántica de Venezuela, S.A.</i> .....   | 21 |
| <i>Figura 1.2 Organigrama general de la empresa</i> .....   | 23 |
| <i>Figura 1.3 Ferrosilicio</i> .....  | 24 |
| <i>Figura 1.4 Ferromanganeso medio carbono</i> .....  | 25 |
| <i>Figura 1.5 Silicomanganeso (SiMn)</i> .....  | 26 |
| <i>Figura 1.6 Microsílice</i> .....   | 27 |
| <i>Figura 1.7 Antracita Calcinada</i> .....   | 28 |
| <i>Figura 1.8 Cilindros de pasta electrodica tipo “A”</i> .....   | 29 |
| <i>Figura 2.1 Estructura del carbono en función de la temperatura de calcinación.</i> <sup>[3]</sup>                            | 35 |
| <i>Figura 2.2 Efecto de la temperatura de calcinación de la antracita sobre algunas propiedades</i> .....                       | 38 |
| <i>Figura 2.3 Molino giratorio de bolas</i> <sup>[5]</sup> .....  | 39 |
| <i>Figura 2.4 Esquema de la obtención de brea de alquitrán de hulla como subproducto de la coquización</i> <sup>[7]</sup> ..... | 42 |
| <i>Figura 2.5 Partículas del agregado seco aglutinadas con brea de alquitrán</i> .....  | 43 |
| <i>Figura 2.6 Canales que generan la salida de los gases de la pasta durante la cocción</i> .....                               | 46 |
| <i>Figura 2.7 Diagrama de proceso de producción de pasta electrodica</i> .....  | 49 |
| <i>Figura 2.8 Electrodo Söderberg</i> .....   | 61 |
| <i>Figura 2.9 Densidad del agregado frente a la resistencia eléctrica.</i> <sup>[11]</sup> .....                                | 63 |
| <i>Figura 2.10 Resistencia eléctrica frente a la cantidad de brea en la pasta.</i> <sup>[11]</sup> .....                        | 63 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Figura 2.11 Resistencia eléctrica frente a temperatura y tiempo de coquización ..</i>   | 64  |
| <i>Figura 2.12 Distribución de la temperatura en un electrodo para FeSi de 1.550 mm de diámetro.<sup>[10]</sup> .....</i>                      | 67  |
| <i>Figura 2.13 Conductividad eléctrica del electrodo contra temperatura en base a una composición de carbono y acero.<sup>[10]</sup> .....</i> | 69  |
| <i>Figura 2. 14 Envoltura de un electrodo de auto-cocción, mostrando sus aletas de acero.....</i>  | 70  |
| <i>Figura 3.1 Montaje para determinar punto de ablandamiento de la brea por el método del anillo y bola .....</i>                              | 78  |
| <i>Figura 3.2 Balance de materia global correspondiente al material alimentado al mezclador (Mx).....</i>                                      | 89  |
| <i>Figura 3.3 Balanza digital .....</i>  | 103 |
| <i>Figura 3.4 Balanza Digital .....</i>  | 104 |
| <i>Figura 3.5 Balanza digital .....</i>  | 104 |
| <i>Figura 3.6 Tamizador eléctrico .....</i>  | 105 |
| <i>Figura 3.7 Batería de tamices .....</i>   | 105 |
| <i>Figura 3.8 Estufa mufla eléctrica .....</i>   | 106 |
| <i>Figura 3.9 Medidor de resistividad.....</i>   | 106 |
| <i>Figura 3.10 Prensa hidráulica para ensayos mecánicos.....</i>   | 106 |
| <i>Figura 3.11 Horno para cocción de probetas de pasta electrodica .....</i>   | 107 |
| <i>Figura 3.12 Vernier .....</i>   | 107 |
| <i>Figura 3.13 Campana de Extracción .....</i>   | 108 |
| <i>Figura 3.14 Bomba de vacío .....</i>  | 108 |
| <i>Figura 3.15 Plancha de agitación .....</i>  | 109 |
| <i>Figura 3.16 Horno .....</i>   | 109 |
| <i>Figura 3.17 Molino de fricción .....</i>  | 110 |
| <i>Figura 3.18 Cortadora eléctrica .....</i>   | 110 |
| <i>Figura 4.1 Curva granulométrica de de material fino de AEC.....</i>   | 113 |
| <i>Figura 4.2 Curva granulométrica de material grueso de AEC .....</i>   | 114 |



|  |            |
|--|------------|
| <i>Figura 4.3 Curva granulométrica de mezclas de AEC a diferentes relaciones grueso/fino .....</i>   | <i>115</i> |
| <i>Figura 4.4 Efecto de la resistividad eléctrica del material grueso sobre la resistividad eléctrica de la mezcla de AEC .....</i>                                | <i>118</i> |
| <i>Figura 4.5 Densidad aparente promedio de la pasta electrónica fabricada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC .....</i>                       | <i>122</i> |
| <i>Figura 4.6 Módulo de flexión promedio de la pasta electrónica fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 50/50 y 60/40 respectivamente.</i>      | <i>130</i> |
| <i>Figura 4.7 Módulo de elasticidad promedio presentada por la pasta electrónica fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 50/50 y 60/40 .....</i> | <i>131</i> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2.1 Tipos de pasta electrodica según su plasticidad <sup>[6]</sup> .....  | 48  |
| Tabla 2.2 Especificaciones de calidad para la antracita calcinada.....  | 52  |
| Tabla 2.3 Balance de energía para un electrodo Söderberg.....   | 66  |
| Tabla 3.1 Valores de caída de tensión del material grueso y mezcla de AEC.....  | 87  |
| Tabla 3.2 Valores de peso presentados por las probetas de pasta electrodica cruda y volumen desplazado por las mismas.....  | 95  |
| Tabla 3.3 Valores de Peso de la muestra seca-húmeda y volumen desplazado.....   | 96  |
| Tabla 3.4 Valores de caída de tensión, peso, diámetro y ancho de las probetas de pasta electrodica cocida y carga aplicada en los ensayos de compresión y flexión.... | 98  |
| Tabla 4.1 Análisis granulométrico promedio de material fino de AEC proveniente del proceso de molienda.....   | 113 |
| Tabla 4.2 Análisis granulométrico promedio de material grueso de AEC proveniente del proceso de calcinación.....  | 114 |
| Tabla 4.3 Análisis granulométrico promedio de la mezcla de AEC proveniente del mezclador.....   | 115 |
| Tabla 4.4 Resistividad eléctrica presentada por el material grueso y mezcla de AEC.....   | 117 |
| Tabla 4.5 Temperatura de ablandamiento experimental presentada por la brea de alquitrán lote 2007.....  | 119 |
| Tabla 4.6 Densidad aparente presentada por la pasta electrodica fabricada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC.....                                | 121 |
| Tabla 4.7 Plasticidad presentada por la pasta electrodica elaborada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC.....                                      | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.8 Parámetros físicos de la pasta electrónica cocida .....   | 125 |
| Tabla 4.9 Propiedades mecánicas de la pasta electrónica cocida..... | 129 |

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Ferroatlántica de Venezuela (Ferroven), S.A.

Es una empresa de capital mayoritariamente privado dedicado principalmente a la producción de ferrosilicio, ferromanganeso, microsílíce y en menor proporción antracita calcinada y pasta electródica. La empresa tuvo sus orígenes el 22 de agosto de 1972 cuando la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G.), conjuntamente con representantes de la compañía francesa Bozel Electrometallurgie S.A. se plantean la construcción de una compañía anónima venezolana con el objetivo de producir y vender ferroaleaciones de diferentes tipos. El 14 de noviembre de 1973 es creada y registrada legalmente la compañía venezolana de ferroaleaciones Bozel (VENBOZEL C.A.), con una participación del 75% de la compañía francesa y un 25% de la Corporación Venezolana de Guayana. A partir de ese momento se inicia la construcción de la planta en la zona industrial Matanzas y el 1<sup>ero</sup> de enero de 1977 inicia la operación comercial de la empresa con la puesta en marcha de los hornos I y II. La empresa operó bajo el nombre de VENBOZEL C.A. hasta el 13 de diciembre de 1979, fecha en la cual la Asamblea General Extraordinaria decidió el cambio de nombre o razón social de la empresa por C.V.G. Venezolana de Ferrosilicio C.A. (C.V.G. Fesilven C.A.); pasando el 88,69% de las acciones a manos del sector público a través de la Corporación Venezolana de Guayana y el 11.31% a capital privado. En 1988, la empresa dio inicio a un proyecto de ampliación que comprendía la construcción de dos nuevos hornos, uno de los cuales sería utilizado para la producción de silicio metálico, además de la modernización de los hornos existentes. En 1989, comienza la ejecución del proyecto de ampliación y para el 14 de mayo de

1993, entra en operación el horno III. Posteriormente, el 11 de agosto de 1994, finaliza la modernización del horno II y el 24 de junio de 1995, la del horno I.

El 28 de diciembre de 1995 la Cámara Plena del Congreso Nacional aprobó iniciar el proceso de privatización de manera controlada de algunas empresas de la Corporación Venezolana de Guayana, entre ellas C.V.G. Fesilven C.A. a fin de lograr la incorporación de capital, tecnología y mercados requeridos para alcanzar y mantener su competitividad. La empresa operó bajo el nombre de C.V.G. Venezolana de ferrosilicio C.A. (C.V.G. Fesilven C.A.), hasta el 3 de diciembre de 1998, fecha en la cual fue vendida a la empresa de capital privado Español Ferroatlántica S.A. bajo la modalidad de activos en operación; por un monto de veinte (20) millones de dólares, cambiando el nombre ó razón social de la compañía por Ferroatlántica de Venezuela S.A. (Ferroven S.A.). La distribución de las acciones actual es la siguiente: Ferroatlántica 80% y parte del 20% restante está en manos de los trabajadores de la empresa y otra parte de este último porcentaje está aún en manos de la Corporación Venezolana de Guayana, la cual ha continuado el proceso de ventas de las acciones a los trabajadores de acuerdo al programa de participación laboral.

Ferroatlántica de Venezuela S.A. (Ferroven S.A.), posee en su planta de producción de ferrosilicio tres hornos eléctricos de arco sumergido (hornos de reducción) los cuales en conjunto tienen una capacidad de producción total de 90.000 toneladas/año de ferrosilicio (FeSi) con una potencia de consumo por horno de 32MW. Posteriormente en diciembre de 1995, se puso en marcha el sistema de tratamiento de protección ambiental a través de la planta de tratamiento de humos, la cual cumple con la función principal de depurar mediante filtros, los humos provenientes del proceso de producción de ferrosilicio, así como también permite el aprovechamiento y recuperación del microsíllice contenido en ellos, permitiendo de esta manera la recuperación de 14.300 toneladas/año de este material, dando inicio a

la comercialización del mismo subproducto originado del procesamiento de humo. Para el año 2000 es adquirida la planta de pasta electródica de la Siderúrgica del Orinoco, C.A. (SIDOR, C.A.); iniciando así Ferroven, S.A. la producción y comercialización de antracita calcinada y pasta electródica. Para el año 2006 es implantado el horno IV, el cual presenta las características necesarias para permitir la producción de ferromanganeso o silicomanganeso; ubicándose como uno de los hornos más modernos por contar con su propio sistema de tratamiento de humos.

### 1.1.2 Ubicación geográfica

Geográficamente la empresa se encuentra ubicada en la zona industrial Matanzas, sector Punta de Cuchillos, Puerto Ordaz, Ciudad Guayana - estado Bolívar, Venezuela.

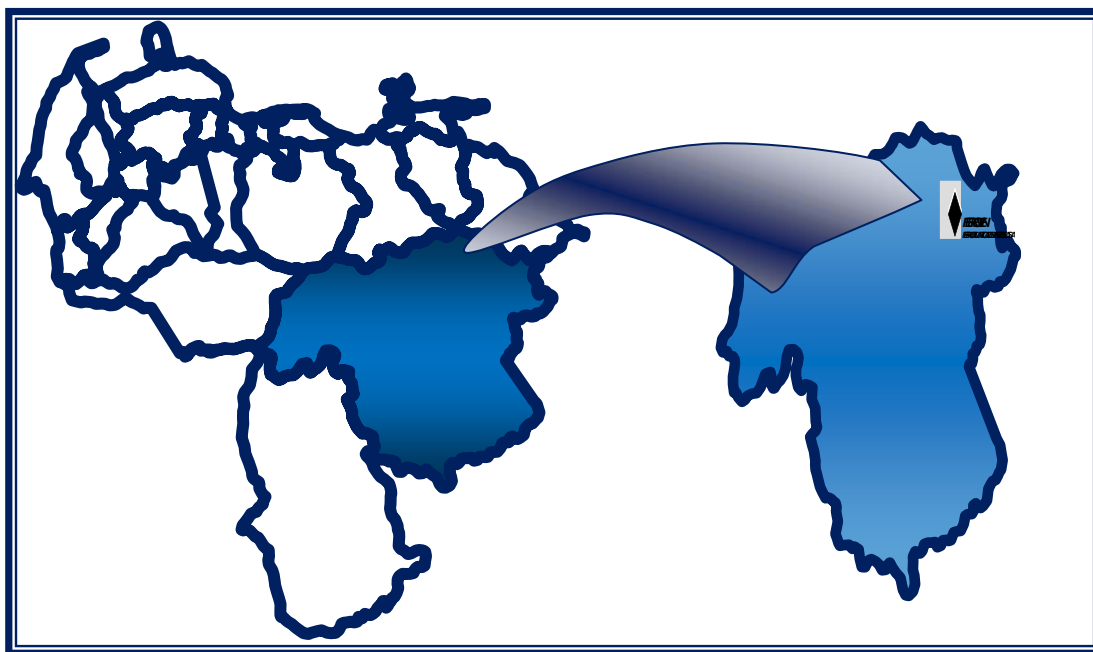


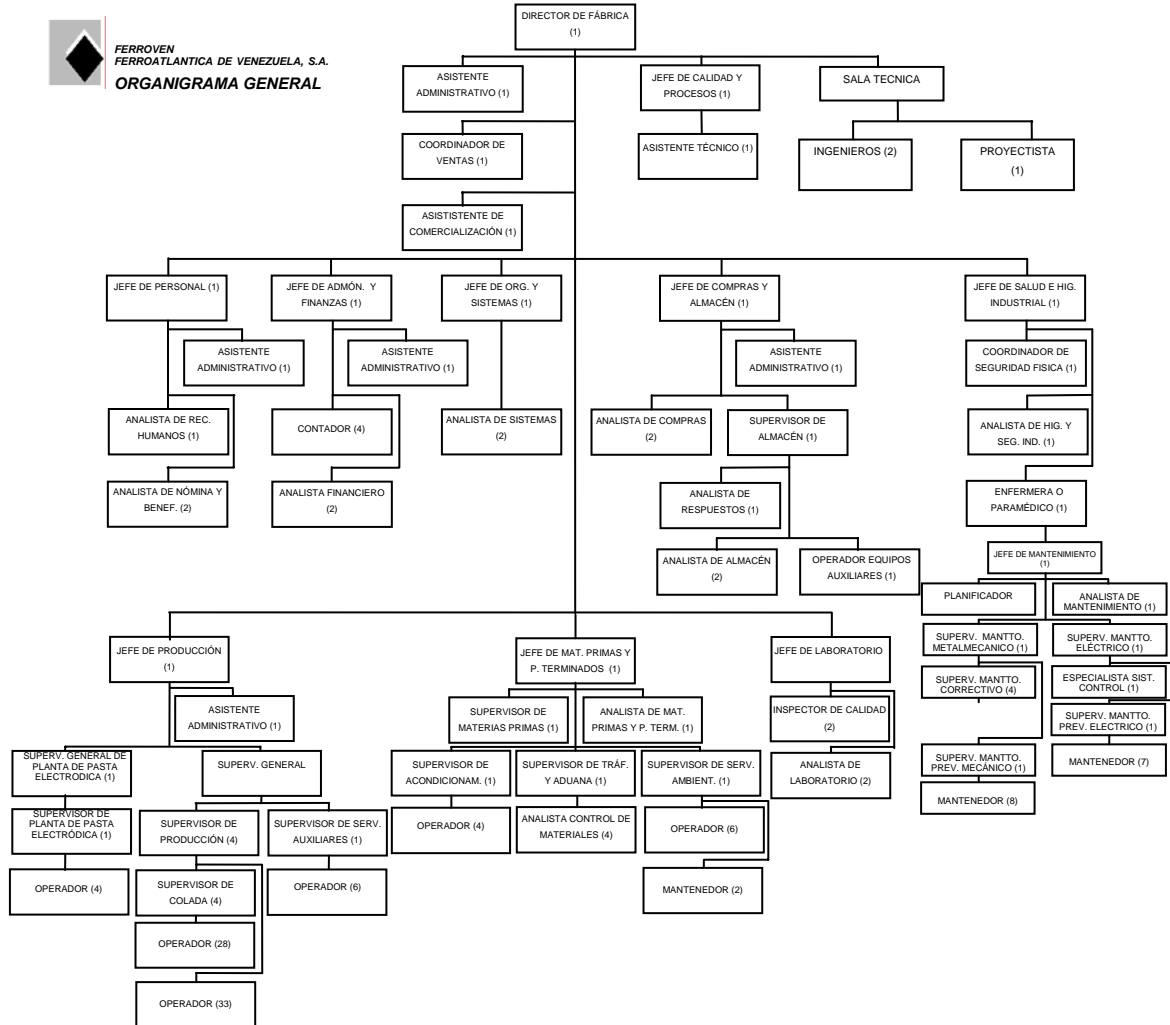
Figura 1.1 Ubicación Geográfica de Ferroatlántica de Venezuela, S.A.

### **1.1.3 Políticas**

Ferroatlántica de Venezuela S.A. tiene como política producir y comercializar ferrosilicio en sus diferentes grados de pureza, ferromanganeso, microsílíce, antracita calcinada y pasta electródica; según las exigencias de los clientes, atendiendo requerimientos de calidad, conservando el medio ambiente, contando para ello con trabajadores comprometidos con el proceso de mejoramiento continuo en materia de calidad y ambiente, previniendo en lo posible contaminación debido a los impactos ambientales por emisiones y efluentes, desechos, incidentes y explotación de recursos naturales, cumpliendo con la legislación y la regulación ambiental para asegurar la competitividad y estabilidad de la empresa en el mercado nacional e internacional.

### **1.1.4 Estructura organizativa**

Ferroatlántica de Venezuela S.A. se encuentra organizada desde el punto de vista de gerencias en administrativo y operativo. Está formada por una junta directiva, que tiene la finalidad de establecer los objetivos, evaluar y controlar decisiones tomadas, dictar reglamentos internos, proteger los activos y aprobar posibles cambios. También tiene un director de fabrica y un grupo de jefaturas que gestionan las actividades de las diferentes unidades organizativas que conforman la empresa FERROVEN, S.A. tiene una población laboral activa de aproximadamente 250 trabajadores, distribuidos entre las diferentes unidades organizativas de la empresa quedando estructurada de la siguiente manera (ver figura 1.2).



**Figura 1.2 Organigrama general de la empresa**

### 1.1.5 Proceso productivo

El proceso productivo de Ferroatántica de Venezuela S.A. radica en la producción de ferrosilicio, ferromanganeso y silicomanganeso; además de antracita calcinada y pasta electrodica la cual utilizan para la conformación de electrodos Söderberg, según normas internacionales y las exigencias de sus clientes.



### 1.1.5.1 Ferrosilicio (FeSi)

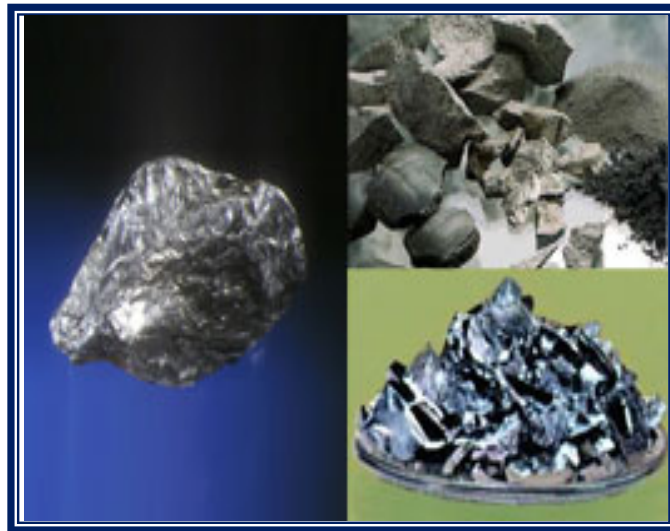
El producto principal de Ferroven S.A. es el ferrosilicio, una aleación de hierro y silicio producida en hornos eléctricos de reducción, por procesos carbo-térmicos de reducción de cuarzo ó cuarcita, usando como agente reductor carbón sólido en forma de coque reactivo, hulla ó carbón vegetal. Debido a su gran afinidad por el carbono y el oxígeno se utiliza principalmente en la producción de aceros como agente desoxidante y descarburizante, como agente reductor en los procesos silicio electro térmicos, para refinar ferroaleaciones con alto contenido de carbono, como elemento aleante en la fabricación de aceros especiales con alto contenido de silicio especialmente para la industria de los transformadores. El ferrosilicio es una aleación que puede ser producida de acuerdo al tenor del silicio deseado. Entre los principales se encuentran el FeSi 75%, FeSi 86%. La producción de ferrosilicio de Ferroven S.A. está distribuida en un 10% para el mercado nacional y un 90% para el mercado internacional. Su producción mayormente es exportada a Estados Unidos, Canadá, México, Trinidad, Perú y la Unión Europea.



**Figura 1.3 Ferrosilicio**

### 1.1.5.2 Ferromanganeso (FeMn)

El ferromanganeso es una aleación de hierro y manganeso, producida en el IV horno de reducción de arco eléctrico sumergido de Ferrovén S.A. Este se produce a partir de coque metalúrgico, traído de Colombia; minerales de manganeso tales como el Carajás proveniente de Sudáfrica y Brasil; y la caliza. El principal producto obtenido para la comercialización del ferromanganeso es el ferromanganeso 77%. El ferromanganeso es muy utilizado en la producción de prácticamente todo tipo de aceros y para la producción de hierro fundido, la aleación ferromanganeso se añade normalmente al acero para eliminar las burbujas de nitrógeno y reducir el óxido de hierro que se forma durante el proceso. El acero obtenido es duro, se pueden identificar los siguientes ferromanganesos: medio carbón nitrogenado de utilidad automotriz, bajo carbón es una aleación refinada muy dúctil, que otorga maquinabilidad al acero; medio carbón y alto carbón de aplicación especial.



**Figura 1.4 Ferromanganeso medio carbono**

### 1.1.5.3 Silicomanganeso (SiMn)

El horno IV de Ferroven S.A. tiene las características necesarias para producir tanto ferromanganeso como silicomanganeso 65%, usando como materia prima minerales de manganeso, la hulla y el coque metalúrgico como reductores, la escoria de FeSi y FeMn, la caliza para fluidificar y controlar la basicidad. El silicomanganeso sirve como sustitutivo del ferrosilicio y del ferromanganeso en las adiciones a los aceros, el silicio aporta el carácter desoxidante, y el manganeso el desulfurante.



**Figura 1.5 Silicomanganeso (SiMn)**

### 1.1.5.4 Microsilíce

Con el inicio de las operaciones de un sistema de control ambiental en Ferroven S.A. mediante la tecnología de los filtros para la depuración de humos generados durante la producción de ferrosilicio, se obtuvo a partir de éste un producto innovador con importantes aplicaciones en el campo de la industria petrolera, de agregados livianos, del cemento y del concreto de alta resistencia; producto conocido como Microsilíce (Silica Fume). Esta materia prima consiste en diminutas partículas de dióxido de silicio, las cuales son recolectadas por los filtros de humos de los hornos

dedicados a producir ferrosilicio o silicio metálico. El microsílíce, debido a sus características particulares, se puede utilizar como aditivo en mezclas para cementación de pozos, como aditivos en mezclas de concreto y como sustituto del cemento propiamente.



**Figura 1.6 Microsílíce**

En el caso de concretos de alto desempeño (High Performance Concret) permite lograr los requisitos especiales de alto desempeño, tales como: facilidad de colado y compactación, alta resistencia a edades tempranas, mejoramiento de las propiedades mecánicas a largo plazo, estabilidad volumétrica y durabilidad en ambientes severos.

Adicionalmente, el uso del microsílíce mejora la resistencia a la abrasión, la resistencia a la corrosión, ya que reduce la permeabilidad, la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia al ataque químico, incluyendo ácidos, sulfatos y cloruros. Actualmente la empresa cuenta con instalaciones para el tratamiento de humos emitidos por sus tres hornos en la producción de ferrosilicio. Estas instalaciones permiten producir 14.300 toneladas métricas/año de microsílíce al capturar las emanaciones de los hornos. De los silos de producción, el microsílíce es empaquetado en bolsas “Big-Bags” de seiscientos cincuenta (650) kilogramos/cada una, las cuales son almacenadas en galpones para su posterior venta. Además puede ser vendido directamente en camiones (Bulk) o enviado a la peletizadora de donde

sale en forma de pellas. El producto está respaldado por tecnología de la empresa Elkem Asa de origen Noruego, la cual proyectó y suministro la planta de humos para Ferroven S.A.

#### **1.1.5.5 Antracita calcinada**

La producción de la antracita se realiza mediante calentamiento de la antracita en hornos eléctricos monofásicos cilíndricos; los cuales poseen mayor altura que diámetro. La granulometría óptima para desgasificar la antracita oscila entre 2 y 15 milímetros.



**Figura 1.7 Antracita Calcinada**

La calcinación de la antracita se realiza con el fin de reducir la cantidad de volátiles a cantidades inferiores a 0,5%; además de mejorar las propiedades físicas de la antracita como el aumento de la conductividad eléctrica. Se especifica una resistividad eléctrica entre 800 y 925  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ; incremento de la resistencia mecánica ya que debe ser físicamente resistente y con pocas grietas en los granos. La antracita calcinada producida en Ferroven S.A. es utilizada en mayor proporción para la elaboración de pasta electródica y en menor escala para la venta como producto final.

### 1.1.5.6 Pasta electródica

Ferroatlántica de Venezuela, S.A. (Ferroven, S.A.), inicio las operaciones de producción de antracita calcinada y pasta electródica en el año 2000, a fin de cubrir la necesidad de fabricar los electrodos de auto-cocción tipo Söderberg que integran los hornos de arco eléctrico sumergido, empleados por la empresa para la producción de ferroaleaciones. En la actualidad se produce antracita calcinada y pasta electródica no sólo para satisfacer las necesidades internas de la empresa, sino también para cubrir la demanda de estos productos por parte de las empresas de la región.

La pasta electródica cruda (figura 1.8) es utilizada como un insumo dentro del proceso de producción de ferrosilicio, ferromanganeso y silicomanganeso. Una vez que la pasta electródica entra en operación dentro de los hornos de reducción ocurre el proceso de cocción de la misma, transformándose en un sólido con excelentes propiedades mecánicas y eléctricas conocido con el nombre de electrodo Söderberg.



**Figura 1.8 Cilindros de pasta electródica tipo “A”**

La producción de pasta electródica está destinada en gran parte a satisfacer la demanda interna de los procesos que se llevan a cabo en la empresa Ferroven S.A. bien sea para conformar los electrodos de auto-cocción de los hornos de arco eléctrico

sumergido, para elaboración de tapones para sellar bocas de colada de los hornos ó como insumo para la preparación de mezcla tapa piquera; y otra parte para la venta a empresas de la región como producto terminado.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La pasta electrodica es una mezcla de antracita calcinada (diferentes granulometrías grueso-fino) y brea, la cual se emplea como materia prima para la conformación de electrodos Söderberg cuya función es conducir la corriente eléctrica hacia el horno de arco eléctrico sumergido donde se lleva a cabo el proceso de reducción de metales para elaborar diferentes ferroaleaciones.

La pasta electrodica debe cumplir con propiedades físicas y mecánicas que le permitan soportar las condiciones críticas del proceso, por lo que antes de entrar en operación son analizadas sus propiedades, para evaluar su comportamiento. Las propiedades mecánicas del electrodo están asociadas a la calidad de la materia prima (antracita y brea de alquitrán de hulla) y a la receta empleada para la elaboración de la pasta electrodica (relación material sólido/brea). La distribución granulométrica de la antracita calcinada debe ser la adecuada para alcanzar una óptima homogeneización de las partículas. De ser utilizada una pasta electrodica que no cumpla con las especificaciones de calidad preestablecidas, ocasionaría problemas operativos lo cual trae como consecuencia una disminución en la producción.

Mejorar la eficiencia de operación de la pasta electrodica una vez que pasa a conformar los electrodos Söderberg, en función de las propiedades físicas y mecánicas de dicha pasta, se hace una necesidad para la empresa ya que permitiría evaluar la relación existente entre la receta de sólidos agregado en la mezcla con la plasticidad y la resistencia mecánica. La pasta electrodica producida ha venido experimentando deformaciones físicas durante su almacenamiento, originando pérdidas económicas a la empresa, ya que no puede ser empleada directamente en el

proceso de conformación de electrodos; siendo necesaria la contratación de maquinaria y personal capacitado para fracturar la pasta deformada. Una vez fracturada la pasta una parte es reincorporada al proceso de elaboración de pasta electródica y en su mayor proporción es empleada en la conformación de electrodos de auto –cocción a partir de pasta picada. Esta práctica tiene sus riesgos, ya que existe mayor probabilidad que la sección del electrodo conformado con la pasta picada genere segregación de pasta, es decir, separación de las partículas más gruesas que conforman el agregado seco; además de filtraciones de pasta la cual desembocaría en el lecho o cuba del horno donde se encuentra contenida la ferroaleación líquida a una temperatura superior a los 2000°C, derramándose ésta a su vez en el área donde se encuentran ubicados los hornos, poniendo en riesgo de esta forma la vida de los trabajadores que se encuentran allí laborando. La segregación puede generar ruptura del electrodo, debido a baja resistencia mecánica y baja resistencia a los choques térmicos, produciendo un electrodo después de cocido con malas propiedades térmicas y mecánicas. La deformación de la pasta puede estar asociada al empleo de un aglomerante (brea de alquitrán) con punto de ablandamiento fuera de los estándares establecidos ó una distribución granulométrica en la mezcla de antracita calcinada que no permite alcanzar la máxima homogeneidad y compactación; además de no permitir una buena impregnación de la brea por parte de los sólidos.

Por tal motivo, el trabajo se basa en evaluar relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada de 50:50, 60:40, 70:30 y 80:20, respectivamente. Con el fin de examinar cuál de ellas proporciona a la pasta electródica cocida características o propiedades físicas y mecánicas estables y que cumplan con los parámetros de calidad establecidos por la jefatura de producción y demandadas por las condiciones a las cuales se lleva a cabo el proceso de producción de ferroaleaciones.



### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la pasta electrodica empleada en la conformación de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar físicamente la antracita calcinada a través de análisis diferencial y resistividad eléctrica.
2. Medir el punto de ablandamiento de la brea de alquitrán, usada como materia prima en la fabricación de pasta electrodica, a través de la norma ASTM D36-06.
3. Fabricar pasta electrodica con relaciones grueso/fino de antracita calcinada 50:50, 60:40, 70:30 y 80:20, respectivamente, según procedimiento de fabricación de pasta electrodica PFV-PRO021, y caracterizarlas físicamente en crudo a través de ensayos de densidad aparente y plasticidad.
4. Determinar la apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente y niveles de compresión y flexión, que presenta la pasta electrodica cocida mediante métodos estandarizados para materiales carbonosos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

Hernández, María (2008) relacionó el efecto que produce la pasta electrodica y arcilla sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la mezcla tapa piquera para un horno de aleaciones de manganeso, mediante el estudio de las relaciones de pasta electrodica y arcilla de 80:20; 70:30; 60:40 y 50:50, en función de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, y de los porcentajes en peso de la materia prima, determinados éstos a partir de caracterización granulométrica de la antracita calcinada y de la pasta electrodica, para establecer rangos de distribuciones usados en la preparación de las mezclas tapa piqueras. Mientras que la caracterización física de la arcilla se realizó a través de determinación de tamaños de grano, difractometría de rayos X y límites plásticos de Atterberg. La plasticidad va a depender del porcentaje de pasta electrodica y arcilla que se añada a la mezcla. Obteniendo que a medida que aumenta la plasticidad de la pasta electrodica, aumentan el contenido de brea y los niveles de compresión para todas las relaciones evaluadas y mejores resultados operativos con una relación pasta/arcilla de 70:30. <sup>[1]</sup>

González, Neglys E. (2008) evaluó la influencia de la plasticidad y grado de enfriamiento en la deformación de los bloques y cilindros de pasta electrodica producidos en Ferroven S.A. mediante el estudio de las condiciones pasadas y actuales de operación de planta de pasta, determinación del punto de ablandamiento de la brea para comprobar que cumplan los parámetros especificados en el certificado emitido por los proveedores. Así mismo evaluó el comportamiento de la curva de enfriamiento sobre el nivel de deformación; y el efecto de los niveles de plasticidad sobre el grado de deformación. Logrando observar que el punto de

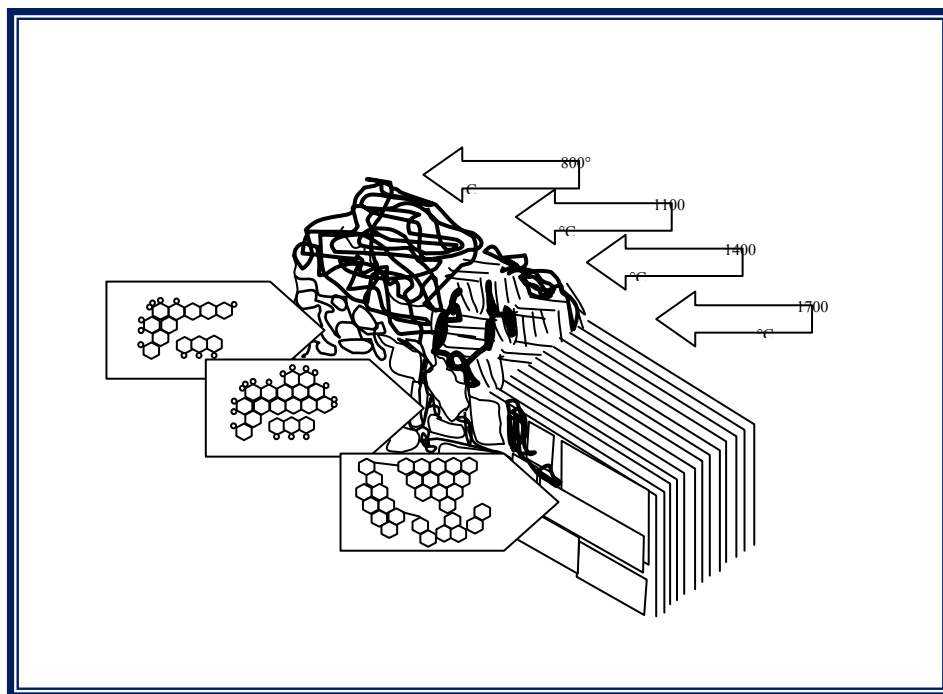
ablandamiento presentado por la brea no posee ningún efecto sobre el grado de deformación de la pasta electrodica, ya que éstos se encontraban dentro de los parámetros de calidad de Ferroven, S.A.; la velocidad de enfriamiento no influye en las deformaciones de los cilindros de pasta electrodica ya que durante el periodo de evaluación (60 días) no se observó ningún tipo de deformación en ellas. De igual manera concluyó, que la plasticidad tiene gran influencia en la deformación de la pasta ya que la mayoría de los cilindros deformados presentaron altas plasticidades y a medida que aumenta la plasticidad, aumenta la resistencia a la compresión, esto relacionado con el alto contenido de brea que poseía la pasta.<sup>[2]</sup> Sin embargo, los resultados obtenidos permiten inferir que el contenido de material fino presente en la mezcla de antracita calcinada va a influir en el grado de plasticidad.

## **2.2 Antracita**

La antracita es el carbón más rico en carbono y el más antiguo por su edad geológica. La proporción de carbono llega al 90% y correspondientemente son pequeñas las de hidrógeno y oxígeno. La antracita proviene de la descomposición de vegetales. Durante la era primaria los vegetales contenían principalmente carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, transformándose primeramente en humos. Entonces bajo la influencia de los depósitos sucesivos y la acción bacterial, una continua evolución y concentración de carbón toma lugar hasta producir turba.

El resto de la evolución implica, la eliminación de materiales volátiles, la formación de un carbón tostado a carbones bituminosos y finalmente a antracita. La antracita es el último estado de carbonización, por tanto ésta contiene un alto contenido de carbono y un bajo contenido de hidrógeno y materiales volátiles. En cuanto a su ambiente sedimentario, son estratos formando grandes cuencas alargadas, correspondientes a lagos y lagunas costeras, en zonas de lenta subsidencia. A menudo forman parte de una serie repetida alternada con arenisca y arcillas.<sup>[3]</sup>

La antracita es muy heterogénea y existe en varios grados de metamorfosis. La mayoría de las antracitas muestran una orientación preferencial en sus capas de carbón paralelas a los planos de deslizamientos. La fuerte apariencia anisotrópica de la antracita se debe a que las capas de carbón formadas son aproximadamente paralelas en la parte del material completo.<sup>[3]</sup> La anisotropía de los poros y/o la orientación preferencial de los planos de deslizamiento han sido probablemente, incluidas al desarrollo de esfuerzos cortantes durante las primeras eras geológicas. Los tratamientos térmicos inducen a un colapso parcial de los poros y la formación de regiones laminadas, como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1 Estructura del carbono en función de la temperatura de calcinación.** <sup>[3]</sup>

## **2.2.1 Propiedades físico - químicas de la antracita**

### **2.2.1.1 Propiedades físicas**

La antracita, es amorfa y de apariencia homogénea, con fractura concoidea y frágil; anisótropa para la luz reflejada. Dureza de 2 a 2,5. Densidad: 1,4 a 1,7. Color: negro azabache; presenta intenso lustre. Raya: negra. Brillo: Vítreo con tendencia a metaloide. Se enciende lentamente, no despidе humo, arde con una llama azul corta; posee alto poder calorífico y elevado punto de fusión para evitar su desintegración en el horno.

### **2.2.1.2 Propiedades químicas**

La antracita está constituida por carbono, hidrógeno, oxígeno y materias inertes. Se caracteriza por un alto contenido de carbono fijo: 86% mínimo; bajo contenido de materia volátil: 5% máximo; y bajo contenido de ceniza: 8% máximo. <sup>[3]</sup>

## **2.2.2 Tratamientos físico-químicos aplicados a la antracita**

La antracita cruda es sometida a una serie de tratamientos antes de entrar al proceso de fabricación de pasta electrodica; para aumentar en cierto grado sus riquezas: proceso que recibe el nombre de concentración o enriquecimiento de mineral. Estos tratamientos son:

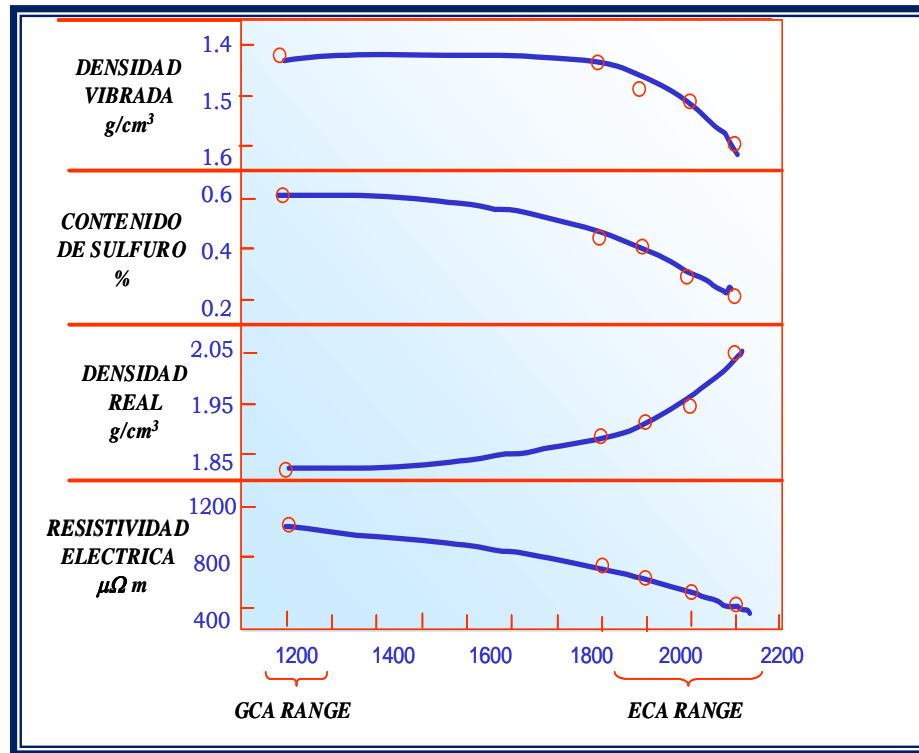
### **2.2.2.1 Tratamiento químico**

El tratamiento químico aplicado a la antracita es la calcinación, realizado con la finalidad de eliminar el contenido de humedad y de volátiles presentes en la antracita, de manera tal, de convertir la antracita en un material eléctricamente conductor, a fin de producir una pasta electrodica con calidad apropiada. En este proceso la distribución de temperaturas es heterogénea, en el eje del horno se

alcanzan temperaturas de hasta 2000°C, los granos que se calcinen a mayor temperatura tendrán mayor grado de grafitización, menos volátiles y serán más blandos. <sup>[4]</sup>

En términos generales, la calcinación consiste en un calentamiento progresivo en ausencia de oxígeno. La antracita puede ser calcinada de dos formas: la primera un tipo de calcinación a gas que consiste en someter a calentamiento en hornos de cuba ó rotatorios, en el que se queman los volátiles desprendidos de la antracita verde (antracita cruda). El producto de esta operación es un material homogéneo, duro y resistente a la abrasión. La segunda, es una calcinación eléctrica (AEC) producida al someter el mineral a calentamiento en hornos de cuba de electrodos opuestos en el que la propia carga conduce la corriente y se calienta por el efecto Joule. La finalidad de la calcinación de la antracita es incrementar la formación de la estructura grafitica y la dureza; así como también disminuir la resistividad eléctrica, contenido de volátiles y el índice de factibilidad (factibilidad de molienda). <sup>[4]</sup>

La antracita eléctricamente calcinada (AEC) presenta una estructura pre-orientada en menor grado que las de grafito, con un bajo contenido de humedad y volátiles (menor de 10%), que combinado con un alto contenido de carbón (mayor de 85%), simplifica la grafitización en el periodo de calcinación. La figura 2.2, muestra el efecto de la temperatura de calcinación de la antracita sobre algunas de sus propiedades. <sup>[7]</sup>



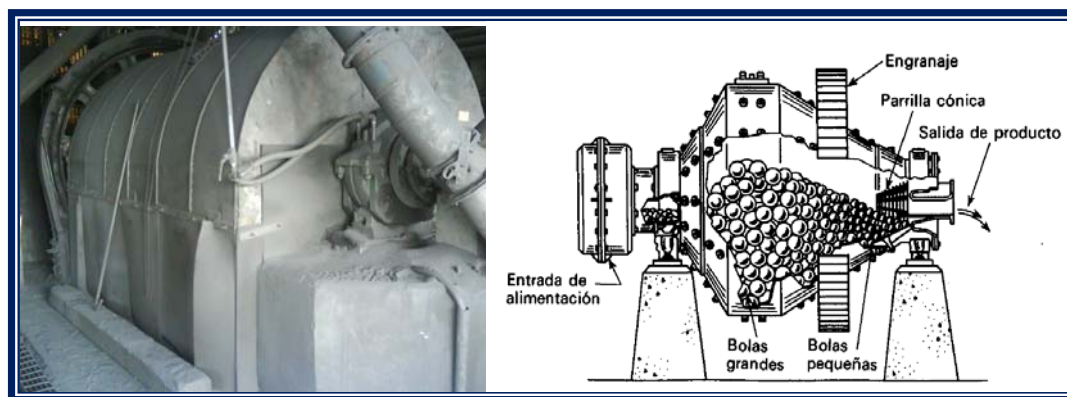
**Figura 2.2 Efecto de la temperatura de calcinación de la antracita sobre algunas propiedades**

### 2.2.2.2 Tratamiento físico

Comprende dos (2) operaciones principales molienda y clasificación granulométrica.

Molienda: la finalidad de esta operación es realizar la separación de los diferentes constituyentes mineralógicos del mineral y obtener para las diferentes partes la granulometría apropiada para cumplir con las condiciones del proceso, permitiendo la reducción del volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La molienda se ha empleado desde hace mucho tiempo en la preparación de alimentos y medicinas. La reducción de tamaño se aplica a todas las formas en la que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. Los sólidos se reducen de tamaño mediante diversos métodos. La compresión ó

trituration se usa para reducir sólidos duros a tamaños más o menos grandes. El impacto produce tamaños gruesos, medianos o finos, el desgaste o frotamiento produce materiales muy finos, el corte se usa para obtener tamaños prefijados. [5] La magnitud de la fuerza mecánica aplicada; su duración; el tipo de fuerza, tal como esfuerzo cortante e impacto; y otros factores afectan la eficiencia y alcance del proceso de reducción de tamaño. Los factores importantes del proceso de reducción de tamaño son la cantidad de energía o potencia consumida, el tamaño de las partículas y las superficies nuevas formadas. El equipo empleado en la molienda de antracita calcinada son molinos giratorios los cuales se utilizan para reducir el material a tamaños intermedios y finos. En este tipo de molinos, una coraza cilíndrica o cónica que gira sobre un eje horizontal, se carga con un medio de molienda, como bolas de acero, pedernal o porcelana. La reducción se lleva a cabo por acción del impacto y frotación de las bolas al girar el molino. En los molinos giratorios (figura 2.3), el medio gira pegado a las paredes de la coraza durante la rotación de ésta, hasta alcanzar una altura desde la cual caen sobre las partículas. Estos molinos operan en seco ó en húmedo. [5]



**Figura 2.3 Molino giratorio de bolas** <sup>[5]</sup>

Clasificación granulométrica: la clasificación granulométrica o clasificación según las dimensiones de los granos, se realiza siguiendo dos caminos diferentes: (1) Clasificación directa realizado por medio de cribas (trommel), tamices, parrillas, etc.



(2) Clasificación indirecta basado en que las velocidades de desplazamiento de partículas sólidas en un fluido (gas, líquido) dependen de la dimensión de los granos, de la masa volumínica y de la forma de las partículas. <sup>[4]</sup> La clasificación granulométrica de la antracita se realiza de manera directa a través de cribas y tamices según la granulometría que se desee. Para el proceso de producción de pasta electrodica se requiere de material grueso (todo uno) y fino.

**Material grueso (todo uno):** producto de Ferroatlántica de Venezuela, S.A. denominado todo uno, pues a partir de él se obtienen las partículas finas de antracita calcinada. Este material presenta un rango granulométrico entre 0,6 - 12,5 milímetros. <sup>[6]</sup>

**Material fino:** producto de Ferroatlántica de Venezuela, S.A. obtenido al someter a un proceso de molienda al material grueso, este material contiene partículas con tamaño menor a 0,5 milímetros. Cabe destacar que el material grueso aporta aproximadamente entre un 2 – 3 % de fino a la mezcla de antracita calcinada. <sup>[6]</sup>

**Mezcla de material (grueso + fino):** producto de Ferroatlántica de Venezuela, S.A. obtenido al combinar en los mezcladores (Mx) el material grueso y fino de antracita calcinada. Las partículas presentes en este material por lo tanto, presentaran una granulometría hasta 12,5mm <sup>[6]</sup>

### 2.3 Distribución granulométrica de partículas sólidas

Para la distribución de partículas en cuanto a su tamaño, se recurre al tamizado definido como un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. En el tamizado industrial los sólidos se sitúan sobre la superficie del tamiz. Los de menor tamaño, o finos, pasan a través del tamiz, mientras que los de mayor tamaño, o colas, no pasan. El material que se hace pasar a través de una serie de tamices de diferentes tamaños se separa en fracciones clasificadas por

tamaños, es decir, fracciones en las que se conocen los tamaños máximo y mínimo de las partículas. <sup>[5]</sup>

Este método permite conocer el tamaño de las partículas alimentadas en los procesos de producción. En el caso bajo estudio, permite conocer el tamaño de las partículas que componen el material grueso y fino de antracita calcinada empleado en la elaboración de pasta electrodica, así como también las cantidades de material correspondiente a los diferentes tamaños del material. Además es posible evaluar que se haya alimentado a los mezcladores la receta de agregado sólido establecida para la producción de dicha pasta. <sup>[5]</sup>

### **2.3.1 Análisis diferencial**

Las partículas sólidas son caracterizadas de acuerdo a su tamaño. La información obtenida durante el tamizado de los diferentes materiales de antracita calcinada (fino, grueso y mezcla), es decir, los datos arrojados durante el análisis del tamaño de las partículas se tabulan expresando los pesos de tamaño o de número en cada incremento de tamaño en función del tamaño medio de las partículas (o del intervalo de tamaños) en el incremento. Un análisis tabulado de esta forma recibe el nombre de **análisis diferencial**. Los resultados se presentan con frecuencia en un histograma, con una curva continua como la línea de trazos utilizada para aproximar la distribución. Una segunda forma de presentar la información es mediante un **análisis acumulativo**, que se obtiene sumando, consecutivamente, los incrementos individuales, comenzando con el que tiene las partículas más pequeñas, tabulando o representando las sumas acumulativas frente al diámetro máximo de las partículas en el incremento. En un análisis acumulativo los datos se pueden representar adecuadamente mediante una curva continua. <sup>[5]</sup>

## 2.4 Brea de alquitrán de hulla

La brea es el residuo de la pirolisis de un material orgánico o destilación de alquitranes, constituida por mezclas complejas de numerosos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y compuestos heterocíclicos, derivados del sometimiento a altas temperaturas del alquitrán durante destilaciones sucesivas, en la figura 2.4 se muestra un esquema de la obtención de brea de alquitrán de hulla como subproducto de la coquización. La brea de alquitrán es entonces un material termoplástico en razón de su carácter de mezcla de productos químicamente afines y con gran dispersión de pesos moleculares. Los productos de bajo peso molecular actúan como plastificantes de los de alto peso molecular y la mezcla da lugar a un material visco-elástico en un amplio margen de temperatura. Las breas son pues, subproductos de procesos de conversión de carbones. Es decir, son productos de relativamente, poco valor añadido, que sin embargo son los precursores de productos con un gran valor añadido como son los materiales de carbón. Su comportamiento se aproxima a un líquido Newtoniano hasta temperaturas por encima de 200°C. Es decir, el flujo o deformación que experimenta ante la aplicación de una fuerza, es proporcional a la fuerza y permanece constante mientras la fuerza actúa.<sup>[7]</sup>

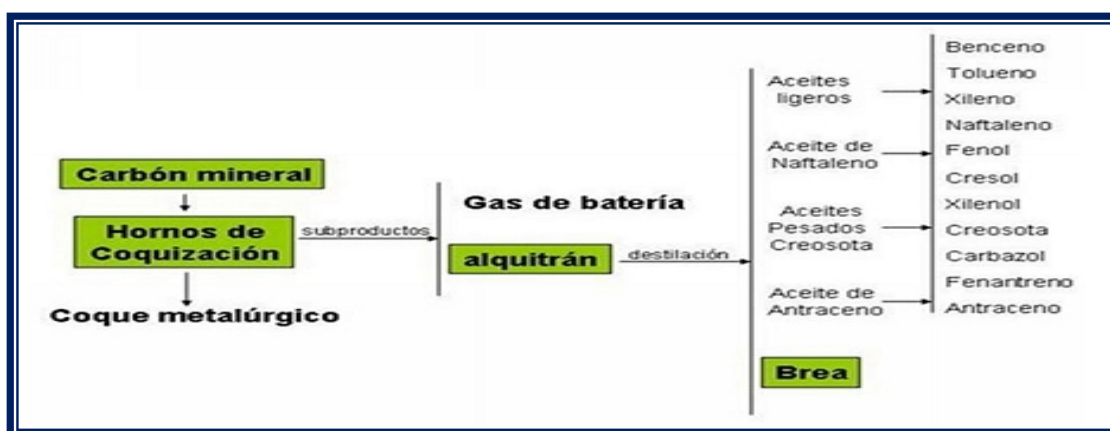
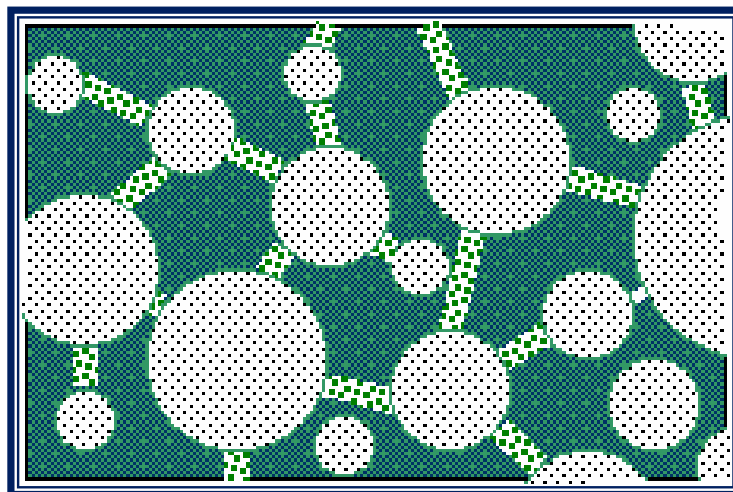


Figura 2.4 Esquema de la obtención de brea de alquitrán de hulla como subproducto de la coquización <sup>[7]</sup>

La brea de alquitrán tiene como función básica aglomerar las partículas del agregado seco (antracitas de diferentes tamaños de granos), como se muestra en la figura 2.5; al añadir la brea, ésta se adhiere a los granos finos de la antracita formando una pasta la cual llena los intersticios entre los granos gruesos de antracita, enlazándolos unos con otros.<sup>[8]</sup> Entre los factores que afectan la calidad de la brea de alquitrán se encuentran: el tratamiento térmico, las condiciones de destilación, temperatura de destilación y la naturaleza del carbón mineral.<sup>[7]</sup>



**Figura 2.5** Partículas del agregado seco aglutinadas con brea de alquitrán

## **2.4.1 Propiedades físico – químicas de la brea de alquitrán**

### **2.4.1.1 Propiedades físicas**

Sólida a temperatura ambiente, presenta un intervalo de ablandamiento entre 60 – 70°C (para la fabricación de pasta electrodica) la más baja necesaria para que la mezcla no se endurezca durante el tiempo que transcurre desde que es sacada de los mezcladores hasta que es usada en la compactación del electrodo, cuando se enfría el fundido las breas solidifican sin cristalización, densidad específica (1,25 g/ml), baja

viscosidad, alta resistencia a la oxidación y el punto de ebullición de los hidrocarburos presentes en la brea está entre 340 y 550°C.<sup>[7]</sup>

#### **2.4.1.2 Propiedades químicas**

La brea de alquitrán está constituida por una mezcla compleja de hidrocarburos de las siguientes clases; hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (alquil sustituidos, con el grupo ciclopentadieno, parcialmente hidrogenados, heterosustituidos, con grupos carbonilo, etc.), oligoarilos y oligoarilmetanos, compuestos policíclicos heteroaromáticos (benzólogos de pirrol, furano, tiofeno y piridina). Los HAP constituyen el grupo de compuestos más abundantes en la brea; según su estructura, pueden clasificarse en: cata-condensados que presentan átomos de carbono terciario comunes, como máximo, a dos anillos aromáticos, y los peri-condensados, algún átomo de carbono terciario perteneciente a tres unidades aromáticas. La brea presenta además un contenido de carbono fijo de 47% aproximadamente, insolubles en quinoleína/antraceno de 8%, insolubles en tolueno 26%, valor de coque (40-60) y bajo contenido de cenizas. Los porcentajes que poseen los elementos que componen la brea son: carbono (93%), hidrógeno (4,5%), oxígeno (1,5 a 3%), nitrógeno (0,6 a 0,9 %) y azufre (0,4 a 1 %).<sup>[7]</sup>

#### **2.5 Punto de ablandamiento o reblandecimiento**

Se define como punto de ablandamiento ó reblandecimiento la temperatura a la cual la brea cambia de un sólido quebradizo a un fluido más o menos viscoso. Este puede variar entre 30° – 180°C. El punto de ablandamiento necesario para la fabricación de pasta electrodica es función de la temperatura de amasado, del tipo de amasadora, y de la temperatura de utilización. La fluidez de la pasta en el electrodo se reduce al aumentar el punto de reblandecimiento. El punto de ablandamiento aumenta proporcionalmente con el contenido de insolubles en benceno.<sup>[2]</sup> El aumento del

punto de reblandecimiento trae consigo los siguientes cambios, que no se producen en breas tratadas térmicamente:

- Aumento pequeño de los insolubles en quinoleína.
- Aumento de las resinas.
- Aumento del carbón fijo, alrededor de 0,2% por cada °C.
- Disminuye ligeramente la necesidad de brea.
- Aumenta la estabilidad térmica.
- Disminuye el consumo de electrodo.

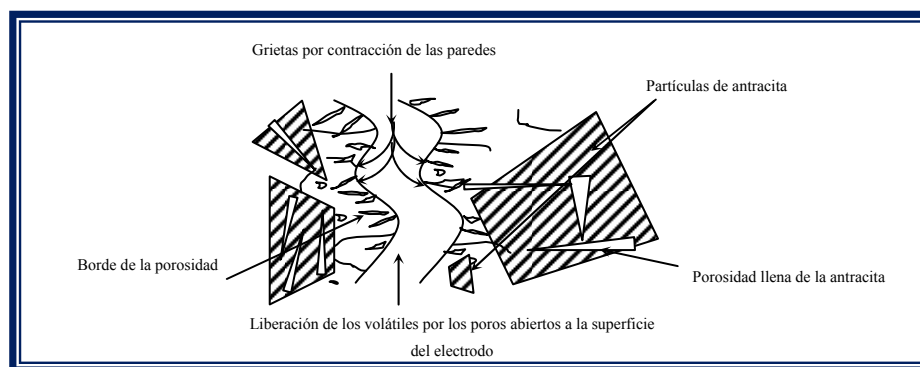
Para determinar el punto de ablandamiento a la brea se han desarrollado varios métodos empíricos: Kramer and Sarnow (KS), anillo y bola (RB), cubo en aire (C in A) y cubo en agua (C in W). La equivalencia de los resultados de estos ensayos sólo es aproximada.

## **2.6 PASTA ELECTRÓDICA**

La pasta electródica básicamente consiste de un compuesto carbonoso (antracita y brea de alquitrán de bajo punto de fusión). La pasta cruda (pasta verde) es utilizada como insumo dentro del proceso de producción de ferroaleaciones, para la conformación de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg; el cual consiste en una envoltura de acero rellena con pasta electródica cruda. La función de los electrodos que forman parte de los hornos eléctricos de arco sumergido es conducir la corriente eléctrica que se requiere para la reducción del mineral empleado en la fabricación de ferroaleaciones. También es utilizada como materia prima en la elaboración de mezclas tapa piqueras y mezcla para construir los canales de colada de los hornos de producción de ferroaleaciones.<sup>[7]</sup>

La pasta electródica experimenta una serie de fenómenos, algunos de los cuales se distribuyen a lo largo de la curva de calentamiento, se producen pérdidas de masa,

transferencia de calor, pirolisis, coquificación, contracción, dilatación, además de procesos de reordenamiento molecular con las consecuencias que esto implica sobre la densidad, anisotropía, resistencia mecánica y conductividad eléctrica en la pasta. Las transformaciones fisicoquímicas que ocurren durante la cocción, son experimentadas fundamentalmente por la brea de alquitrán, que forma parte de la mezcla electrodica, ya que la antracita carece de componentes que puedan experimentar transformaciones durante el proceso de cocción, la tasa de calentamiento y cocción de la pasta electrodica son factores críticos de su estructura y porosidad final; dependen de la velocidad de salida de sus volátiles. La salida de los gases de la pasta durante la cocción puede generar canales o vías de escape, ver figura 2.6, desde el interior hacia el exterior de la superficie del electrodo generando grietas que desmejoran la eficiencia del electrodo. El estado líquido de la mayoría de los aglutinantes (basada en brea de alquitrán) se extiende hasta 500 °C, por debajo de esta temperatura de solidificación ocurre usualmente un cierto grado de expansión en exceso o hinchamiento. El comportamiento de hinchamiento es causado por una acumulación de presión en los gases, vapores del aglomerante y productos de la pirolisis, retenidos dentro de la pasta. Fitzer descubrió una correlación entre el incremento de los cambios dimensionales a granel de los cuerpos de carbón verde y el aumento de los cambios dimensionales el cual es causado por la expansión durante el calentamiento. <sup>[9]</sup>



**Figura 2.6 Canales que generan la salida de los gases de la pasta durante la cocción.**

Alrededor de los 500 °C, la mayoría de los aglutinantes solidifican como matriz aglutinantes. En un calentamiento posterior en el rango de temperatura de 500° - 1000°C se evidencia una contracción debido a la carbonización, la cual es acompañada por la volatilización, deshidrogenación y ordenamiento estructural.

Una disminución fino/grueso en el agregado, el cual tiene un área superficial grande, requiere un incremento del contenido de aglomerante, lo cual provoca la contracción de la matriz aglutinante durante la cocción. Por otra parte, un aumento de partículas gruesas requerirá menor matriz aglutinante por unidad, reduciendo de ésta manera la contracción. El agregado grueso, por esto, actuaría como un reforzador de la pasta cocida y contrarresta la contracción de la matriz aglutinante, y deberá conferir a la pasta cierto grado de plasticidad a determinadas temperaturas. Este efecto contrarrestante aumenta con el alto contenido de partículas gruesas y el agregado seco puede compactarse mejor. Una contracción muy baja durante la cocción es experimentada con pastas que tienen una deficiente matriz aglutinante. Tales pastas a menudo tienen una tendencia de partículas resistentes a la compactación, desde aquí las fracciones de partículas gruesas forman rápidamente una red rígida de partículas de tres dimensiones, que reducen el efecto de enlace en la matriz aglutinante.

### **2.6.1 Tipos de pasta electródica**

Existen diferentes tipos de pasta electródica, éstas se clasifican de acuerdo al grado de plasticidad que presenten, la cual va a depender directamente de la relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) y cantidad de brea empleada en su fabricación. En la tabla 2.1 se presenta los tipos de pasta electródica de acuerdo con el porcentaje de plasticidad que presente la pasta elaborada, según procedimiento de fabricación de pasta electródica PFV – PRO021. Cuando se requiere una plasticidad en un rango más ajustado se debe realizar una



medición previa del tiempo necesario para alcanzar el volumen de brea a utilizar, pues el tanque dosificador de brea de planta de pasta electrodica de Ferroven, S.A. no dispone de un dispositivo que permita conocer el flujo de brea/seg de manera precisa.<sup>[6]</sup>

**Tabla 2.1** Tipos de pasta electrodica según su plasticidad <sup>[6]</sup>

| Según la plasticidad    | %Fino de Antracita | % Gruesos de Antracita | % Brea |
|-------------------------|--------------------|------------------------|--------|
| Tipo A- + 20% - 40 %    | 30                 | 50                     | 20     |
| Tipo C- + 10% - 20 %    | 30                 | 53                     | 16     |
| Tipo D- + 8% - 10 % (*) | 30                 | 53                     | 16     |

### 2.6.2 Materia prima empleada en la fabricación de la pasta electrodica

Para la fabricación de pasta electrodica en las industrias metalúrgicas se utiliza entre otros materiales, en forma mayoritariamente el carbón antracita sometido a un proceso de calcinación eléctrica y brea de alquitrán de hulla.

### 2.7 Fabricación de pasta electrodica

Las tendencias en la fabricación de pasta electrodica va hacia la utilización de una relación grueso/fino de antracita eléctricamente calcinada (AEC) adecuada respecto a la cantidad de aglomerante empleada, de forma tal de mejorar la compactabilidad de la mezcla, disminuir el porcentaje de cambio lineal, mejorar las propiedades mecánicas, aumentando de esta manera el rango de la calidad del producto.

### 2.7.1 Proceso de fabricación de pasta electrónica

Tal como se muestra en la figura 2.7, la antracita calcinada es alimentada a la tolva principal (tolva 1) y de allí es enviada a través del elevador de cangilones a la cinta transportadora y luego el material es depositado en las tolvas de alimentación de los hornos de calcinación. La antracita proveniente de estos hornos va al silo principal de almacenamiento (silo 8) para su posterior adecuación y preparación. De aquí se descargan dos proporciones de las cuales, una va al silo 17 para seguidamente entrar al molino y obtener la fracción de antracita menor a 1,0mm (fina) que se almacena en el silo 16 y la otra es llevada hasta la criba donde se dispone de un cedazo para tomar la fracción de antracita menor a 12,5 mm (gruesa) y finalmente llevarlas al silo 14.

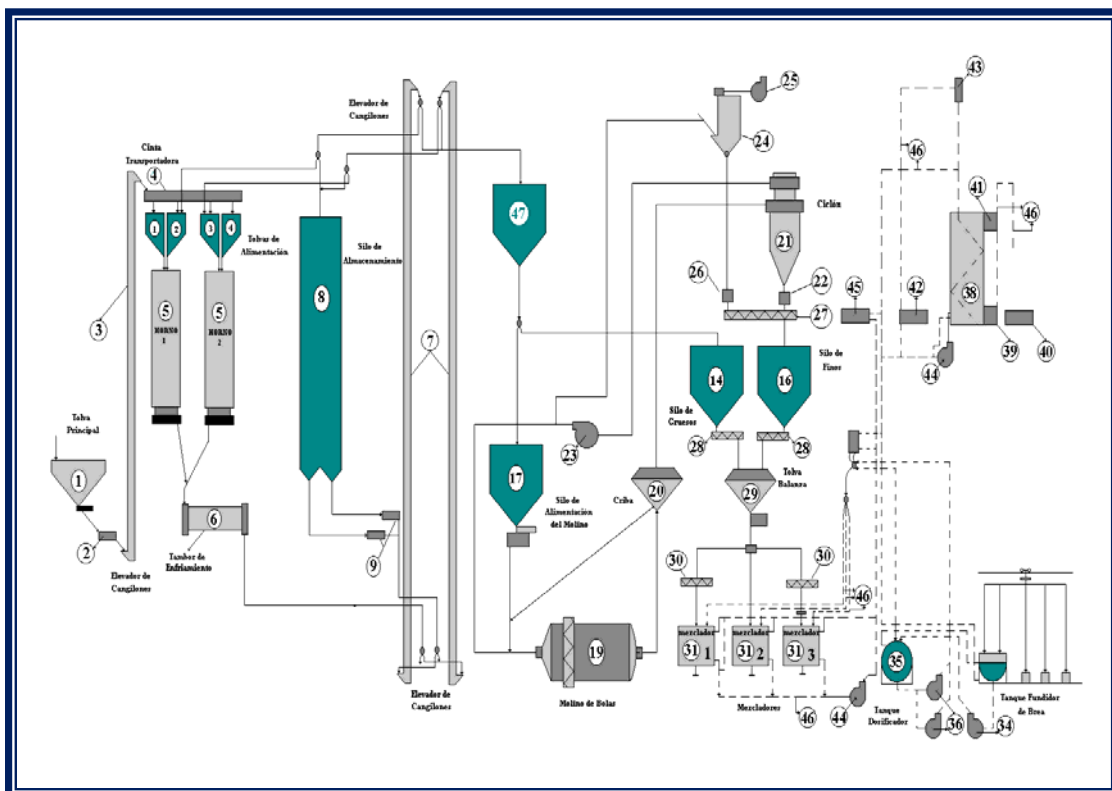


Figura 2.7 Diagrama de proceso de producción de pasta electrónica

**Leyenda:**

| <i>Equipo</i>  | <i>Descripción</i>                                      |
|----------------|---|
| 1              | Tolva principal   |
| 2,9,22,26      | Balanzas  |
| 3,7            | Elevador de cangilones                                  |
| 4              | Cinta transportadora                                    |
| 5              | Hornos de calcinación de antracita                      |
| 6              | Tambor de enfriamiento                                  |
| 8              | Silo de almacenamiento principal de antracita calcinada |
| 14             | Silo de material grueso de antracita calcinada          |
| 16             | Silo de material fino de antracita calcinada            |
| 17             | Silo de alimentación al molino                          |
| 19             | Molino de bolas   |
| 20             | Criba   |
| 21             | Ciclón  |
| 24             | Filtro  |
| 23,25,34,36,44 | Bombas  |
| 27,28,30       | Tornillo sin fin  |
| 29             | Tolva balanza   |
| 31,32,33       | Mezcladores   |
| 35             | Tanque dosificador de brea                              |
| 38             | Tanque de almacenamiento de brea                        |
| 47             | Silo de alimentación a silo 17 y 14                     |

De esta manera se obtienen las proporciones de antracita fina y gruesa necesarias para la producción de pasta electródica. Siendo la relación grueso/fino de antracita eléctricamente calcinada (AEC) una de las variables a controlar en el proceso. Seguidamente en las basculas electrónicas calibradas se pesarán las cantidades requeridas de antracita fina y gruesa ubicadas en los silos 16 y 14, respectivamente, de acuerdo con los cálculos previamente realizados se producen aproximadamente 2 toneladas de pasta electródica/colada, e ingresarán al mezclador para su homogeneización por espacio de 10 minutos. Superado éste tiempo se

agrega la cantidad necesaria de brea y se deja mezclar por espacio de 10 minutos adicionales. Debajo del mezclador, a la salida de la pasta caliente, se dispone de moldes cilíndricos de acero, luego pasan a un proceso de compactación; finalmente son enfriados y desmoldeados para ser llevados a la zona de almacenamiento.

## **2.7.2 Etapas fundamentales del proceso productivo**

Entre las etapas más importantes del proceso de producción de pasta electródica se encuentran: calcinación, molienda, acondicionamiento de la brea de alquitrán, pesaje y mezclado; descarga, moldeo y compactación; enfriamiento, desmoldeo y almacenamiento.

### **2.7.2.1 Calcinación**

Luego que la antracita cruda cae en los hornos eléctricos, se da inicio al proceso de calcinación, lo cual provoca una eliminación de casi la totalidad de la humedad y la materia volátil, convirtiéndose la antracita en un material eléctricamente conductor, siendo necesario mantener el horno completamente lleno para evitar caídas de la tensión eléctrica.

A continuación la antracita eléctricamente calcinada (AEC) es descargada en forma continua en ciclos de 4 minutos, las partículas de AEC son acarreadas por cuatro paletas fijadas a un disco giratorio, ubicada en el fondo del horno. La descarga por ciclo va de 25 - 43 Kg, y es ajustada por el operador del horno; sacando un poco la(s) paleta(s) hacia fuera del horno para acarrear menos material y disminuir la descarga. La cantidad de antracita descargada por ciclo varía de acuerdo a los parámetros de calidad que se desean obtener, éstos a su vez dependerán de la finalidad para la cual es calcinada la antracita, bien sea para producción de pasta electródica o para la venta de antracita calcinada como producto final. En este último caso los parámetros de calidad son más exigentes y se determina esta calidad

principalmente a través de la medición de la resistividad eléctrica, la cual se pretende sea lo más baja posible (máximo  $925 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ). Las especificaciones en cuanto a los parámetros de calidad que debe cumplir la antracita una vez calcinada se encuentran tabuladas en la tabla 2.2. La antracita proveniente de la descarga de los hornos se deja caer en un tambor de enfriamiento (intercambiador de calor) donde disminuye la temperatura de la antracita de  $370^\circ\text{C}$  a  $110^\circ\text{C}$ . Una vez que la antracita sale del tambor de enfriamiento cae directamente en una fosa donde el elevador de cangilones lo transporta al silo principal de almacenamiento (silo 8).

**Tabla 2.2** Especificaciones de calidad para la antracita calcinada.

| Parámetro              | Cantidad                                |
|------------------------|---|
| Humedad                | 0,10%                                   |
| Cenizas                | 8,5%                                    |
| Volátiles              | 0,50% máx.                              |
| Carbono fijo           | 90,8%                                   |
| Resistividad eléctrica | $925 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , máx. |
| Densidad real          | $1,9 \text{ g/cm}^3$                    |
| Densidad bulk          | $930 \text{ Kg/m}^3$                    |

### 2.7.2.2 Molienda

Esta operación consiste en la reducción del tamaño de las partículas de antracita una vez calcinada. Una parte del material almacenado en el silo 17 es alimentado al molino para obtener el material fino de antracita eléctricamente calcinada (AEC). El material es molido hasta obtener un polvo (material fino) con partículas de tamaño inferior a 1mm; este material es almacenado en el silo 16.

### 2.7.2.3 Fundición y circulación de brea

En esta etapa la brea de alquitrán es introducida en un tanque fundidor, en el cual la brea deja de ser un material sólido para adquirir un grado de fluidez, por efecto de la temperatura que alcanza dentro del tanque fundidor de brea. Una vez que

la brea adquiere la propiedad de fluidez, pasa a un tanque agitador de brea con la finalidad de eliminar cualquier burbuja formada y homogeneizar la brea. De allí es enviada a un tanque dosificador que alimenta a los mezcladores una vez que se requiera dentro del proceso.

#### **2.7.2.4 Pesaje de antracita eléctricamente calcinada (AEC) y mezclado**

La antracita se clasifica en dos tamaños grueso y fino, se acopian en los silos 14 y 16 respectivamente. La cantidad de polvillo (partículas de tamaño menor a 0,075 mm), generado durante la molienda tendrá una gran influencia en la calidad de la pasta producida, por lo que se busca un bajo contenido de éste en el material. El jefe de fabricación establece la relación grueso/fino de AEC a mezclar, y la cantidad de brea a introducir al proceso. En esta etapa una vez establecida la relación grueso/fino de AEC, se procede a pesar y depositar en los mezcladores las cantidades correspondientes de material grueso y fino de antracita calcinada. El proceso de mezclado del agregado seco se realiza con la finalidad de alcanzar la máxima homogeneización de las partículas; proceso cuya duración se aproxima a los 10 minutos. Seguidamente, se adiciona la brea y se mezcla por un período adicional 15 minutos.

#### **2.7.2.5 Descarga, moldeo y compactación**

Terminado el proceso de mezclado, la pasta obtenida es descargada de los mezcladores e introducida en moldes rectangulares y/o cilíndricos, los cuales son trasladados por montacargas a un vibrante hidráulico para garantizar una buena compactación de la pasta producida.

### **2.7.2.6 Enfriamiento, desmoldeo y almacenamiento**

Una vez compactada la pasta, ésta pasa a un sistema de enfriamiento y fraguado; conformado por duchas preparadas y dispuestas para tal fin. La pasta se deja reposar el tiempo que sea necesario (aproximadamente 4 horas). Una vez transcurrido ese tiempo, se desmoldea la pasta de forma manual, obteniéndose bloques y/o cilindros; que luego son transportados al patio de almacenamiento.

### **2.7.3 Factores que intervienen en la fabricación de la pasta electródica**

La pasta electródica después del calentamiento debe tener buenas propiedades físicas, las cuales son determinantes en la estabilidad y eficacia del electrodo durante la operación de reducción de metales. El parámetro más importante es la densidad aparente en verde ya que un alto valor de la misma conduce al mejoramiento de dichas propiedades, es decir, disminuye la resistividad eléctrica, aumenta las propiedades mecánicas, disminuye la porosidad y la reducción volumétrica durante el calentamiento, lo que se debe a que existan menos espacios vacíos dentro de la matriz (agregado seco/aglomerante) produciéndose una mayor continuidad del material y que a su vez es proporcional a la alta densidad aparente en verde.

### **2.7.4 Parámetros que afectan las propiedades físicas de la pasta electródica**

Entre los principales parámetros que ejercen gran influencia sobre las propiedades físicas de la pasta electródica se encuentran: la temperatura de calcinación, calidad de la brea de alquitrán y el grado de compactación de la pasta.

#### **2.7.4.1 Temperatura de calcinación de la antracita**

La dureza de la pasta compactada después del calentamiento aumenta, por lo que la resistividad eléctrica disminuye con el incremento de la temperatura de

calcinación de la antracita debido a que la estructura de ésta se cristaliza y se hace más unificada. Por otro lado la temperatura de calcinación contribuye a la disminución de la temperatura de ceniza, hierro, silicio y a su vez mejora la densidad real y la resistividad de la antracita calcinada.

#### **2.7.4.2 Calidad de la brea de alquitrán**

La calidad de la brea es de vital importancia debido a su composición compleja y a las transformaciones térmicas. Durante su producción se determinan las propiedades físicas de la pasta electrodica por lo que uno de los factores que afectan a la misma son los insolubles en quinoleína (grado de coquificación), la viscosidad y la temperatura de ablandamiento. Un alto o bajo contenido de insolubles en quinoleína produce una pasta electrodica con regiones altamente anisotrópicas sufriendo grandes encogimientos durante el calentamiento, conduciendo a un aumento de la porosidad y debilitamiento del enlace brea de alquitrán-agregado seco. La brea debe ser lo suficientemente viscosa a la temperatura de mezclado de la pasta electrodica con el fin de que todas las partículas del agregado seco sean mojadas. Si algunas de las partículas no son mojadas serán difíciles de aglomerar durante el calentamiento creando discontinuidades en la pasta electrodica afectando las propiedades físicas después del calentamiento.

#### **2.7.4.3 Grado de compactación**

Para tratar de garantizar que no se produzcan en la pasta después de compactada cambios de volúmenes excesivos (contracciones y expansiones), es recomendado utilizar un contenido de brea de alquitrán entre 13-14% aproximadamente. Otro factor importante es la densidad aparente en verde, para ello es necesario controlar los parámetros que influyen directamente en ésta,



como por ejemplo la presión de compactación y diseño del instrumento de compactación.<sup>[7]</sup>

## **2.8 Propiedades físicas y mecánicas de la pasta electródica**

Son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otro, desde el punto de vista del comportamiento mecánico de los materiales en ingeniería, también hay que tener en cuenta el comportamiento que puede tener un material en los diferentes procesos de mecanizados que pueda tener.

### **2.8.1 Densidad aparente**

Es la relación entre el volumen que se le supone (incluyendo los huecos o poros que pueda contener, aparente o no a simple vista) y su peso real. Este determina las dimensiones exactas del electrodo con una exactitud de 0,1 mm, con la cual se calcula el volumen.<sup>[13]</sup>

### **2.8.2 Plasticidad**

Es un modelo del comportamiento de los materiales con base en la presunción de que existe un esfuerzo de fluencia y que se puede desarrollar una deformación plástica o permanente cuando alcanza un esfuerzo cortante. La plasticidad de la pasta debe ser suficiente para que al calentarse, la pasta llene por completo el molde del electrodo y en dado caso de producirse grietas en el electrodo la pasta pueda llenar esos espacios. La cantidad de brea añadida debe ajustarse a las variaciones de las propiedades de los materiales secos. Cuanto mayor sea la proporción de finos, será necesaria una cantidad de brea mayor para obtener una pasta de la misma plasticidad. Las condiciones térmicas y de diseño del electrodo deben ser tenidas en cuenta. A mayor temperatura, conviene tener menor plasticidad, y a mayor diámetro, mayor plasticidad. Si la plasticidad es alta se puede aumentar el peso del fino y bajar el peso

del grueso o disminuir la cantidad de brea. De la misma manera, si la plasticidad es baja se aumenta el peso del sólido grueso y se baja el fino o se aumenta la cantidad de brea. <sup>[7]</sup>

### **2.8.3 Resistividad eléctrica**

La resistividad eléctrica de una sustancia, mide su capacidad para oponerse al flujo de carga eléctrica a través de ella. Un material con una resistividad eléctrica alta (conductividad eléctrica baja), es un aislante eléctrico y un material con una resistividad baja (conductividad alta) es un buen conductor eléctrico. Las medidas de resistividad eléctrica son habituales en las prospecciones geofísicas. Esta debe ser lo más baja posible, recomendándose que se mantenga entre  $800 - 925 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  para la antracita eléctricamente calcinada. <sup>[14]</sup>

### **2.8.4 Porosidad**

El estudio de la apertura de poros que presentan los materiales carbonosos se lleva a cabo a través de métodos hidrostáticos que permite determinar el volumen (en agua) de poros. <sup>[12]</sup> La apertura de poros es medida calculando la relación de la medición de la masa (volumen) de agua, que puede penetrar dentro de la muestra después de someterla a una presión de vacío, y la masa (volumen) de agua desplazado medido. La porosidad es desfavorable para la resistencia a la fractura (o módulo de rotura) por dos razones: (1) los poros reducen el área de la sección a través de la cual se aplica la carga, y (2) también actúa como concentradores de tensión. Estando asociado el volumen de poros con la resistencia a la rotura. <sup>[15]</sup>

### **2.8.5 Resistencia a la compresión**

Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad arbitraria. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión <sup>[15]</sup>.

### **2.8.6 Resistencia a la flexión**

Esfuerzo máximo de la fibra desarrollado en una probeta justo antes de que se agriete o se rompa en un ensayo de flexión. Se presenta la resistencia de fluencia de la flexión en lugar de la resistencia a la flexión para aquellos materiales que no se rompen en el ensayo de flexión. Sinónimo de módulo de rotura. La resistencia a la flexión describe la resistencia del material. <sup>[15]</sup>

## **2.9 Aplicación de la pasta electrodica**

En Ferroatlántica de Venezuela, S.A. se producen tres tipos de pasta electrodica:

### **2.9.1 Pasta electrodica tipo “A”**

La pasta electrodica tipo “A” (plasticidad entre 20 - 40%), se emplea principalmente en la conformación de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg, y en menor proporción para la elaboración de los conos que se emplean para tapar y/o

sellar las bocas de colada de los hornos de producción de ferrosilicio (hornos I, II y III).

### **2.9.2 Pasta electrodica tipo “C”**

Con plasticidad entre 10-20%, se emplea para fabricación de canalones, que son estructuras dispuestas en los canales de colada de los hornos de arco eléctricos sumergidos.

### **2.9.3 Pasta electrodica tipo “D”**

La pasta tipo “D” (plasticidad entre 8 – 12%) se fabrica como materia prima para la elaboración de masa refractaria para tapar bocas de coladas de los hornos de producción de aleaciones de manganeso (FeMn y SiMn). De éstas, la pasta electrodica es de suma importancia ya que la arcilla solo cumple funciones como medio de transporte dentro del ducto de la máquina usada para taponar las piqueras.<sup>[10]</sup>

## **2.10 Electrodo**

En los hornos de arco sumergidos los electrodos son los encargados de transmitir la corriente eléctrica a la carga y durante su funcionamiento alcanzar elevadas temperaturas, por lo que debe fabricarse de un buen material conductor de la electricidad y de elevado punto de fusión. Ellos generan el arco que salta al baño de la ferroaleación, acero líquido o metal líquido. Generalmente son de forma cilíndrica y está compuesto por una masa de carbón, ya que este material es buen conductor de la electricidad y tiene elevado punto de fusión. Al transmitir la corriente eléctrica a la carga del horno y durante su funcionamiento alcanzan elevadas temperaturas, por lo que deben refrigerarse.<sup>[10,11]</sup>

Las propiedades de un electrodo deben ser: elevada conductividad eléctrica, es decir, baja resistividad eléctrica; elevada resistencia mecánica y buena elasticidad, es decir, elevada resistencia a los choques térmicos. Estas características dependen directamente de la calidad y de la eficiencia del proceso de elaboración de la pasta electrodica y la materia prima con la que se elabora la misma. <sup>[16]</sup>

Los electrodos utilizados en los hornos eléctricos son los electrodos pre-cocidos ó de grafito y los electrodos de auto-cocción ó Söderberg. <sup>[10,11]</sup>

### **2.10.1 Electrodos pre-cocidos ó de grafito**

Los primeros hornos eléctricos utilizaron electrodos precocidos, sin embargo este tipo de electrodos tienen un elevado costo por lo cual su uso se reduce a la producción de aleaciones en las que el aporte de acero de la vólera del electrodo no puede ser tolerado, por ejemplo, en la producción de silicio metal. Su capacidad de transportar corriente está limitada por las pérdidas de energía por el efecto Joule, de manera que la temperatura de la superficie no llegara al límite umbral al cual se producía la oxidación por el aire del electrodo. El grafito es el componente básico utilizado en la fabricación de estos electrodos; siendo el grafito la forma amorfa del carbono. <sup>[10,13]</sup>

### **2.10.2 Electrodos de auto-cocción o Söderberg**

Los electrodos Söderberg son mucho más económicos de operar que los precocidos. Los primitivos hornos de fusión estaban equipados con electrodos de grafito o de carbón amorfo. Como el tamaño del electrodo depende de la capacidad de transportar la corriente, el máximo diámetro posible del electrodo limita el tamaño del horno a construir. Los hornos de fusión modernos están equipados con electrodos de auto-cocción, llamados Söderberg en honor a su inventor C.W. Söderberg y fueron patentados en 1919 por la empresa Electrokemisk A/S de Noruega. En la

actualidad su principio de funcionamiento se mantiene igual aunque se han hecho muchas mejoras a los equipos y partes que forman el electrodo además de trabajarse en el mejoramiento continuo de la pasta. Los principales procesos metalúrgicos que emplean electrodos Söderberg son: la fabricación de ferroaleaciones, la electrólisis ígnea del aluminio y la obtención del cobre por vía pirometalúrgica. Las exigencias de las características de funcionamiento de los electrodos son mayores en el horno de ferroaleaciones, ya que la temperatura, el tamaño de los electrodos y la corrosión que causan los gases producidos, son mayores en éstos. <sup>[10,11]</sup>

El electrodo Söderberg es el elemento que hace de cátodo en los hornos de arco eléctrico donde se lleva a cabo el proceso de reducción de minerales. Tal como muestra la figura 2.8, el electrodo de auto-cocción consiste en una envoltura de acero rellena de pasta electrodica, la cual se introduce por la parte superior y a su vez va sufriendo un proceso de cocción en su avance progresivo sobre la bóveda del horno. <sup>[10,11]</sup>

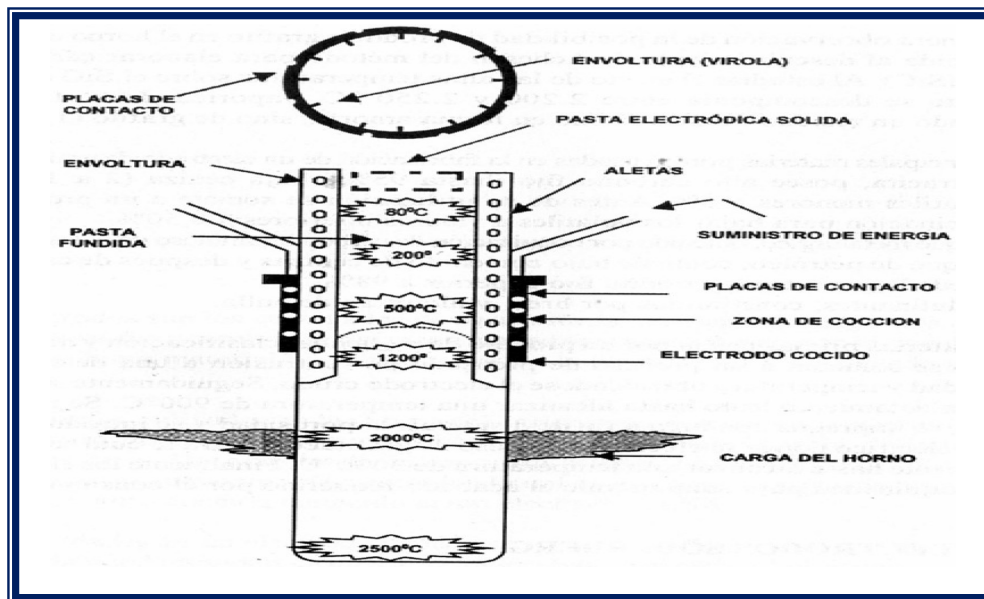


Figura 2.8 Electrodo Söderberg

### 2.10.2.1 Propiedades

Un buen electrodo debe contar con tres propiedades fundamentales: propiedades mecánicas, eléctricas, reológicas.

#### A. Propiedades mecánicas

Las características mecánicas del electrodo deben ser suficientes para soportar los esfuerzos a los cuales se ven sometidos en el interior del horno, ya que éstos pueden ser golpeados al momento de acomodar la carga dentro del mismo. Estas propiedades dependen de dos factores: <sup>[11]</sup>

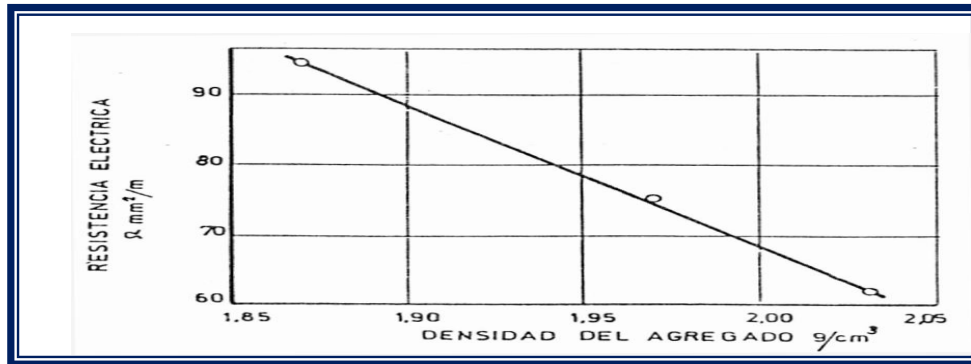
- Calidad de las materias primas: los mejores resultados se obtienen con coques de alta densidad real ó aparente (bulk), calcinados a altas temperaturas y breas de alta aromaticidad y densidad, con alto contenido de insolubles en antraceno y quinoleína, procedentes de alquitranes destilados a altas temperaturas y con tiempos largos de destilación.
- Composición de la pasta: la distribución granulométrica debe ser adecuada para obtener la máxima homogeneidad y compacidad, lo que provoca una alta densidad.

#### B. Propiedades eléctricas

El electrodo debe tener valores de resistividad eléctrica bajos, para así tener pocas pérdidas de energía y bajas caídas de tensión. Además, un valor alto de la resistividad eléctrica se corresponde con un valor alto del módulo de Young, y por lo tanto, una mayor rigidez del electrodo. La conductividad eléctrica del electrodo depende de: <sup>[11]</sup>

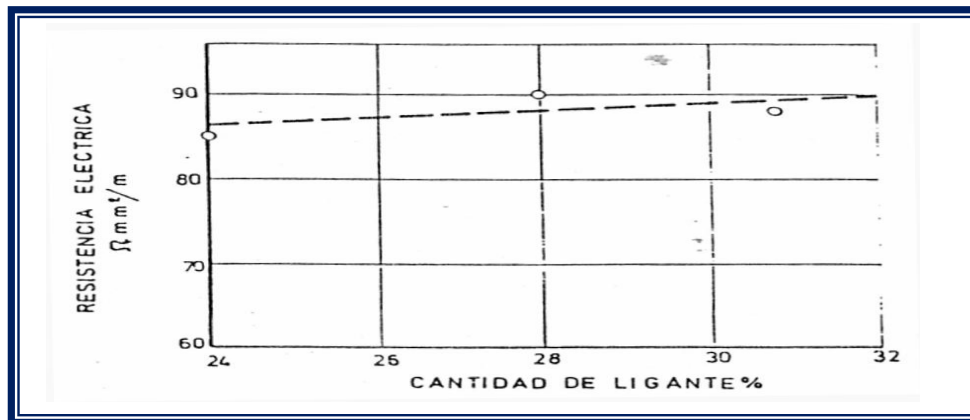
- Materia prima: la conductividad es mayor cuanto mayor sea la densidad real, la densidad aparente (bulk) y la temperatura de calcinación de los agregados secos. También es conveniente un bajo contenido de azufre. En lo que respecta a la brea, la conductividad eléctrica se relaciona con la aromaticidad, la densidad y

los insolubles en antraceno. La relación de la resistividad y la densidad del agregado se muestran en la figura 2.9.



**Figura 2.9 Densidad del agregado frente a la resistencia eléctrica.** <sup>[11]</sup>

- Composición de la pasta: es deseable una alta densidad, una buena impregnación de los sólidos por la brea y una proporción baja de brea. Esto se observa en la figura 2.10.



**Figura 2.10 Resistencia eléctrica frente a la cantidad de brea en la pasta.** <sup>[11]</sup>

- Proceso de cocción del electrodo: tal como se observa en la figura 2.11, los mejores valores de conductividad eléctrica, se obtendrán con temperaturas altas y tiempos largos de cocción.



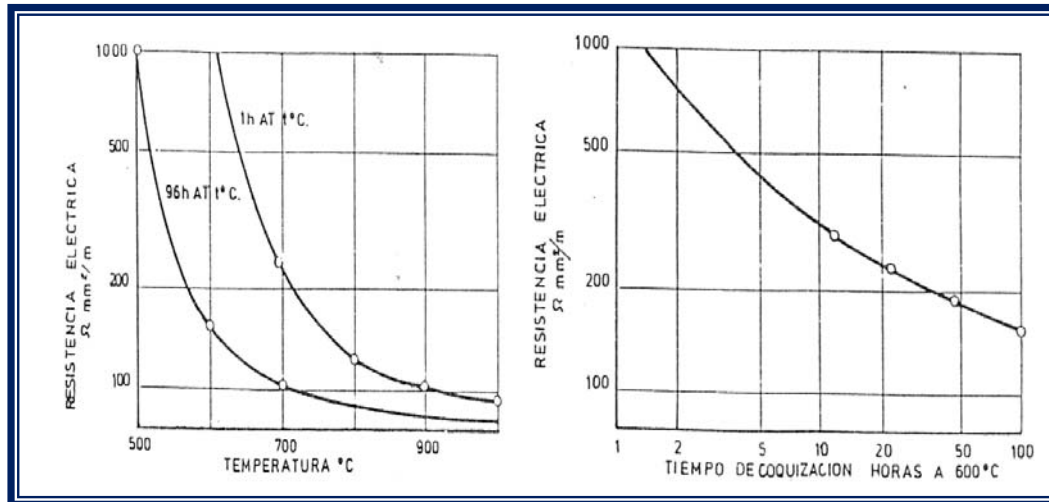


Figura 2.11 Resistencia eléctrica frente a temperatura y tiempo de coquización

### C. Propiedades reológicas (propiedad de flujo y deformación de la materia)

La fluidez de la pasta fundida debe ser suficiente para facilitar el desplazamiento relativo de la pasta con respecto a la virola, rellenar las grietas y fisuras que pudieran producirse y no producir segregación, es decir, separación entre las partículas debido a su tamaño. Al igual se busca que no se generen filtraciones fuera del electrodo. La fluidez de la pasta cruda la determina el exceso de ligante, una vez llenados los poros abiertos de los agregados sólidos y los espacios entre las partículas. Las propiedades de la materia prima que influyen sobre las propiedades reológicas son: <sup>[11]</sup>

- Propiedad del agregado seco: la densidad real y aparente (bulk) tienen gran influencia, pues cuanto mayor sea la densidad se necesitará menor cantidad de brea para obtener la misma fluidez. Así mismo, mientras mayor sea la proporción de finos se precisará mayor cantidad de brea para obtener la misma fluidez, ya que la superficie es mayor y por lo tanto quedará menos ligante libre.
- Propiedad de la brea: poder de impregnación ó mojabilidad, favorece la unión del aglomerante a los sólidos, perjudicando la fluidez. De igual manera, cuanto mayor sea en contenido de resinas ligeras mayor fluidez presentará la pasta.

- Proceso de amasado: las amasadoras (mezcladores de paleta de carga discontinua) dan pastas de menor fluidez que las de tipo continuo, para una misma adición de brea. La fluidez de la pasta cruda es menor cuanto mayor sea el tiempo de amasado. A temperaturas de amasado altas corresponderá mayor fluidez en la pasta cruda.

### **2.10.2.2 Principio de funcionamiento**

La función del electrodo es conducir la corriente eléctrica hacia el horno. Es por ello que del óptimo funcionamiento de los electrodos dependerá el rendimiento del proceso de reducción para obtener la ferroaleación deseada. Durante la operación la pasta electródica se transforma en un sólido con buenas propiedades eléctricas y mecánicas. El electrodo Söderberg se caracteriza por partir de una pasta cruda, la cual inicia el proceso de cocción una vez que es ingresada a la columna o envoltura del electrodo. La pasta debe cargarse diariamente por ser éste un proceso de carga continua, y los deslizamientos del electrodo deben ejecutarse en pequeños intervalos.<sup>[11]</sup>

En un horno de reducción abierto, la coquización de la pasta se lleva a cabo a lo largo de la zona de placas. La energía generada por las pérdidas debidas a la resistencia óhmica, es suficiente para producir la cocción. En la tabla 2.3, se establecen los porcentajes de energía generados y requeridos por un electrodo Söderberg de 1,550 m de diámetro.

**Tabla 2.3** Balance de energía para un electrodo Söderberg

| Entradas de calor                                     | %   | Salidas de calor   | %   |
|---|-----|--|-----|
| Energía generada por resistencia óhmica               | 94  | Calor empleado en la cocción de la pasta                   | 5   |
| Calor conducido por la virola hacia la parte superior | 6   | Pérdida de calor por la parte superior                     | 8   |
|   |     | Calor absorbido por el agua de refrigeración de las placas | 87  |
| Total   | 100 | Total  | 100 |

La cocción del electrodo Söderberg se puede dividir en zonas: <sup>[11]</sup>

**Zona 1** ( $T \leq 200^{\circ}\text{C}$ ): en este sector del electrodo (sobre el nivel superior de las placas de contacto) la pasta empieza a alcanzar su temperatura de fusión por lo que empieza a distribuirse en la envoltura. Esta es la zona más fluida del electrodo, por encontrarse a temperaturas por encima del punto de ablandamiento de la brea. Los fenómenos más importantes que ocurren a estas temperaturas son la evaporación de las sustancias volátiles del aglutinante (brea) y la condensación de sustancias volátiles que ascienden de las zonas más bajas y calientes.

**Zona 2** ( $T = 200^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ ): actúa como una columna de destilación para las sustancias que se volatilizaron en la zona inferior (zona 3). En esta zona es muy importante el grado de fluidez que presente la pasta, pues debe ser suficiente para permitir realizar deslizamientos suaves y uniformes de la pasta en el interior de la virola y llenar los intersticios que se formen. En caso de que la pasta presente un elevado grado de plasticidad, puede generar derrames sobre el lecho del horno.

**Zona 3** ( $T = 350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ ): ubicada a la altura de las placas de contacto, en la cual la corriente pasa al electrodo a través de aletas y el calor transforma la pasta en un conductor eléctrico. En esta zona el electrodo ya es pobre en aglomerante, ya que en ésta se produce la pérdida de las sustancias volátiles. Los volátiles salen por la parte inferior de las placas de contacto ó craquean en carbono e hidrógeno, o bien se

desplazan, una parte asciende a la zona inmediata superior y la otra por goteo va hacia la parte inferior que se encuentra solidificada.

**Zona 4** ( $T$  450°C - 500°C): ubicada entre las placas de contacto y la superficie de la mezcla, la temperatura aumenta provocando la fusión de la envoltura. La pasta solidifica en un rango de temperatura relativamente estrecho. La coquización del agente aglomerante provoca que la resistividad eléctrica disminuya significativamente. La porosidad que se genere en esta zona dependerá de la capacidad de penetración del aglomerante, que a su vez será función del gradiente de temperatura, siendo controlado por el grado de coquización que presente la brea y de la forma de los intersticios producidos.

**Zona 5** ( $T > 500^\circ\text{C}$ ): en esta zona las temperaturas alcanzadas son suficientes para provocar la fusión de la envoltura y por ende la cocción de la pasta, lo que conlleva a la modificación de la estructura de la masa coquizada (grafitización), que mejora aun más la conductividad eléctrica. En la figura 2.12, se observan las zonas de temperatura que se generan en el interior de un electrodo Söderberg, como lo indican Amesen y colaboradores.

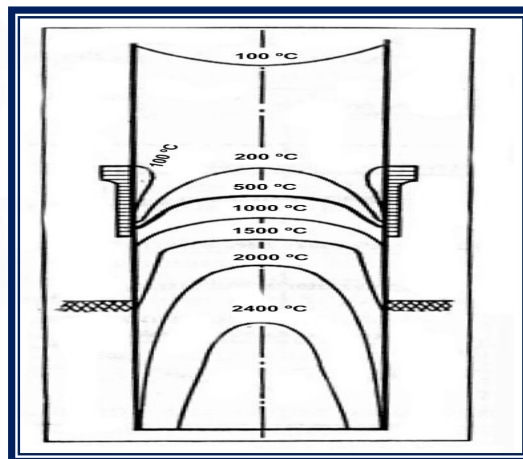


Figura 2.12 Distribución de la temperatura en un electrodo para FeSi de 1.550 mm de diámetro.<sup>[10]</sup>

### 2.10.2.3 Columna ó virola del electrodo

La columna del electrodo Söderberg consiste en una serie de cilindros huecos de acero, generalmente de 1 a 2 m de longitud, estos cilindros llevan incorporados en su interior unas nervaduras ó costillas verticales, también de plancha de de acero. Los cilindros van soldándose uno encima de otro para formar un largo tubo de acero de aproximadamente 2 metros de altura.

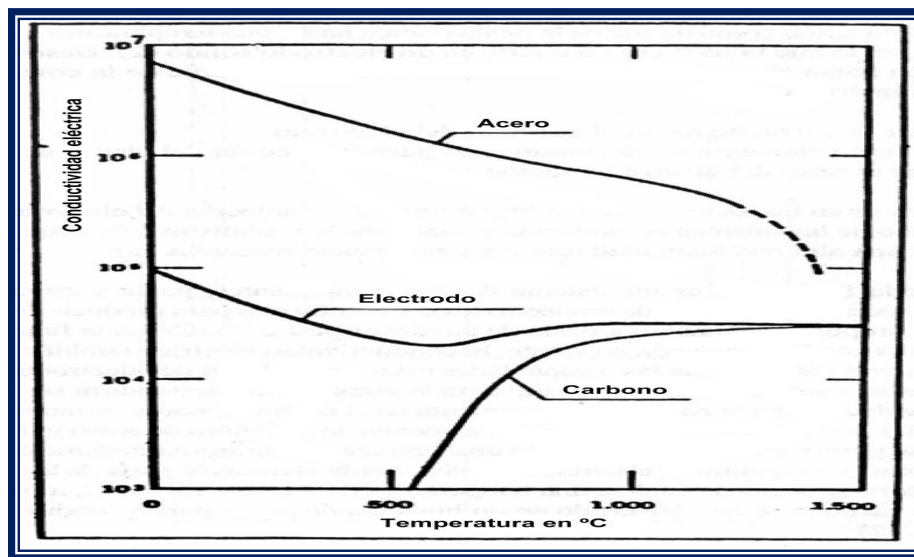
En los electrodos mayores a 1.500 mm de diámetro se suelda un refuerzo en la parte interior que tiene como función concentrar el calor hacia el centro del electrodo, obteniéndose una cocción uniforme del mismo; para este refuerzo generalmente se usa una barra de acero de 20 mm de diámetro o una lámina de sección equivalente. La envoltura actúa como molde de la pasta blanda hasta una temperatura alrededor de 500°C, temperatura a la cual la pasta se convierte en un electrodo sólido. Desde la zona de cocción hacia abajo; las aletas son la parte más importante de la envoltura ya que sus funciones son conducir la corriente hacia el carbono del electrodo, actuar como elemento de calentamiento para la cocción del electrodo y soportar el peso del electrodo cocido.<sup>[17]</sup>

Las aberturas en las aletas son las que se encargan de mantener sujeto al electrodo cocido y el tamaño de las mismas en dirección radial debe ser relativamente pequeño para mantener una alta conductividad térmica y resistencia mecánica.<sup>[18]</sup>

En los electrodos de 1.550 mm de diámetro, generalmente las secciones de las envolturas se fabrican con láminas de acero de 2,50 mm de espesor y 2400 mm de largo, 300 mm de ancho. Las aletas llevan aberturas rectangulares de 135 mm de alto por 50 mm de ancho, ubicadas en el centro de la aleta a una distancia entre aberturas rectangulares de 135 mm de alto por 50 mm de ancho. Es muy importante que la soldadura entre secciones de envolturas y entre aletas se efectúe de manera correcta y

que las aletas sean más largas en 300 ó 400 mm que la sección de envoltura a fin de que se superpongan a las aletas de más abajo.

En cuanto a la sección transversal del electrodo tiene una proporción de acero a pasta de alrededor de 1:75. Como la finalidad del electrodo es conducir elevada corriente, la conductividad eléctrica también debe ser elevada, siendo ésta una de las propiedades más importantes del electrodo. Ambos materiales se complementan, es decir, cuando aumenta la temperatura se reduce la conductividad eléctrica en el acero y aumenta en el carbono, como se muestra en la figura 2.13.



**Figura 2.13 Conductividad eléctrica del electrodo contra temperatura en base a una composición de carbono y acero. <sup>[10]</sup>**

Para la relación acero pasta mencionada, la envoltura de acero y el material de carbono poseen igual conductividad a una temperatura de aproximadamente 750°C. Al aumentar la temperatura, el carbono conduce cada vez mayor parte de la corriente. La envoltura de acero se funde a una temperatura de 1.200° a 1.400°C, momento en el cual el carbono se ha convertido en un buen conductor y puede conducir solo la corriente.

Tal como se muestra en la figura 2.14, el cilindro de acero es sujetado por los dispositivos de sostenimiento y deslizamiento, situados en un armazón cerca del extremo superior del electrodo. <sup>[11]</sup> Los sistemas de ejecución del electrodo están conectados a un regulador que controla automáticamente el movimiento vertical de la columna del electrodo, para adaptar su posición a la necesidad de la carga.

El movimiento vertical del electrodo puede realizarse mediante un soporte electromecánico, unido al armazón, o bien mediante un par de cilindros hidráulicos situados debajo del armazón. En los hornos modernos de alta potencia, con electrodos grandes y pesados, el sostenimiento hidráulico se ve favorecido por el ahorro del espacio, y por el hecho de que el peso de la columna del electrodo descansa sobre un piso inferior del edificio del horno. Durante el trabajo del horno, la punta del electrodo va consumiéndose debido a la resistividad del carbono en el proceso metalúrgico. Para mantener la longitud del electrodo, el molde es deslizado hacia abajo sin suspender el suministro de corriente. Según avanza el deslizamiento, la pasta descende hacia su zona de cocción y nuevas secciones del molde se sueldan en la parte superior del electrodo, siempre manteniendo la corriente.



**Figura 2. 14** Envoltura de un electrodo de auto-cocción, mostrando sus aletas de acero

#### 2.10.2.4 Roturas del electrodo

Existen dos tipos de roturas de electrodos <sup>[10]</sup>

- Las que se producen en la zona de cocción del electrodo.
- Las que se producen cuando el electrodo esta cocido.

##### A. Roturas en la zona de cocción

Este tipo de rotura se produce cuando en la zona de cocción ocurre rotura de la envoltura debido a fusión de la lámina de acero por recalentamiento causado por mal contacto entre la placa de contacto y la envoltura o por mala soldadura al fabricar la envoltura o al realizar el empalme entre ellas.<sup>[10]</sup> También ocurren estas roturas cuando la zona de cocción sale de las placas de contacto y la cantidad de corriente eléctrica que circula en ese momento por el electrodo es mayor que la cantidad que soporta la envoltura.

##### B. Rotura del electrodo cocido

Existen diferentes causas que pueden originar una rotura de electrodo, así tenemos que la segregación de pasta es causa común de rotura de electrodo debido a baja resistencia mecánica y baja resistencia a los cambios térmicos. Durante el proceso de cocción de la pasta, la brea coquiza con formación de carbono sólido y desprendimiento de volátiles, los cuales deben salir por la parte inferior de las placas de contacto, observándose en esta zona una llama amarilla. El nivel de pasta fundida, pero sin llegar a estado líquido sobre la parte superior de las placas de contacto, evita que los gases salgan por la parte superior. Cuando los gases tienden a subir, en esos ascensos se condensan produciendo incremento del volumen de brea, lo cual hace que la pasta se haga más fluida con cambios en las propiedades de la misma.<sup>[17]</sup> La alta fluidez de la pasta es una condición para que los granos gruesos se separen de los finos alterando la distribución granulométrica de la pasta



en algunas zonas. Esta segregación produce un electrodo después de cocido con malas propiedades térmicas y mecánicas. La pasta necesita de cierto tiempo de residencia dentro de la envoltura antes de deformarse. Un enfriamiento adecuado de la camisa de suspensión, evitará que los gases del horno aumenten la fluidez de la pasta y un determinado nivel de pasta fundida de alta viscosidad evita que los gases suban, de acuerdo a la experiencia, de 3 a 3,5 m; son suficientes para mantener esta condición.

Las causas fundamentales de la rotura de un electrodo cocido son: <sup>[11]</sup>

- Cambios violentos en la corriente suministrada a los electrodos pueden ser causa de tensiones internas y posteriores roturas de electrodos.
- Exceso de calentamiento puede llevar a cocción de electrodo sobre la zona de cocción al igual que una baja tasa de deslizamiento y al pasar por las placas de contacto se producirá choque térmico con formación de grietas.
- Desequilibrios eléctricos, en los cuales algunos electrodos toman más corriente que otros pueden causar agrietamiento e incluso desprendimiento de pedazos de electrodos en sentido longitudinal.
- Las paradas de hornos, causan choques térmicos en los electrodos, con roturas de los mismos. Generalmente este tipo de roturas se produce en la zona que queda expuesta a la superficie del horno o muy próxima a la misma. La experiencia ha mostrado que en paradas mayores de 3 horas, deben deslizarse los electrodos 20 cm, con lo que se reducen los riesgos de choques térmicos y por lo tanto disminución en las roturas de electrodos. Además, se deben cubrir con mezcla hasta el nivel inferior de las placas de contacto.
- Las fugas de agua en los elementos que forman el electrodo, son causa de enfriamiento violento creando tensiones internas, por lo que después de una parada o durante la operación misma del horno pueden producirse roturas de electrodos.
- Las recuperaciones de potencia después de paradas largas deben seguir una curva, que depende de las características de la pasta electrodica usada y del tipo de

operación de la planta. Cuando las paradas son cortas la normalización de la potencia debe hacerse lo más rápido posible <sup>[10,11]</sup>.

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **3.1 Caracterización física de la antracita eléctricamente calcinada**

Para el estudio de las características físicas de la antracita eléctricamente calcinada (AEC) empleada como materia prima en la fabricación de pasta electródica, inicialmente se realizó un reconocimiento del circuito que rige dicho proceso en planta, con la finalidad de conocer el funcionamiento y las variables operacionales que lo conforman. Tal es el caso de los hornos de calcinación, zona de acondicionamiento, almacenamiento y mezcladores de AEC, en donde se evaluaron los parámetros que intervienen en el proceso.

Una vez conocidos los porcentajes en peso presentes en el material grueso y fino, así como también la resistividad eléctrica que presenta el material todo uno, se procedió a la realización de un estudio de la influencia de los porcentajes en peso de antracita calcinada (material fino y grueso) sobre la mezcla de material sólido.

##### **3.1.1 Muestreo**

Las muestras a ensayar fueron tomadas de los silos 14 y 16, los cuales contienen el material de alimentación a los mezcladores. La cantidad de material a introducir en la operación de mezclado se realiza a través de la utilización de balanzas electrónicas. La muestra tomada para la aplicación de las diferentes pruebas realizadas tanto al material fino, grueso y mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC), se seleccionó según el número de colada a evaluar y la relación grueso/fino en la mezcla a estudiar. Considerando que esta investigación está basada

por el circuito que rige a la planta, las muestras bajo estudio fueron identificadas por números de colada para los pasos subsiguientes, los cuales se detallan a continuación:

### **3.1.2 Análisis granulométrico**

Estos análisis fueron realizados para las muestras tomadas de los silos 14 y 16, con el fin de definir la composición granular de la mezcla de partículas y de esta forma describir su tamaño, antes de pasar a las siguientes etapas del proceso productivo. Tomando como base fundamental los porcentajes en peso retenido en cada malla. El procedimiento ELKEM 213.07A (apéndice B.1), es el que rige este ensayo.

#### **3.1.2.1 Procedimiento experimental**

Se procedió a tomar una muestra de material depositado en los silos 14 y 16; y del mezclador una vez homogeneizada la mezcla de AEC empleada en la fabricación de la pasta electrónica. Para el material grueso y mezcla se pesaron 1.000 g de AEC mientras que para el material fino se emplearon 200 g. Se agregó en la parte superior de la columna de tamices, dejando tamizar por espacio de 20 min, cada muestra por separado. Una vez transcurrido este tiempo se pesó el material que quedó retenido en cada uno de los tamices que conformaban la columna y se registraron los valores.

### **3.1.3 Resistividad eléctrica**

Se procedió a determinar de manera experimental mediante el procedimiento ELKEM 213.08A (ver apéndice B.2), cuyo principio se basa en introducir una muestra de granulometría definida, en un cilindro no conductor y someterla a una presión específica y constante. Haciendo pasar posteriormente corriente continua a

través de la muestra, registrando la caída de tensión, empleando para ello un medidor de resistividad.

### 3.1.3.1 Preparación de la muestra

La muestra seca proveniente del silo 14, es triturada y tamizada. Tomando la fracción de material que pasa por el tamiz con abertura de 1,0 mm y queda retenida en el de 0,5 mm. Para la mezcla de antracita eléctricamente calcinada se sigue el mismo procedimiento, sólo que no es sometida la muestra al proceso de trituración.

### 3.1.3.2 Procedimiento experimental

De la muestra tamizada y retenida en el tamiz con abertura de 0,5 mm, se pesaron 15,0 g de material. Luego se vertió la muestra en el cilindro y retocó suavemente para aplanar la superficie superior. Posteriormente se insertó el pistón en el cilindro en la parte superior de la muestra y colocó el conjunto en la prensa. Aplicando una presión de 300,0 kg-f/cm<sup>2</sup> correspondiente a 42,5 kg-f/cm<sup>2</sup> sobre la sección recta de la probeta, haciendo pasar a través de la misma corriente continua de 1,0 Amper. Luego de haber registrado la caída de tensión se estimó la resistividad eléctrica del material empleando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{E \times q}{I \times 1000 \times h} \quad (\text{Ec 3.1})$$

En donde:

$\rho$  ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ): resistividad eléctrica

E (mV): caída de voltaje

q ( $\text{mm}^2$ ): sección recta de la probeta

I(A): corriente continua

h (m): altura de la probeta del cilindro

Igual procedimiento se aplicó para determinar la resistividad eléctrica de la mezcla de antracita eléctricamente calcinada.

### **3.2 Medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán, usada como materia prima en la fabricación de pasta electrónica, a través de la norma ASTM D36 – 06**

Para la medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán de manera experimental, se empleó el método de anillo y bola (Ring & Ball) (apéndice B.3). A continuación se detalla el procedimiento empleado:

#### **3.2.1 Preparación de la muestra**

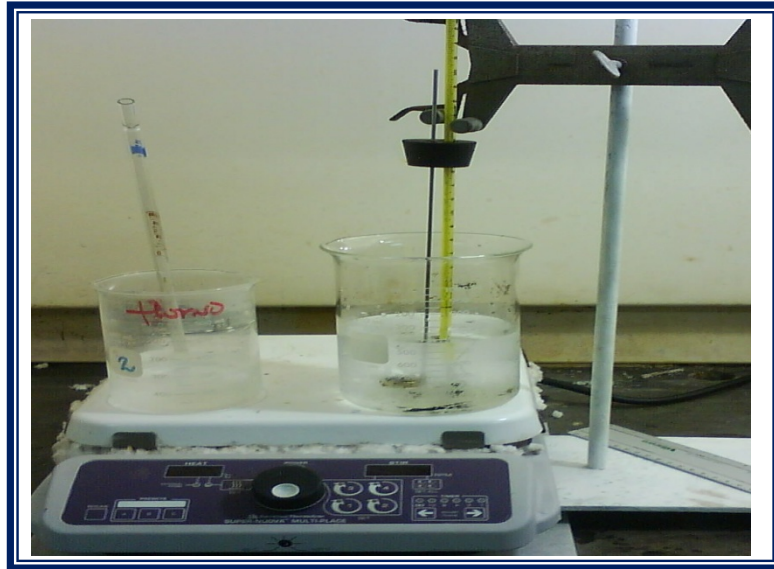
La muestra fue fundida y mezclada cuidadosamente, evitando la incorporación de burbujas en la masa, y posteriormente se vertió en el anillo. El anillo mientras se llenaba, reposaba sobre una placa de bronce la cual había sido amalgamada para prevenir la adhesión de ésta. El exceso de material se eliminó cuidadosamente con un cuchillo calentado ligeramente.

#### **3.2.2 Procedimiento para obtener el punto de ablandamiento a 80°C o por debajo**

Se llenó el vaso de vidrio a una profundidad de 8,25 cm (3 ¼”) con agua destilada a 5 °C, recientemente hervida, luego se suspendió el anillo que contenía la muestra en el agua de manera que la superficie inferior del anillo llenado exactamente 2,54 cm (1”) sobre el fondo del vaso y su superficie superior a 5,08 cm (2”), por debajo de la superficie del agua.

Posteriormente se colocó la bola en el agua pero no sobre la muestra, suspendiendo el termómetro para bajo punto de ablandamiento de manera tal que la

parte inferior estuviese a nivel con la parte inferior del anillo y dentro de 0,64cm de separación. Manteniendo la temperatura del agua a 5 °C por 15 minutos. Con pinzas adecuadas, se colocó la bola en el centro de la superficie superior de la muestra en el anillo y así se completó el montaje. Tal como se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1 Montaje para determinar punto de ablandamiento de la brea por el método del anillo y bola**

**3.3 Fabricación de pasta electrónica con relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada de 80:20; 70:30; 60:40 y 50:50 respectivamente, según procedimiento de fabricación de pasta electrónica PFV – PRO021, y caracterizarlas físicamente en crudo a través de ensayos de densidad aparente y plasticidad**

Para la fabricación de pasta electrónica se realizó inicialmente balances de materia que permitieron determinar la cantidad de material sólido y brea a mezclar para la elaboración de la pasta a las diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada sometidas a estudio.

### **3.3.1 Elaboración de pasta electródica tipo “A”**

El procedimiento de fabricación de pasta establece los pasos para la elaboración de la misma (apéndice C); los cuales se describen a continuación:

Se pesó la cantidad de material fino y grueso de AEC, mediante la utilización de balanzas electrónicas. El material fue descargado a través de tornillos sin fin en el mezclador Mx y se dejó mezclar por espacio de 15min, una vez transcurrido este tiempo se procedió a agregar la cantidad de brea de alquitrán, dejando mezclar por un tiempo aproximado de 15 minutos. Una vez alcanzado el grado de homogeneización requerido por el proceso se descargó la pasta en moldes cilíndricos. Este procedimiento se repitió para la preparación de la pasta electródica correspondiente a cada una de las relaciones grueso/fino establecidas para este estudio, reajustando los patrones de carga de acuerdo a la receta de fabricación.

### **3.3.2 Análisis granulométrico**

Este ensayo es aplicado a cada una de las mezclas preparadas, con el objeto de comprobar la composición granular del material alimentado al mezclador. Tomando como base el porcentaje en peso de material retenido en cada tamiz.

### **3.3.3 Densidad aparente**

Con este ensayo se buscó conocer la densidad que presentaba la pasta a las diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC. El procedimiento experimental empleado fue el procedimiento ELKEM código 233.02A (apéndice B.4). Empleando una balanza digital se determinó el peso de la probeta de pasta electródica que ha de ser objeto de la determinación de la plasticidad preparada según código 233.03A (apéndice B.5). Una vez pesada la probeta se procedió a introducir la muestra en un cilindro graduado con 300,0 ml de agua destilada, y se registro el



volumen de agua desplazado. La densidad aparente de la pasta fue determinada empleando la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (\text{Ec 3.2})$$

En donde:

$\rho$  (g/cm<sup>3</sup>): densidad aparente de la pasta electrónica cruda

$m$  (g): peso de la probeta de pasta electrónica

$V_f$ (cm<sup>3</sup>): volumen de agua desplazado

$V_i$ (cm<sup>3</sup>): volumen de agua inicial

### **3.3.4 Plasticidad**

La pasta fabricada fue evaluada para verificar que cumpliera con los rangos de plasticidad establecidos para garantizar la calidad del producto.

El equipo empleado para determinar el porcentaje de plasticidad de la pasta electrónica fue una estufa mufla ELKEM Spigerverket, con una temperatura ajustada de 300°C. El principio del ensayo está basado en colocar en una estufa durante cierto tiempo y a una cierta temperatura un cilindro de pasta fría y según sea el cual el incremento porcentual del diámetro de la muestra se toma como índice de plasticidad. Debido a la naturaleza convencional del ensayo deben seguirse fielmente las indicaciones establecidas por el procedimiento ELKEM 233.03A (ver apéndice B.5).

#### **3.3.4.1 Preparación de la probeta**

Se llenó el molde con pasta caliente procedente del mezclador y se enfrió con agua. Se extrajo un cilindro de pasta golpeando con un martillo la tapa del fondo. El

borde superior de la probeta se torneó para dar al cilindro una altura de 50 mm. Preparándose para este ensayo probetas por triplicado.

### **3.3.4.2 Procedimiento experimental**

Se colocó la probeta centrada sobre un disco de chapa de hierro. Se calentó la estufa con el portamuestra inserto. Cuando la temperatura se estabilizó en 305°C, se sacó rápidamente el portamuestra, se introdujo el disco con la muestra y bajó el conjunto (portamuestra y muestra) dentro de la estufa. Evitando que la temperatura fuese menor a 280°C después de esta operación, retorno en 10 minutos a 300±5°C, entre cuyos límites permaneció durante el resto del ensayo. Al cabo de 45 minutos se retiró la muestra y se enfrió. Se midieron dos diámetros perpendiculares de cada probeta, usando un calibrador (vernier) que se colocó con sus puntas paralelas al eje de la probeta. Se calculó el incremento porcentual del diámetro (índice de plasticidad) a partir del valor inferior de los seis diámetros (2 en cada probeta).

Luego de analizar los resultados obtenidos para esta fase, se evalúa si la muestra posee las características para ser empleada en el proceso de conformación de electrodos Söderberg.

## **3.4 Determinación de apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente y niveles de compresión y flexión, que presenta la pasta eléctrica cocida mediante métodos estandarizados para materiales carbonosos**

Para evaluar las propiedades mecánicas de la pasta eléctrica cocida fue necesario la preparación y cocción de probetas cilíndricas de pasta eléctrica fabricada a las diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) bajo estudio en esta investigación. Una vez cocidas y acondicionadas las probetas fueron seccionadas y aplicados los diferentes ensayos.

### 3.4.1 Preparación de la muestra

Este paso implicó el llenado de chaquetas cilíndricas de acero con la pasta electrónica caliente procedentes del mezclador (Mx). La pasta una vez introducida en las chaquetas, fue compactada con la finalidad de disminuir el área de los poros formados. Posteriormente las chaquetas de acero fueron introducidas en moldes cilíndricos de hierro de fundición, procediendo a continuación a agregar AEC alrededor de la chaqueta de acero hasta alcanzar una altura aproximada de 800 mm. El molde de hierro fue introducido en el interior del horno horizontal, y colocado justo en frente de los quemadores del mismo. En el orificio que tiene el molde cilíndrico fue introducida una termocupla que permitió registrar los cambios de temperatura a la cual fueron sometidas las probetas (cuatro probetas/cocción) de pasta electrónica durante la operación de cocción. Una vez fijada la termocupla se construyó una pared con ladrillos refractarios de aproximadamente 1.000 mm de altura a lo ancho del horno, con la finalidad de concentrar el calor en el horno y garantizar en lo posible que la pasta se cociera a una temperatura lo más cercana a los 950 °C. Luego se encendió la estufa dando inicio así a la cocción de las probetas de pasta electrónica, registrando cada 10 min la temperatura que reflejaba el indicador del horno construyendo con estos datos una curva de cocción (Apéndice C). La cocción se extendió por espacio de 11 horas, tiempo en el cual se estabilizó la temperatura en 950 °C. Una vez transcurrido este lapso de tiempo se procedió a apagar el horno y abrir las compuertas del mismo, dejándolo reposar por espacio de 10 horas tiempo necesario para disminuir la temperatura hasta aproximadamente unos 60°C. Al alcanzar esta temperatura se desmontó la pared de ladrillos y se extrajo los moldes del horno. A continuación se sacaron las chaquetas de acero de los moldes cilíndricos, se desmoldaron las probetas de pasta electrónica cocida y se llevaron al área de albañilería de la empresa (instalaciones del horno III) donde fueron acondicionadas para los ensayos que a continuación se describen:

### 3.4.2 Apertura de poros

Para determinar el volumen de poros de las muestras de pasta electrónica analizadas, se procedió a seccionar un cubo de 5,0 mm en cada uno de sus lados. Una vez acondicionadas las muestras se le estimó el peso y se introdujeron en una estufa Narberthem, para eliminar el porcentaje de humedad contenido en la muestra, una vez alcanzado un peso constante en la probeta ( $P_S$ ), se introdujo en un vaso de precipitado con 350 ml de agua destilada, se tapó el envase con una goma en cuyo centro se encontraba un tubo capilar de diámetro aproximado de 1mm conectado a una bomba de vacío. El sistema se mantuvo encendido por espacio de 20 min. Luego se retiró la goma y se leyó el volumen desplazado por la muestra ( $V_f$ ). Finalmente se pesó la muestra ( $P_H$ ) y se calculó el volumen de poros de la muestra de pasta electrónica fabricada mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$\phi = \frac{P_H - P_S}{V_f - V_i} * 100 \quad (\text{Ec 3.3})$$

Donde:

$\phi$  (%): porosidad

$P_H$  (g): masa de la muestra húmeda

$P_S$  (g): masa de la muestra seca

$V_f$  (cm<sup>3</sup>): volumen de agua desplazado por la muestra

$V_i$  (cm<sup>3</sup>): volumen de agua inicial

### 3.4.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de los electrodos de prueba (pasta cocida) se llevó a cabo en un aparato especial en el cual se hizo pasar corriente continua a través del electrodo de prueba, midiendo la caída de tensión. El procedimiento experimental está regido por el código ELKEM 213.08A (apéndice B.2), descrito en la sección

3.1.3. Para la preparación de la muestra fue necesario seccionar una de las probetas de pasta electrónica cocida y someterla a operaciones de trituración y molienda. El material obtenido fue tamizado hasta obtener 15,0 g de muestra con tamaño de partículas entre 1,0 y 0,5 mm.

#### 3.4.4 Densidad aparente

Este ensayo fue aplicado para cada una de las pastas producidas. Según procedimiento ELKEM 243.02A (consultar apéndice B.7), el cual se describe a continuación:

De las probetas fabricadas se cortó una sección de 450 mm de longitud, luego se pesó el electrodo aproximado al gramo, en una balanza digital y se midieron sus dimensiones exactas con una precisión de 0,1 mm; calculando su volumen a partir de las dimensiones de la probeta. El cálculo de la densidad aparente se realizó mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$\rho = \frac{m}{\pi L \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (\text{Ec 3.4})$$

En donde:

$\rho$  (g/cm<sup>3</sup>): densidad aparente de la pasta electrónica cocida

m (g): masa del electrodo de prueba

L (cm): longitud del electrodo de prueba

D(cm): diámetro del electrodo de prueba

#### 3.4.5 Nivel de compresión

Esta evaluación se realiza a las probetas de pasta electrónica fabricadas. Este ensayo está regido por la norma ISO 18515 (ver apéndice E.1) y el procedimiento

ELKEM 243.04A (apéndice B.9). Su principio se basa en someter un electrodo de prueba, de 150 mm de diámetro y 300 mm de longitud a esfuerzo de compresión, hasta lograr la ruptura con una máquina de ensayo normal incrementando la carga a velocidad de 10.000 kg-f/min. La carga de ruptura dividida por la sección recta del electrodo se toma como resistencia a la compresión.

La máquina de ensayo debe cubrir un campo de carga desde 0 a 50.000 kg-f. Por lo que se empleó una prensa “Suzpecar” para la realización de este ensayo. La fórmula matemática empleada para calcular el nivel de compresión presentado por las probetas de pasta electródica es la siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

$\sigma$  (kg-f/cm<sup>2</sup>): resistencia a la compresión ó esfuerzo a la compresión  $\sigma_c$

F (kg-f): carga máxima aplicada

A (cm<sup>2</sup>) : área =  $\pi \cdot r^2$  (sección transversal)

### 3.4.6 Nivel de flexión

El principio de este ensayo, consiste en colocar una barra cilíndrica de pasta electródica cocida, apoyada por sus extremos y se carga en dos puntos sistemáticamente situados, en una máquina de ensayos. La carga se aumenta regularmente y se registra la deformación a diversos intervalos durante la prueba. Este ensayo regido por la norma ISO 12986-1 (apéndice E.2) y Electrokemisk A/S 243.05A (apéndice B.10).

El equipo empleado en este ensayo es una prensa “Suzpecar” y el procedimiento empleado se describe a continuación:

Una vez cocida y acondicionada las probetas de pasta electródica, se cortó una sección de 450 mm de longitud. Este electrodo de prueba se colocó en el soporte del fondo y el marco sobre la muestra justamente encima de los dos soportes de la probeta. Se montó la palanca con el contrapeso y se ajustó el instrumento indicador de la deformación. El equipo conjunto se llevó a la máquina de ensayo. La presión fue aumentada regularmente a razón de 300 – 400 Kg-f/min, hasta la ruptura. La deformación fue anotada cada 500 kg-f el esfuerzo de flexión se calcula y representa en un diagrama frente a la deformación. Ya que es difícil obtener lecturas de la deformación correspondiente a la ruptura, la deformación o flecha máxima ha de ser corregida. El esfuerzo de deflexión ó módulo de rotura se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_b = \frac{MxD}{2I} \quad (\text{Ec 3.6})$$

Donde:

$K_b$  (kg-f/cm<sup>2</sup>): esfuerzo de flexión ó módulo de rotura

$M$  (kg/cm): momento de flexión

$D$  (cm): diámetro del electrodo de prueba

$I$  (cm<sup>4</sup>): momento de inercia

El módulo de elasticidad en la ruptura se calcula a partir de la máxima carga  $P$  y la deflexión corregida  $f$ .

$$E = K \frac{P L^3}{2 fI} \quad (\text{Ec 3.7})$$

En donde:

$E$  (kg-f/cm<sup>2</sup>): módulo de elasticidad

$P$  (kg-f): máxima carga

$L$  (cm): longitud del electrodo de prueba

$f$  (cm): deflexión corregida

$I$  (cm<sup>4</sup>): momento de inercia de la sección

$K$ : factor de corrección

### 3.5 Muestra de cálculo

#### 3.5.1 Cálculo de la resistividad eléctrica de material grueso y mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC)

En la tabla 3.1 se muestran los valores de caída de tensión obtenidos para cada una de las muestras de material grueso y mezcla de AEC evaluadas.

**Tabla 3.1** Valores de caída de tensión del material grueso y mezcla de AEC.

| Relación grueso/fino de antracita calcinada en la mezcla | Colada N° | Caída de tensión (mV) |           |           |                    |           |           |
|--|-----------|-----------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|  |           | Material Grueso       |           |           | Mezcla de material |           |           |
|  |           | Corrida 1             | Corrida 2 | Corrida 3 | Corrida 1          | Corrida 2 | Corrida 3 |
| 50/50  | 10-0672   | 24,3                  | 24,4      | 24,3      | 20,3               | 20,3      | 20,3      |
|  | 11-0739   | 19,8                  | 20,0      | 19,9      | 20,4               | 20,3      | 20,2      |
| 60/40  | 09-0409   | 18,0                  | 18,5      | 19,0      | 19,1               | 19,0      | 19,0      |
|  | 10-0564   | 22,0                  | 22,0      | 21,5      | 21,0               | 21,0      | 21,0      |
| 70/30  | 10-0612   | 24,0                  | 23,8      | 24,0      | 23,6               | 23,8      | 23,6      |
|  | 10-0615   | 23,4                  | 23,1      | 23,0      | 23,1               | 23,4      | 23,2      |
| 80/20  | 10-0584   | 23,0                  | 22,5      | 23,5      | 20,5               | 20,0      | 20,0      |
|  | 10-0595   | 21,5                  | 22,0      | 22,0      | 21,0               | 21,0      | 21,0      |

La resistividad eléctrica de material grueso y mezcla de antracita calcinada es determinada a partir de la caída de voltaje que presente el material, una vez aplicado corriente continua de 1 Amper, a una probeta cuya altura constante es igual a 0,025 m y sección recta de 925 mm<sup>2</sup>.

$$\rho = \frac{E \times q}{I \times 1000 \times h} \quad (\text{Ec } 3.1)$$



Donde:

$\rho$  ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ): resistividad eléctrica

E (mV): caída de voltaje

q ( $\text{mm}^2$ ): sección recta de la probeta = 925

I(A): corriente continua = 1

h (m): altura de la probeta del cilindro = 0,025

Sustituyendo los valores de correspondiente a cada uno de los parámetros en la ecuación 3.1, resulta que:

$$\rho = \frac{24,3 \times 925}{1 \times 1000 \times 0,025} = 899,1 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$$

Esta es la resistividad eléctrica que presenta el material grueso analizado correspondiente a la colada N° 10-0672 en su primera corrida, fabricada a relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 50:50.

Igual procedimiento se aplica para el cálculo de la resistividad eléctrica del material grueso y mezcla de AEC, correspondiente a las demás muestras de material analizadas.

### **3.5.2 Cálculo de la cantidad de material a alimentar a los mezcladores para la producción de pasta electrodica a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada**

Un aspecto de todo estudio de procesamiento de minerales es un análisis de la forma en que está distribuido o alimentado el mineral en los puntos en que se dividen o combinan las corrientes. Este conocimiento es necesario para diseñar un diagrama de proceso y es también esencial para hacer estudios de plantas en operación. Estos cálculos se conocen como balances de materiales, basados en el principio de conservación de la materia: <sup>[20]</sup>

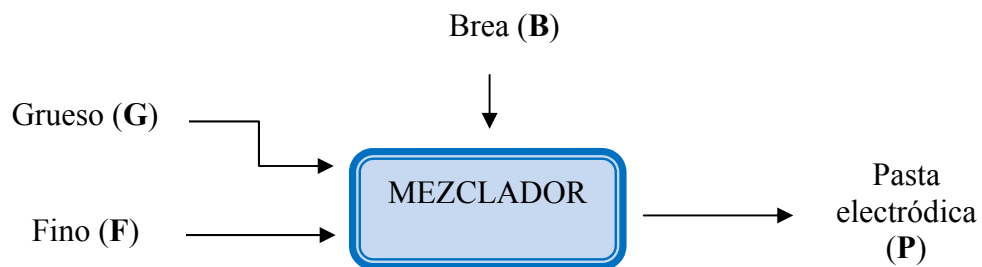
$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Acumulación}$$

Por tratarse de un sistema continuo en estado estacionario no hay acumulación, se reduce la relación a:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

A partir de tres corrientes de entrada como lo son: material grueso y fino de AEC y brea de alquitrán se origina un solo producto (pasta electrónica). La relación material sólido/brea establecidos como consignas de alimentación en el proceso de fabricación de pasta de la empresa es de 80:20; receta que se mantuvo en la fabricación de la pasta bajo estudio en esta investigación.

El proceso general que interviene está en función de la cantidad total de material que entra y sale del proceso, por lo que se representa de la siguiente manera:



**Figura 3.2 Balance de materia global correspondiente al material alimentado al mezclador (Mx)**

Por lo tanto, para estimar la cantidad de material a emplear para la fabricación de 1.000 kg (base de cálculo) de pasta electrónica a las diferentes composiciones de material sólido establecidas, se emplean las siguientes ecuaciones de los componentes alimentados al proceso, obtenidas éstas a través de balances globales y de componentes.

**Balance Global:**  $G + F + B = P$  (Ec 3.8)

Sustituyendo el valor de la base de cálculo correspondiente a 1.000 kg de pasta electrónica, resulta:

$$G + F + B = 1.000 \text{ Kg} \quad (\text{Ec } 3.9)$$

**Balance por componentes:**

Material grueso:  $X_G G + X_G F + X_G B = X_G P$  (Ec 3.10)

Material fino:  $X_F G + X_F F + X_F B = X_F P$  (Ec 3.11)

Brea de alquitrán:  $X_B G + X_B F + X_B B = X_B P$  (Ec 3.12)

Donde:

G: material grueso de AEC

F: material fino de AEC

P: pasta electrónica

$X_G$ : composición en peso de material grueso

$X_F$ : composición en peso de material fino

$X_B$ : composición en peso de brea

Sabiendo que las relaciones grueso/fino en la mezcla establecidas para este estudio están en función del porcentaje de material sólido que compone la pasta electrónica fabricada se tiene que la composición de la pasta producida deberá ser:

**• Para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC 50/50:**

$$X_G = X_F = 0,40$$

$$X_B = 0,20$$

**• Para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC 60/40:**

$$X_G = 0,48$$

$$X_F = 0,32$$

$$X_B = 0,20$$

• **Para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC 70/30:**

$$X_G = 0,56$$

$$X_F = 0,24$$

$$X_B = 0,20$$

• **Para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC 80/20:**

$$X_G = 0,64$$

$$X_F = 0,16$$

$$X_B = 0,20$$

Tomando los valores de composición del material fino y grueso de la tabla 4.1 y 4.2 para cada una de las pastas fabricadas. Para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40, se tiene una composición para el material grueso de  $X_G=0,98$ ;  $X_F=0,02$  y  $X_B=0,00$ ; mientras que para el material fino  $X_G=0,00$ ;  $X_F=1,00$  y  $X_B=0,00$  y para la brea de alquitrán  $X_G=0,0000$ ,  $X_F=0,0000$  y  $X_B=1,0000$ . Sustituyendo estos valores en las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12 respectivamente se obtienen las siguientes ecuaciones

**Balance por componentes:**

$$\text{Material grueso:} \quad 0,98G + 0,02F + 0,00B = 0,48P \quad (\text{Ec 3.13})$$

$$\text{Material fino:} \quad 0,00G + 1,00F + 0,00B = 0,32P \quad (\text{Ec 3.14})$$

$$\text{Brea de alquitrán:} \quad 0,00G + 0,00F + 1,00B = 0,20P \quad (\text{Ec 3.15})$$

Resolviendo éste sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas se obtiene la cantidad de material grueso, fino y brea a alimentar al mezclador para producir 1.000Kg de pasta. Igual procedimiento se aplica para cada una de las relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC evaluadas en esta investigación, obteniéndose:

**•Cantidad de material a alimentar para fabricación de pasta electrónica a relación grueso/fino de antracita calcinada de 50:50**

**a. Grueso**

G: 408 Kg

$X_G$ : 0,98

$X_F$ : 0,02

**b. Fino**

F: 392 Kg

$X_G$ : 0,00

$X_F$ : 1,00

**c. Brea**

B: 200 Kg

$X_B$ : 1,00

**d. Pasta electrónica**

P: 1.000 kg

$X_G$ : 0,40

$X_F$ : 0,40

$X_B$ : 0,20

**•Cantidad de material a alimentar para fabricación de pasta electrónica a relación grueso/fino de antracita calcinada de 60:40**

**a. Grueso**

G: 490 Kg

$X_G$ : 0,98

$X_F$ : 0,02

**b. Fino**

F: 310 Kg

$X_G: 0,00$

$X_F: 1,00$

**c. Brea**

B: 200 Kg

$X_B: 1,00$

**d. Pasta eléctrica**

P: 1.000 kg

$X_G: 0,48$

$X_F: 0,32$

$X_B: 0,20$

**• Cantidad de material a alimentar para fabricación de pasta eléctrica a relación grueso/fino de antracita calcinada de 70:30**

**a. Grueso**

G: 571 Kg

$X_G: 0,98$

$X_F: 0,02$

**b. Fino**

F: 229 Kg

$X_G: 0,00$

$X_F: 1,00$

**c. Brea**

B: 200 Kg

$X_B: 1,00$

**d. Pasta eléctrica**

P: 1.000 kg

$X_G: 0,56$

$X_F: 0,24$

$X_B: 0,20$

**• Cantidad de material a alimentar para fabricación de pasta electrónica a relación grueso/fino de antracita calcinada de 80:20**

**a. Grueso**

G: 653 Kg

$X_G: 0,98$

$X_F: 0,02$

**b. Fino**

F: 147 Kg

$X_G: 0,00$

$X_F: 1,00$

**c. Brea**

B: 200 Kg

$X_B: 1,00$

**d. Pasta electrónica**

P: 1.000 kg

$X_G: 0,64$

$X_F: 0,16$

$X_B: 0,20$

**3.5.3 Cálculo de la densidad aparente de la pasta electrónica cruda**

En la tabla 3.2 se muestra los valores del ensayo aplicado para determinar los parámetros necesarios para el cálculo de la densidad aparente de la pasta electrónica verde.

**Tabla 3.2** Valores de peso presentados por las probetas de pasta electrónica cruda y volumen desplazado por las mismas.

| Relación grueso/fino de antracita calcinada en la mezcla | Colada N° | Masa (g)  |           |           | Volumen (cm <sup>3</sup> ) |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
|  |           | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 | Corrida 1                  | Corrida 2 | Corrida 3 |
| 50/50  | 10-0672   | 180,4     | 182,6     | 181,5     | 410                        | 410       | 410       |
|  | 11-0739   | 166,0     | 166,0     | 166,0     | 400                        | 400       | 400       |
| 60/40  | 09-0409   | 126,4     | 125,6     | 126,4     | 380                        | 380       | 380       |
|  | 10-0564   | 143,1     | 144,9     | 144,0     | 390                        | 390       | 390       |
| 70/30  | 10-0612   | 67,5      | 67,0      | 67,5      | 350                        | 350       | 350       |
|  | 10-0615   | 67,5      | 66,5      | 67,0      | 350                        | 350       | 350       |
| 80/20  | 10-0584   | 65,0      | 64,5      | 65,0      | 350                        | 350       | 350       |
|  | 10-0595   | 64,0      | 62,5      | 63,5      | 350                        | 350       | 350       |

A continuación se muestra el cálculo de la densidad aparente presentado por la pasta electrónica en verde, dicho cálculo representa la variación de la masa de la pasta respecto al volumen ocupado por la misma, tomando como constante el volumen inicial en 300cm<sup>3</sup>; una vez determinados estos parámetros (masa y volumen desplazado por las probetas) se procede a determinar la densidad que presentan las muestras tomadas de cada una de las coladas fabricadas, estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (\text{Ec } 3.2)$$

Donde:

$\rho$  (g/cm<sup>3</sup>): densidad aparente de la pasta electrónica cruda

$m$  (g): peso de la probeta de pasta electrónica = 180,4

$V_f$ (cm<sup>3</sup>): volumen de agua desplazado = 410

$V_i$ (cm<sup>3</sup>): volumen de agua inicial = 300

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.2 resulta;



$$\rho = \frac{180,4}{410 - 300} = 1,64 \text{ g / cm}^3$$

Igual procedimiento se aplica para el cálculo de la densidad aparente de la pasta electródica correspondiente a cada una de las coladas de pasta fabricadas.

### 3.5.4 Cálculo de apertura de poros

La pasta electródica empleada en la conformación de los electrodos de auto-cocción tipo Söderberg, debe cumplir con especificaciones en cuanto a propiedades físicas, entre ellas la porosidad. En la tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos durante la realización del ensayo para la determinación del volumen de poros presentado por las muestras.

Para estimar el volumen de poros de las muestras analizadas se procedió a establecer como volumen inicial 350 cm<sup>3</sup> de agua, determinado este a partir de la siguiente ecuación

$$\phi = \frac{P_H - P_S}{V_f - V_i} * 100 \quad (\text{Ec 3.3})$$

Donde:

Ø (%): porosidad

P<sub>H</sub> (g): peso de la muestra húmeda

P<sub>S</sub> (g): peso de la muestra seca

V<sub>f</sub> (cm<sup>3</sup>): volumen de agua desplazado por la muestra

V<sub>i</sub> (cm<sup>3</sup>): volumen de agua inicial = 350

**Tabla 3.3** Valores de Peso de la muestra seca-húmeda y volumen desplazado

| Relación grueso/fino de AEC | Colada N° | Corrida N° | P <sub>i</sub> (g) | P <sub>s</sub> (g) | P <sub>II</sub> (cm <sup>3</sup> ) | V <sub>r</sub> (cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|-----------|------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 50/50                       | 10-0672   | 1          | 167,01             | 166,15             | 178,51                             | 461                               |
|                             |           | 2          | 152,07             | 151,26             | 162,93                             | 438                               |
|                             | 11-0739   | 1          | 166,49             | 165,57             | 179,13                             | 438                               |
|                             |           | 2          | 159,59             | 158,27             | 174,69                             | 438                               |
| 60/40                       | 09-0409   | 1          | 162,21             | 161,86             | 170,58                             | 427                               |
|                             |           | 2          | 159,73             | 159,78             | 168,45                             | 438                               |
|                             | 10-0564   | 1          | 173,48             | 172,84             | 187,14                             | 461                               |
|                             |           | 2          | 160,33             | 159,60             | 168,54                             | 438                               |

Sustituyendo en la ecuación 3.3 los valores correspondientes a la colada 10-0672 en su primera corrida, se obtiene que:

$$\phi = \frac{178,51 - 166,15}{461 - 350} * 100 = 11,14\%$$

Siendo este el porcentaje del volumen de poros presentado por la pasta electrónica producida a relación grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada de 50:50 correspondiente a la colada 10-0672. Igual procedimiento se empleo para determinar el volumen de poros de las demás muestras analizadas.

### 3.5.5 Cálculo de la resistividad eléctrica, densidad aparente, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de la pasta electrónica cocida

Las propiedades físicas y mecánicas de la pasta electrónica empleada como insumo dentro del proceso de producción de ferroaleaciones de diferentes especificaciones, están directamente relacionadas con la calidad de la misma, debiendo cumplir ésta con ciertos parámetros preestablecidos, entre ellas resistividad eléctrica inferior a los 800,0  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , densidad superior a 1,30  $\text{g}/\text{cm}^3$  preferiblemente por encima de 1,35 $\text{g}/\text{cm}^3$  y un módulo de rotura (nivel de flexión)

entre 30 – 50 Kg/cm<sup>2</sup>, preferiblemente superior a 35 Kg/cm<sup>2</sup>. En tabla 3.4 se encuentran tabulados los resultados de los ensayos realizados para estimar los parámetros físico-mecánicos evaluados a la pasta electrónica cocida.

**Tabla 3.4** Valores de caída de tensión, peso, diámetro y ancho de las probetas de pasta electrónica cocida y carga aplicada en los ensayos de compresión y flexión

| Relación grueso/fino en la mezcla de AEC | Colada N° | Corrida N° | Caída de tensión (mV) | Ensayo de Flexión |               |            |                     |       |       |       | Ensayo de Compresión |                     |
|--|-----------|------------|-----------------------|-------------------|---------------|------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------------|---------------------|
|  |           |            |                       | Peso (g)          | Diámetro (cm) | Ancho (cm) | Carga aplicada (kg) |       |       |       | Ancho (cm)           | Carga aplicada (kg) |
| 50/50                                    | 10-0672   | 1          | 25,3                  | 10.592            | 15,01         | 45,01      | 500                 | 1.000 | 1.500 | 1.680 | 29,85                | 11.970              |
|  |           | 2          | 21,3                  | 10.653            | 14,92         | 45,00      | 500                 | 1.000 | 1.500 | 1.650 | 30,00                | 16.900              |
|  | 11-0739   | 1          | 20,1                  | 11.007            | 14,96         | 45,02      | 500                 | 1.000 | 1.260 | -     | 30,00                | 14.240              |
|  |           | 2          | 21,1                  | 11.014            | 15,02         | 45,01      | 500                 | 1.000 | 1.260 | -     | 29,93                | 11.970              |
| 60/40                                    | 09-0409   | 1          | 16,2                  | 11.190            | 14,92         | 45,02      | 500                 | 1.000 | 1.500 | 2.000 | 29,56                | 14.630              |
|  |           | 2          | 16,5                  | 11.220            | 15,01         | 45,04      | 500                 | 1.000 | 1.500 | 1.920 | 29,84                | 15.050              |
|  | 10-0564   | 1          | 19,2                  | 10.750            | 15,00         | 45,02      | 500                 | 945   | 1.300 | 1.600 | 30,05                | 14.580              |
|  |           | 2          | 19,3                  | 10.620            | 15,01         | 45,04      | 500                 | 855   | 1.200 | 1.500 | 30,03                | 10.380              |

### • Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de la pasta cocida está dada por:

$$\rho = \frac{E \times q}{I \times 1000 \times h} \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde:

$\rho$  ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ): Resistividad eléctrica

E (mV): Caída de voltaje

q ( $\text{mm}^2$ ): Sección recta de la probeta = 925

I(A): Corriente continua = 1,0

h (m): Altura de la probeta del cilindro = 0,025

Sustituyendo los valores correspondientes a la colada 10-0672, corrida N° 1, se obtiene el siguiente valor de resistividad eléctrica:

$$\rho = \frac{25,3 \times 925}{1,0 \times 1000 \times 0,025} = 759,2 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

El procedimiento aplicado para estimar el valor de la resistividad eléctrica presentada por cada una de las muestras tomadas de las diferentes coladas de pasta electródica fabricada se realiza siguiendo este mismo procedimiento.

#### • Densidad aparente

El conocimiento de la masa y dimensiones de una muestra permite el cálculo de su densidad  $\rho$  mediante la siguiente relación:

$$\rho = \frac{m}{\Pi L \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (\text{Ec 3.4})$$

Donde:

$\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): densidad aparente de la pasta electródica cocida

$m$  (g): peso del electrodo de prueba

$L$  (cm): longitud del electrodo de prueba

$D$  (cm): diámetro del electrodo de prueba

Puesto que para la 1<sup>era</sup> corrida de la colada 09-0409, el peso del electrodo de prueba es de 11.190g, la longitud de la probeta de 45,02 cm y el diámetro 14,92 cm. Se sustituyen éstos parámetros en la ecuación 3.4.2, resulta:

$$\rho = \frac{11.190}{\Pi * 45,02 \left(\frac{14,92}{2}\right)^2} = 1,42 \text{ g} / \text{cm}^3$$

El valor experimental del electrodo de prueba es  $1,42 \text{ g/cm}^3$ , valor que se encuentra por encima del valor mínimo establecido por las especificaciones. Igual procedimiento se aplica para el resto de los datos.

### • Nivel de compresión

Un ensayo de compresión se realiza de forma similar a un ensayo de tracción, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. La ecuación 3.5 se utiliza para calcular el esfuerzo de compresión. Por convención, una fuerza de compresión se considera negativa y, por tanto produce un esfuerzo negativo. Los ensayos de compresión fueron realizados para conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes (o sea, plásticas), tal como ocurre en los procesos de conformación.

La resistencia a la compresión se calcula mediante la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

$\sigma$  (kg-f/cm<sup>2</sup>): resistencia a la compresión

F (kg-f): carga máxima aplicada

A (cm<sup>2</sup>): área =  $(\pi \cdot D^2)/4$  (sección transversal)

Como la fuerza máxima aplicada a la muestra de la colada 09-0409, correspondiente a la 1<sup>era</sup> corrida, es de 14.630 kg-f, y el diámetro de la probeta es de 14,92 cm, la resistencia a la compresión es entonces:

$$\sigma = \frac{4,00 * 14.630}{3,14 * 14,92^2} = 85,450 \text{ kg - f / cm}^2$$

Igual procedimiento es aplicado para el cálculo de la resistencia a la compresión de cada una de las probetas elaboradas con la pasta electrónica a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC.

• **Resistencia a la flexión**

Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie, opuesta al punto medio de la probeta. La fractura iniciará en éste sitio. La resistencia a la flexión, ó módulo de ruptura describe la resistencia del material:

$$K_b = \frac{MxD}{2I} \quad (\text{Ec 3.6})$$

Donde:

$K_b$  (kg-f/cm<sup>2</sup>): esfuerzo de flexión ó módulo de ruptura

$M$  (kg/cm<sup>2</sup>): momento de flexión

$D$  (cm): diámetro del electrodo de prueba

$I$  (cm<sup>4</sup>): momento de inercia

Según procedimiento Elkem A/S 243.05A, para las probetas de pasta electrónica resulta que  $M = (P/2 * L/3)$  y que  $I = (\Pi * D^4/64)$ , obteniendo entonces,

$$K_b = \frac{\frac{P}{2} * \frac{L}{3} * D}{2 * \Pi * \frac{D^4}{64}}$$

Donde:

$L$  (cm): longitud de la probeta de pasta electrónica.

$D$  (cm): diámetro de la probeta de pasta electrónica.

P (kg-f): carga máxima aplicada.

A demás se conoce que el diámetro promedio de las probetas y su longitud es de 15,00 cm y 45,00 cm, respectivamente; resultando una relación para el cálculo del módulo de ruptura en función de la carga máxima aplicada.

$$K_b = \frac{\frac{P}{2} * \frac{45,00}{3} * 15,00}{2 * \Pi * \frac{15,00^4}{64}} = (0,0226P)[kg - f / cm^2] \quad (\text{Ec 3.6.1})$$

Sustituyendo el valor de la carga máxima aplicada a la probeta correspondiente a la colada 09-0409, corrida 1, cuyo valor es P = 2.000 kg-f en la ecuación 3.6.1

$$K_b = \frac{\frac{2.000}{2} * \frac{45,00}{3} * 15,00}{2 * \Pi * \frac{15,00^4}{64}} = (0,0226 * 2.000) = 45,20[kg - f / cm^2]$$

El módulo de elasticidad a la flexión ó módulo en flexión se calcula según la ecuación:

$$E = K \frac{P L^3}{2 f l} \quad (\text{Ec 3.7})$$

En donde:

E (kg-f/cm<sup>2</sup>): Módulo de elasticidad

P (kg-f): Máxima carga aplicada

L (cm): Longitud del electrodo de prueba

f (cm): deflexión corregida

I (cm<sup>4</sup>): Momento de inercia ( $\Pi * D^4$ )/64

K: Constante (23/648)

Tomando en cuenta que el momento de inercia es un parámetros constantes en ésta ecuación con valores de  $I = 2.485,055 \text{ cm}^4$  y la constante  $K = 0,0355$ , asumiendo además un valor promedio de longitud de las probetas igual a  $L = 45 \text{ cm}$ , la ecuación 3.7 se transforma en una correlación en función de la carga máxima aplicada (P) y la deflexión corregida (f).

$$E = 0,0355 \frac{P}{2} \frac{45,00^3}{2.485,055 f} = 0,651 \frac{P}{f} [\text{kg} - \text{f} / \text{cm}^2] \quad (\text{Ec 3.7.1})$$

Sustituyendo el valor de la carga máxima aplicada cuyo valor es  $P = 2.000 \text{ Kg-f}$  y  $f = 0,0584 \text{ cm}$ , resulta un módulo de elasticidad  $E = 22.773,97 \text{ kg-f/cm}^2$ .

Este procedimiento se aplica para el cálculo del módulo de ruptura y elasticidad en flexión de cada una de las probetas evaluadas en esta investigación.

### 3.6 Descripción de equipos, materiales y sustancias

#### 3.6.1 Equipos

- Balanza digital. Marca: Ohans. Capacidad: 4000.0 g. Modelo: Scout Pro SP4001. Apreciación 0,1.



Figura 3.3 Balanza digital



- Balanza digital. Marca: Ohaus. Capacidad: 4.00 g. Modelo: Adventurer Pro AV40. Apreciación 0,01 g.



**Figura 3.4 Balanza Digital**

- Balanza digital. Marca: Weighing. Capacidad: 10000 Kg. Modelo: XK3100-B1. Apreciación: 1 Kg.



**Figura 3.5 Balanza digital**

- Tamizador eléctrico. Marca: Endecotts. Modelo: G512 GD02.



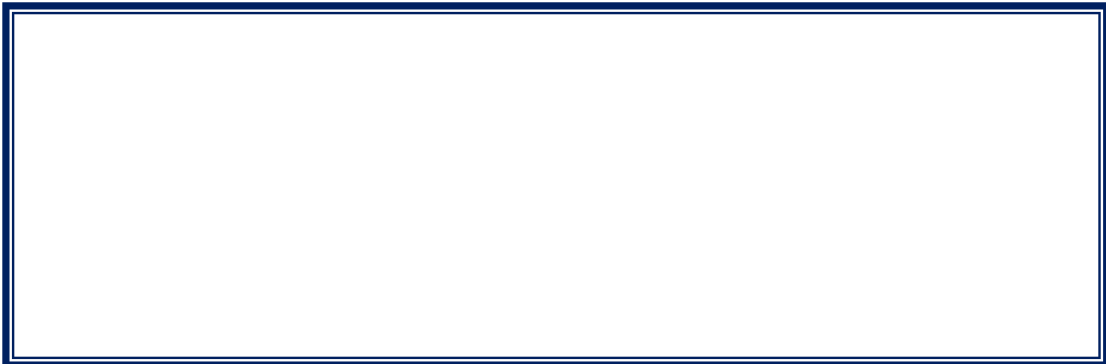
**Figura 3.6 Tamizador eléctrico**

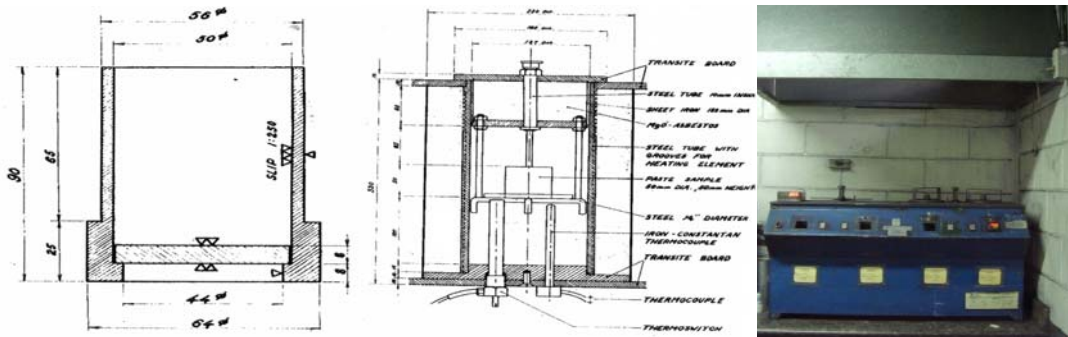
- Tamices. Marca: Endecotts y Fisher Scientific Company. Serie para material fino de antracita calcinada (apertura mm): 0.500; 0.420; 0.291; 0.149; 0.075; bandeja. Serie de tamices para material grueso y mezcla de AEC (apertura mm): 12.50; 9.50; 6.30; 4.75; 2.36; 1.18; 0.85; 0.60; bandeja. Serie de tamices para ensayo de resistividad eléctrica (apertura mm): 1,00; 0.5; bandeja.



**Figura 3.7 Batería de tamices**

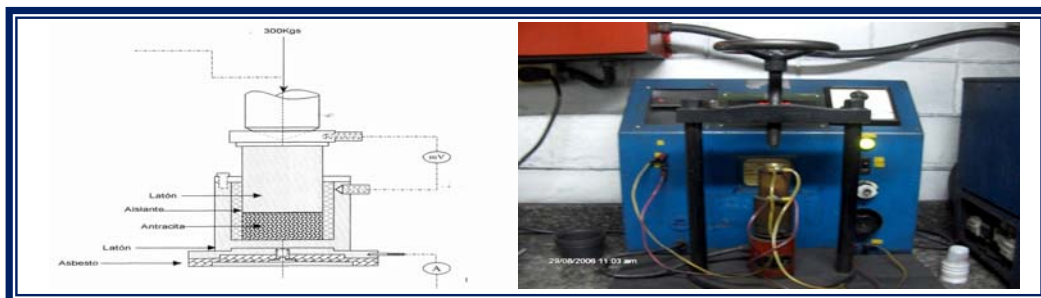
- Estufa Mufla eléctrica. Marca: Elkem Spigerverket. Capacidad: 1200°C. Apreciación:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Modelo: HY48 – 11.





**Figura 3.8 Estufa mufla eléctrica**

- Medidor de resistividad. Marca: Elkem Spigerverket. Capacidad (mV): 5000. Apreciación (mV) 0,1.



**Figura 3.9 Medidor de resistividad**

- Prensa. Marca: Suzpecar. Modelo: CMP – 150



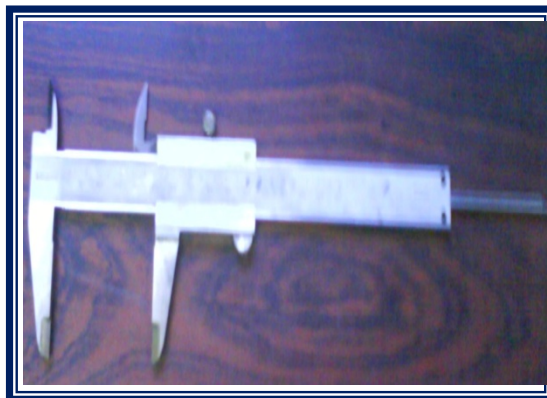
**Figura 3.10 Prensa hidráulica para ensayos mecánicos**

- Horno horizontal. Capacidad: 950°C. Apreciación 1°C.



**Figura 3.11 Horno para cocción de probetas de pasta electrónica**

- Vernier. Marca: Mitotuyo. Capacidad: 30,00 mm. Apreciación 0,05mm



**Figura 3.12 Vernier**

- Campana de Extracción. Marca: Labconco. Modelo: Missouri 64132



**Figura 3.13 Campana de Extracción**

- Bomba de Vacío. Marca: Fisatom



**Figura 3.14 Bomba de vacío**

- Plancha de Agitación. Marca: Banstead Thermolyne



**Figura 3.15** Plancha de agitación

- Horno. Marca: Narberthem



**Figura 3.16** Horno

- Molino de fricción





**Figura 3.17 Molino de fricción**

- Cortadora eléctrica con disco punta de diamante. Marca Dewalt



**Figura 3.18 Cortadora eléctrica**

### 3.6.2 Materiales

- Anillo de cobre
- Apisonador de acero.
- Bola de acero. Dimensiones: diámetro 3/8". Peso: 3,54 g.
- Bolsas de plástico. Capacidad: 20 kg.
- Chaquetas cilíndricas de acero. Dimensiones: 150 mm de diámetro x 850 mm de longitud.
- Cilindro graduado. Capacidad: 1000cm<sup>3</sup>. Apreciación: 10 cm<sup>3</sup>.
- Cilindros de acero. Dimensiones: 50 mm de diámetro x 70 mm de longitud.
- Cronómetro. Marca: Sony ericsson. Apreciación: 1 segundo.

- Envases de plástico.
- Guantes de seguridad.
- Ladrillos refractarios
- Marcadores
- Moldes cilíndricos de hierro de fundición. Dimensiones: 300 mm de diámetro x 1000 mm de longitud.
- Pala
- Pinzas metálicas y de madera.
- Pipeta
- Soporte universal.
- Tapones de goma.
- Termocupla.
- Termómetro de bajo punto de ablandado ASTM. Capacidad: 80°C. Apreciación: 2°C.
- Tiza
- Tobos.
- Vaso de precipitado. Capacidad: 1000 cm<sup>3</sup>. Apreciación: 50 cm<sup>3</sup>.

### **3.6.3 Sustancias**

- Agua destilada
- Antracita
- Antracita eléctricamente calcinada
- Brea de alquitrán



## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

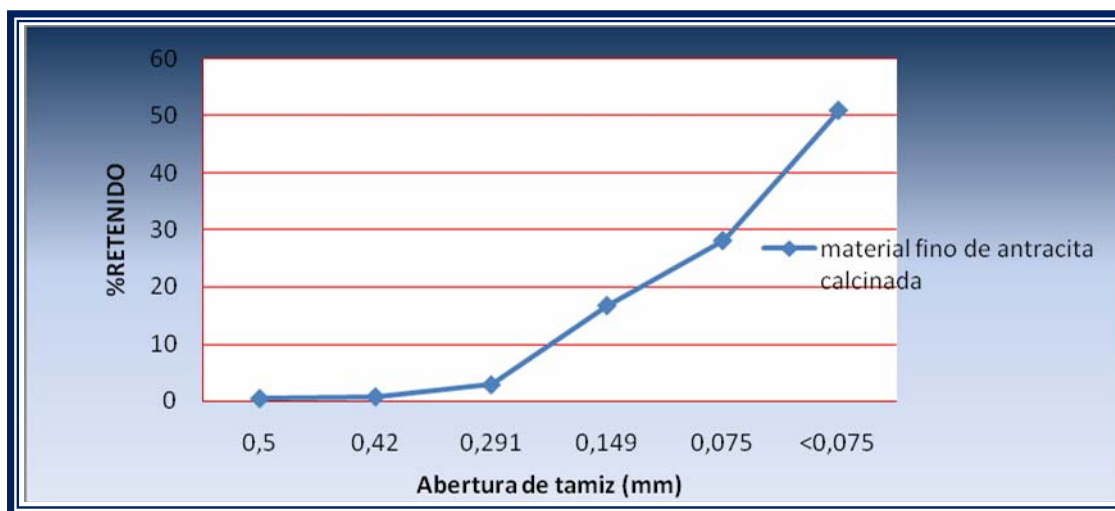
#### **4.1 Caracterización física de la antracita calcinada a través de análisis diferencial y resistividad eléctrica**

##### **4.1.1 Análisis diferencial de la antracita eléctricamente calcinada (AEC)**

En la tabla 4.1 se presentan los valores promedios obtenidos de los análisis granulométricos realizados al material fino de AEC, donde el porcentaje retenido de material en el tamiz de abertura de 0,5 mm y menor a 0,075 mm, se encuentran por encima de los valores especificados en la PFV-PRO021 (apéndice C). La cantidad de material con tamaño inferior a 0,075mm, que se está generando durante el proceso de molienda supera los estándares establecidos; convirtiéndose en un inconveniente al momento de la preparación de la pasta, debido a que a mayor cantidad de partículas con tamaño inferior a 0,075mm generado en el proceso de molienda, se requerirá mayor cantidad de brea, pues es el material fino quien se encarga de absorber el aglomerante. El análisis por tamizado del producto procedente del molino muestra una representación lineal por lo menos para la mayor parte del intervalo de tamaños de partículas, tal como se aprecia en la figura 4.1; depositándose mayor porcentaje de partículas de tamaño inferior a 0,075mm representado por el 50,98% del total de la muestra.

**Tabla 4.1** Análisis granulométrico promedio de material fino de AEC proveniente del proceso de molienda.

| Malla (mm) | 0,500 | 0,420 | 0,297 | 0,149 | 0,075 | <0,075 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| % Retenido | 0,49  | 0,79  | 2,89  | 16,78 | 28,18 | 50,98  |

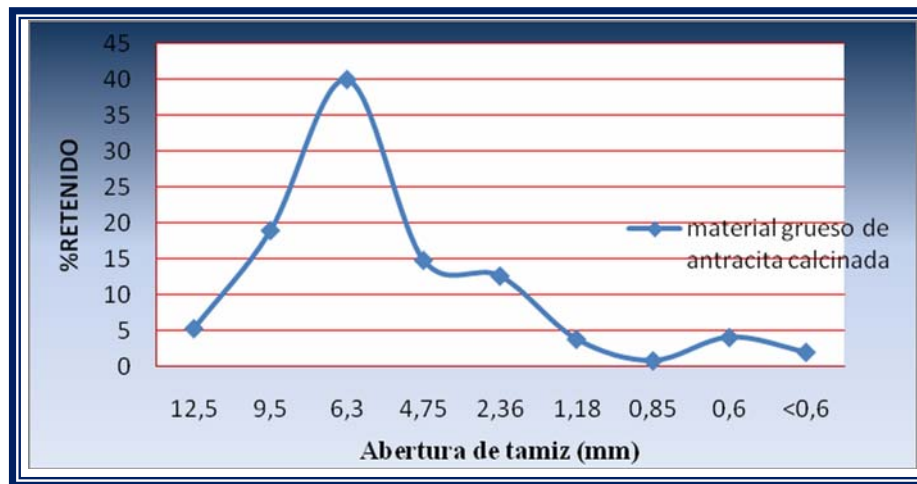


**Figura 4.1** Curva granulométrica de de material fino de AEC

En la figura 4.2 se muestra la curva granulométrica promedio del material grueso de AEC evaluada en esta investigación, en la cual se puede apreciar una tendencia bastante uniforme que lleva a la deposición del material granular en el tercer tamiz (abertura 6,30mm), determinando así que el material empleado en la elaboración de la mezcla de material sólido, correspondiente al material grueso de AEC se encontraba conformado por un 40,02% de partículas con tamaño de partículas inferior a 9,50 mm y superior de 6,30mm. Presentándose una desviación del 21% respecto al valor máximo establecido en el procedimiento de fabricación de pasta. Así mismo puede apreciarse variaciones en el contenido de partículas con tamaños de 12,50; 9,50 y 0,60 mm; siendo éstos inferiores a los establecidos en la PFV-PRO021 (apéndice C).

**Tabla 4.2** Análisis granulométrico promedio de material grueso de AEC proveniente del proceso de calcinación

| Malla(mm) | 12,50 | 9,50  | 6,30  | 4,75  | 2,36  | 1,18 | 0,85 | 0,60 | <0,60 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| %Retenido | 5,30  | 18,98 | 40,02 | 14,82 | 12,62 | 3,81 | 0,81 | 4,07 | 1,99  |



**Figura 4.2** Curva granulométrica de material grueso de AEC

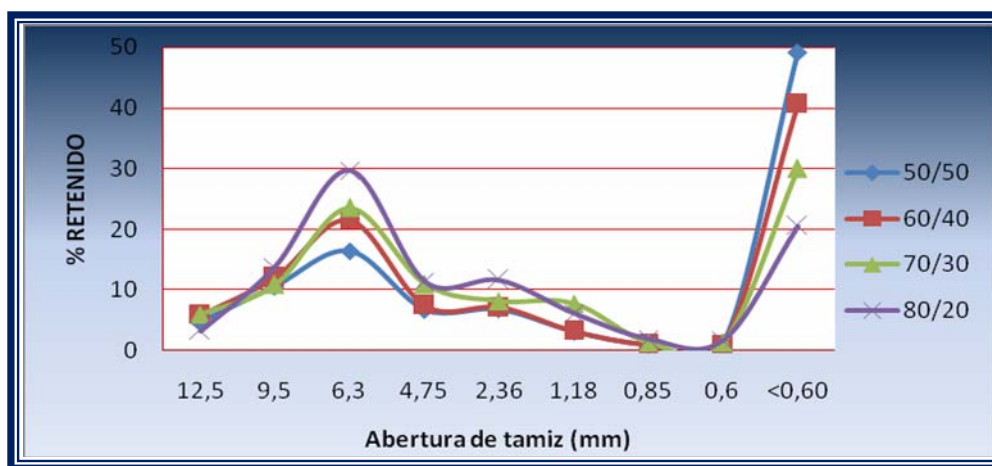
En la tabla 4.3 se puede observar que el porcentaje de material con tamaño de partículas inferior a 0,60 mm son equivalentes al porcentaje de material fino alimentado al mezclador al momento de la fabricación de la pasta eléctrica bajo estudio, con lo cual queda comprobado que las mezclas preparadas corresponden a las relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC establecidas para este estudio.

Según la figura 4.3, la distribución del material corresponde a la establecida para la fabricación de la pasta eléctrica a las relaciones establecidas para ésta investigación. En las mezclas correspondientes a la relación grueso/fino de 50:50 y 60:40 la distribución de las partículas con tamaños comprendidos entre 4,75 mm y 0,60 mm es similar, por lo cual se puede deducir que no existe una diferencia marcada en la distribución granulométrica de estas dos proporciones, respecto a las relaciones de 70:30 y 80:20. Es evidente que el mayor porcentaje de partículas de

tamaño inferior a 9,50 mm y superior a 6,50 mm se registró en la preparación de la mezcla a relación grueso/fino de 80:20, disminuyendo este porcentaje proporcionalmente con la disminución de la relación grueso/fino, mientras que para las partículas de tamaño inferior a 0,06 mm, se observó mayor retención de éstas partículas para la relación 50:50.

**Tabla 4.3** Análisis granulométrico promedio de la mezcla de AEC proveniente del mezclador

| Malla(mm) |  | 12,50 | 9,50 | 6,30  | 4,75  | 2,36  | 1,18  | 0,85 | 0,60 | <0,60 |       |
|-----------|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| %Retenido | Relación grueso/fino en la mezcla de AEC | 50/50 | 4,71 | 10,62 | 16,39 | 6,75  | 6,85  | 3,14 | 1,06 | 1,28  | 49,22 |
|           |  | 60/40 | 5,87 | 12,07 | 21,52 | 7,43  | 7,11  | 3,19 | 1,06 | 1,15  | 40,60 |
|           |  | 70/30 | 5,96 | 10,87 | 23,58 | 10,94 | 8,19  | 7,80 | 1,34 | 1,30  | 30,02 |
|           |  | 80/20 | 3,18 | 13,79 | 29,70 | 11,38 | 11,63 | 6,19 | 1,89 | 1,75  | 20,49 |



**Figura 4.3** Curva granulométrica de mezclas de AEC a diferentes relaciones grueso/fino

#### 4.1.2 Resistividad eléctrica de la antracita eléctricamente calcinada (AEC)

La calcinación de la antracita se efectúa con la finalidad de obtener un material con buenas propiedades conductoras, cuando se incrementa la temperatura del material, la energía térmica hace que vibren los átomos. En cualquier instante, el

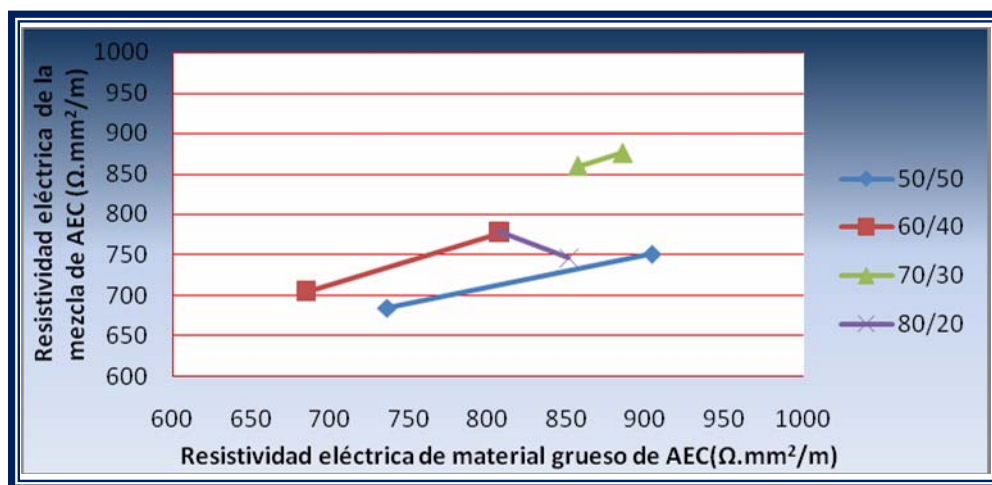
átomo puede no estar en su posición de equilibrio y por ello interactuará y dispersará electrones. Reduciendo la trayectoria libre media, la movilidad de los electrones y la resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica del material empleado en la fabricación de la pasta electrónica evaluada, se presentan en la tabla 4.4, en la cual se puede observar que a medida que se experimenta un incremento en la resistividad eléctrica del material grueso, proporcionalmente aumentará el de la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC). De igual forma en la figura 4.4 se aprecia que el valor máximo de resistividad eléctrica se obtuvo en la preparación de la pasta con relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 70:30 y el mínimo valor lo presentó el material empleado en la preparación de la colada 11-0739 elaborada a una relación de 50:50, esto asociado a que el horno de calcinación presentaba problemas operativos que fueron solventados mediante una parada del mismo para la realización de las correcciones correspondientes, quedando parte del material retenido dentro del horno y una vez puesto en marcha fue cargado con material crudo, contaminando el material allí contenido, lo que trae como consecuencia una alteración de los parámetros de calidad de la antracita una vez calcinada. Sin embargo, todos los valores se encuentran dentro de los estándares de trabajo recomendado por la Elkem cuyo rango va de 400 a 1.000  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  y los establecidos por Ferrovén, S.A. comprendidos entre 600-925  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

**Tabla 4.4** Resistividad eléctrica presentada por el material grueso y mezcla de AEC

| Relación grueso/fino en la mezcla de AEC | Colada N° | Resistividad eléctrica de la AEC ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) |           |           |              |           |           |           |              |
|--|-----------|---|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
|  |           | Grueso  |           |           |              | Mezcla    |           |           |              |
|  |           | Corrida 1   | Corrida 2 | Corrida 3 | Promedio     | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 | Promedio     |
| 50/50                                    | 10-0672   | 899,1   | 913,9     | 899,1     | <b>904,0</b> | 751,1     | 751,1     | 751,1     | <b>751,1</b> |
|  | 11-0739   | 732,6   | 740       | 736,3     | <b>736,3</b> | 680,8     | 688,2     | 684,5     | <b>684,5</b> |
| 60/40                                    | 09-0409   | 666   | 684,5     | 703       | <b>684,5</b> | 706,7     | 703       | 703       | <b>704,2</b> |
|  | 10-0564   | 814   | 814       | 795,5     | <b>807,8</b> | 777       | 777       | 777       | <b>777,0</b> |
| 70/30                                    | 10-0612   | 888   | 880,6     | 888       | <b>885,5</b> | 873,2     | 880,6     | 873,2     | <b>875,7</b> |
|  | 10-0615   | 865,8   | 854,7     | 851       | <b>857,2</b> | 854,7     | 865,8     | 858,4     | <b>859,6</b> |
| 80/20                                    | 10-0584   | 851   | 832,5     | 869,5     | <b>851,0</b> | 758,5     | 740       | 740       | <b>746,2</b> |
|  | 10-0595   | 795,5   | 814       | 814       | <b>807,8</b> | 777,7     | 777,7     | 777,7     | <b>777,7</b> |

Así mismo, se puede apreciar que para las mezclas preparadas con proporciones grueso/fino de 50:50, 60:40 y 70:30 se tuvo un incremento en la resistividad eléctrica del material grueso proporcional al de la mezcla. La mezcla preparada a relación 80:20 tuvo un comportamiento contrario a las demás, experimentando ante un incremento en la resistividad del material grueso una caída al paso de la corriente en la mezcla.



**Figura 4.4 Efecto de la resistividad eléctrica del material grueso sobre la resistividad eléctrica de la mezcla de AEC**

Cabe destacar, que el hecho de que el material grueso presente una resistividad eléctrica superior al de la mezcla de AEC, se debe a que el material fino no aporta partículas con tamaño superior a 0,5 mm a la mezcla de sólidos, es decir, las partículas de AEC empleadas en el ensayo de resistividad eléctrica de la mezcla corresponde a las partículas de tamaño inferior a 1,0 mm y superior a 0,5 mm que forman parte del material grueso empleado en la elaboración de la mezcla de material sólido utilizado en la fabricación de la pasta electródica. En las partículas con tamaño inferior a 1,0 mm presentes en el material grueso de antracita, durante el proceso de calcinación la transferencia de calor ocurre más rápidamente que en las partículas de mayor tamaño, esto asociado a que el área superficial es pequeña y por ende los volátiles son desprendidos a mayor velocidad y mayor eficiencia, disminuyendo la resistencia al paso de la corriente en mayor proporción en comparación con las partículas de tamaño superior a 1,0 mm.

En términos generales, se puede decir que la resistividad eléctrica de las partículas con tamaño superior a 1,0 mm va a ser mayor a la presentada por las partículas de tamaño inferior a 1,0 mm. Esto se encuentra asociado al contenido de volátiles presentado por la antracita durante el proceso de calcinación y la velocidad con la cual se desprendan éstos.

**4.2 Medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán, usada como materia prima en la fabricación de pasta electródica, a través de la norma ASTM D36-06**

La evaluación del punto de ablandamiento de la brea lote 2007, se efectuó en función de las variables tiempo-temperatura, realizándose un muestreo por triplicado, con el fin de cumplir los parámetros de calidad de la empresa Ferroven, S.A. En la

tabla 4.5 se presenta la temperatura promedio registrada por la brea de alquitrán alimentada actualmente al proceso de producción de pasta electrónica. Las temperaturas registradas experimentalmente se encuentran en su mayoría por debajo de los valores teóricos y la temperatura correspondiente a la temperatura de reblandecimiento se encuentra en 55°C. Para investigaciones pasadas se obtuvo un punto de ablandamiento para el lote de brea 2007 de aproximadamente 62°C, apreciándose una variación de 7°C, respecto al valor actual. El valor de la temperatura de ablandamiento de la brea se encuentra por debajo del valor mínimo establecido para el punto de reblandecimiento que se utiliza en la fabricación de pasta electrónica, la cual debe estar en el rango comprendido entre 60 – 70°C, y al valor reportado por los proveedores de 64°C. Por lo que se puede deducir que el grado de deformación presentado actualmente por los bloques y cilindros de pasta electrónica es debida a esta variación de temperatura, pues la pasta es almacenada a la intemperie, estando expuesta a temperaturas elevadas muy próximas a la temperatura de reblandecimiento presentada por la brea.

**Tabla 4.5** Temperatura de ablandamiento experimental presentada por la brea de alquitrán lote 2007

| PUNTO DE ABLANDAMIENTO |                          |                               |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Tiempo (min)           | Temperatura Teórica (°C) | Temperatura Experimental (°C) |
| 0                      | 5                        | 5                             |
| 1                      | 10                       | 10                            |
| 2                      | 15                       | 14                            |
| 3                      | 20                       | 19                            |
| 4                      | 25                       | 24                            |
| 5                      | 30                       | 30                            |
| 6                      | 35                       | 34                            |
| 7                      | 40                       | 38                            |
| 8                      | 45                       | 43                            |
| 9                      | 50                       | 47                            |



|    |    |    |
|----|----|----|
| 10 | 55 | 51 |
| 11 | 60 | 55 |

### **4.3 Fabricación de pasta electródica a relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada de 50:50, 60:40, 70:30 y 80:20 respectivamente, según procedimiento de fabricación de pasta electródica PFV-PRO021, y caracterizarlas físicamente en crudo a través de ensayos de plasticidad y densidad aparente**

Debido a que la pasta fabricada debe presentar propiedades físicas y mecánicas que le permitan ingresar al proceso de conformado de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg, fue necesario aplicar ensayos de densidad aparente y plasticidad a la pasta electródica elaborada a las diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC), que permitieran evaluar la calidad de la mezcla preparada.

#### **4.3.1 Densidad aparente**

La densidad de la masa puede variar, dependiendo del grado de empaquetamiento de los granos. La densidad de un fluido es una función exclusiva de la temperatura y la presión, como lo es cada una de las partículas individuales de un sólido, pero, en cambio, no ocurre lo mismo con la densidad global o aparente. La densidad global de la pasta electródica es mínima mientras menor sea el contenido de material grueso de antracita eléctricamente calcinada (AEC) y alcanza un máximo cuando se disminuye el contenido de material fino de AEC.

El valor de densidad aparente establecido por la empresa Ferroven, S.A. como parámetro de control es de  $1,57 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ . Tal como puede apreciarse en la tabla 4.6, los valores de densidad aparente presentados por la pasta electródica fabricada se encuentran en el orden de  $1,66 \text{ g/cm}^3$  y  $1,27 \text{ g/cm}^3$ , el máximo valor correspondiente

a la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 50:50 y la mínima a la relación 80:20, respectivamente; esto debido a que un mayor porcentaje de material grueso en la mezcla genera un mayor número de intersticios entre las partículas que conforman la mezcla, obteniendo así para un mismo volumen mayor cantidad de espacios vacíos y disminución de la masa de AEC.

**Tabla 4.6** Densidad aparente presentada por la pasta electrodica fabricada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC

| Relación grueso/fino de antracita calcinada en la mezcla | Colada N° | Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |           |           |
|--|-----------|--|-----------|-----------|
|  |           | Corrida 1                              | Corrida 2 | Corrida 3 |
| 50/50  | 10-0672   | 1,64                                   | 1,66      | 1,65      |
|  | 11-0739   | 1,66                                   | 1,66      | 1,66      |
| 60/40  | 09-0409   | 1,58                                   | 1,57      | 1,58      |
|  | 10-0564   | 1,59                                   | 1,61      | 1,60      |
| 70/30  | 10-0612   | 1,35                                   | 1,34      | 1,35      |
|  | 10-0615   | 1,35                                   | 1,33      | 1,34      |
| 80/20  | 10-0584   | 1,30                                   | 1,29      | 1,30      |
|  | 10-0590   | 1,28                                   | 1,25      | 1,27      |

En la figura 4.6, se observa la influencia ejercida por el aumento en la relación del agregado seco sobre la densidad de la pasta, siendo éstas inversamente proporcionales, es decir, al aumentar el porcentaje de material grueso presente en la mezcla disminuye la densidad aparente de la pasta electrodica fabricada.

Los valores de densidad aparente obtenidos para las relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada de 70:30 y 80:20, se encuentran por debajo del valor establecido por las especificaciones de calidad de la empresa. Por lo que puede inferirse que en lo que se refiere a la apertura de poros presentado por la pasta elaborada a estas relaciones, se experimentará un elevado volumen de poros, por no contar con una estructura carbonácea lo suficientemente compacta para disminuir los espacios entre las partículas grandes y las pequeñas, por la presencia

desproporcionada de partículas grandes respecto a las de menor tamaño. La densidad de la pasta por ende va a depender del porcentaje de material grueso presente en la mezcla y del grado de compactación de la misma.



**Figura 4.5 Densidad aparente promedio de la pasta eléctrica fabricada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC**

#### 4.3.2 Plasticidad

El comportamiento de las probetas de pasta eléctrica fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 70:30 y 80:20, no permitieron estimar un valor de plasticidad, debido a que éstos fueron tan elevados que no se pudieron medir. Cabe destacar, que dichas probetas no lograron permanecer el tiempo estipulado por el procedimiento dentro de la estufa, permaneciendo dentro de ésta sólo 5 min. Se puede apreciar en la tabla 4.7, que sólo cumplen con los valores recomendados por Elkem y establecidos por Ferroven, S.A. de entre 20 - 40% de plasticidad, para la pasta eléctrica que conforma los electrodos Söderberg de los hornos de arco eléctrico sumergido empleados en la

fabricación de aleaciones de silicio y manganeso; la pasta electródica elaborada a relación grueso/fino en la mezcla de antracita calcinada de 50:50 y 60:40.

En investigaciones realizadas anteriormente en la planta de pasta electródica perteneciente a la empresa Ferroven, S.A. se observó que los cilindros de pasta con plasticidad superior a 40 % presentaban deformaciones durante su almacenamiento. Es por ello que se busca durante la fabricación de la pasta electródica plasticidades que se encuentren dentro del rango establecido. Una de las formas de disminuir el valor de la misma, es aumentando el porcentaje de fino en la mezcla de AEC o disminuyendo el contenido de brea. Sin embargo, esta investigación se basó en la elaboración de pasta electródica manteniendo la receta de fabricación de la misma.

La pasta fabricada con relación de sólidos de 70:30 y 80:20, fueron descartadas para la aplicación de los ensayos de mecanizados, por no poseer la propiedad física más importante (plasticidad) con la cual debe contar la pasta que conforma los electrodos de auto – cocción. Esto debido a que la pasta electródica verde, una vez que entra a conformar los electrodos va experimentando un proceso de cocción en su avance progresivo sobre la bóveda del horno, que requiere que ésta presente un porcentaje de plasticidad suficiente como para permitir el desplazamiento relativo de la pasta con respecto a la virola, así como corregir las grietas y fisuras generadas. Una pasta con plasticidad infinita puede generar: (1) segregación entre las partículas debido a su tamaño; (2) elevado grado de fluidez debido a poco material capaz de absorber la brea lo que genera que los granos gruesos se separen de los finos alterando la distribución granulométrica de la pasta en algunas zonas, (3) filtraciones fuera del electrodo o ruptura del mismo dentro del proceso de producción de ferroaleaciones que trae como consecuencias, graves problemas dentro del proceso productivo y al personal que participa en el desarrollo de mismo.

**Tabla 4.7** Plasticidad presentada por la pasta electrónica elaborada a diferentes relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC

| Relación grueso/fino de antracita calcinada en la mezcla | Colada N° | Plasticidad (%) |           |           |
|--|-----------|-----------------|-----------|-----------|
|  |           | Corrida 1       | Corrida 2 | Corrida 3 |
| 50/50  | 10-0672   | 26,0            | 21,2      | 23,6      |
|  | 11-0739   | 20,0            | 19,0      | 19,5      |
| 60/40  | 09-0409   | 20,2            | 20,3      | 20,3      |
|  | 10-0564   | 30,1            | 31,0      | 30,6      |
| 70/30  | 10-0612   | ∞               | ∞         | ∞         |
|  | 10-0615   | ∞               | ∞         | ∞         |
| 80/20  | 10-0584   | ∞               | ∞         | ∞         |
|  | 10-0590   | ∞               | ∞         | ∞         |

#### 4.4 Determinación de apertura de poros, resistividad eléctrica, densidad aparente y niveles de compresión y flexión, que presenta la pasta electrónica cocida mediante métodos estandarizados para materiales carbonosos

De acuerdo a las especificaciones establecidas para la pasta electrónica cruda (densidad aparente de  $1,57 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  y plasticidad entre 20 – 40%) y teniendo en cuenta que en los estudios anteriores la pasta fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 70:30 y 80:20 no cumplieron con estos parámetros, se seleccionó la pasta elaborada a relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 50:50 y 60:40, como las más adaptadas a las exigencias de incrementar la eficiencia en la calidad de la pasta cocida. En la tabla 4.8 se presentan tabulados los parámetros físicos de la pasta electrónica cocida obtenidos éstos experimentalmente.

**Tabla 4.8** Parámetros físicos de la pasta electrodica cocida

| Relación grueso/fino de AEC | Colada N° | Corrida N° | Apertura de Poros (%) | Resistividad eléctrica ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) | Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|-----------------------------|-----------|------------|-----------------------|---|--|
| 50/50                       | 10-0672   | 1          | 11,14                 | 936,1   | 1,33   |
|                             |           | 2          | 13,13                 | 743,7   | 1,35   |
|                             | 11-0739   | 1          | 15,25                 | 788,1   | 1,39   |
|                             |           | 2          | 18,47                 | 780,7   | 1,38   |
| 60/40                       | 09-0409   | 1          | 11,21                 | 569,8   | 1,42   |
|                             |           | 2          | 9,750                 | 610,5   | 1,41   |
|                             | 10-0564   | 1          | 12,88                 | 710,4   | 1,35   |
|                             |           | 2          | 10,06                 | 714,1   | 1,33   |

#### 4.4.1 Apertura de poros

El volumen de poros presentado por las pastas fabricada se muestra en la tabla 4.8, en la cual se puede apreciar que la pasta fabricada a relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 50:50 presenta mayor volumen de poros con un valor promedio de 14,50%; en comparación con la elaborada a relación de 60:40 que presentó en promedio un volumen de poros igual a 11,00%. Esto debido a que el material precursor está en diferentes tamaños de partículas. Al compactar estas partículas de material para obtener la forma deseada, entre dichas partículas se forman poros, es decir, espacios vacíos. Durante el tratamiento térmico siguiente se generan canales o vías de escapes, desde el interior hacia el exterior de las probetas, formando grietas que afectan la eficacia de la pasta electrodica una vez cocida, es decir, al alcanzar una temperatura por encima de los 500°C la brea se volatiliza, y durante la salida de estos volátiles se generan grietas y disminución de la densidad aparente (con aumento de la porosidad); al ocurrir un reordenamiento de las partículas durante el proceso de cocción, mucha de la

porosidad es eliminada; aunque a veces ocurre que no es suficiente para eliminar por completo los poros, permaneciendo alguna porosidad permanente. La porosidad residual que presenta el material tendrá entonces, un efecto negativo en las propiedades elásticas y en la resistencia, lo cual genera que la pasta para una carga dada aumente el esfuerzo que actúa sobre ella; facilite el desplazamiento de los bordes de grano, incrementando la tasa de termofluencia, la generación de grietas y disminución de la resistencia mecánica.

#### **4.4.2 Resistividad eléctrica**

La resistividad eléctrica de la pasta tal como se muestra en la tabla 4.8, se mantuvo dentro de los estándares de calidad, con excepción de la pasta correspondiente a la colada 10-0672 donde se evidenció una variación respecto al valor estándar de aproximadamente  $136,1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , lo cual representa una desviación de 17,01% del valor teórico establecido. Así mismo, la resistividad eléctrica de la pasta electrodica cocida correspondiente a relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 50:50, experimentó un incremento en los valores de resistividad en comparación con los valores presentados por las mezclas preparadas a ésta relación (coladas 10-0672 y 11-0739). Evidenciándose en la resistividad presentada por la pasta fabricada a relación 60:40 un descenso en los valores.

En términos generales, la resistividad eléctrica de la pasta electrodica cocida experimentó una caída en comparación con la resistividad eléctrica presentada por el material grueso de AEC, empleada en su elaboración, debido a: (1) la proporción de cenizas de la pasta no usada queda aumentada en la pasta electrodica cocida (pues con el cocido sólo desaparece el aglutinante, mas no se volatilizan las cenizas) pero como al grafitar las cenizas se volatilizan, el 25% de éstas en la pasta grafitada disminuye notoriamente y (2) después de la cocción de la pasta electrodica ocurre un

aumento de la dureza de la pasta, cristalizándose la estructura de las probetas y haciéndola más unificada.

#### **4.4.3 Densidad aparente**

Como se observa en la tabla 4.8 la densidad aparente de la pasta electrónica cocida cumple con las especificaciones establecidas en el código Elkem A/S 242 A(apéndice B.6), cuyo valor exigido se encuentra entre 1,30 y 1,45 g/cm<sup>3</sup>. El máximo valor de densidad aparente se obtuvo para la colada 09-0409 con un valor de 1,42 g/cm<sup>3</sup> y el inferior para las coladas 10-0672 y 10-0564 cuyo valor corresponde a 1,34 g/cm<sup>3</sup>. Cumpliendo todos con los parámetros de calidad correspondientes a la pasta tipo “A” empleada en la conformación de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg.

Al comparar los valores de densidad presentados por las probetas de pasta cocida con los de la pasta verde, se puede apreciar una caída en los valores. Esto debido a la volatilización de la brea durante el proceso de cocción a los cuales fueron sometidas las probetas y al reordenamiento de las partículas. Obteniéndose un esqueleto carbonácea con buenas propiedades físicas a relaciones grueso/fino de AEC de 50:50 y 60:40.

Es importante señalar que las propiedades físicas de la pasta electrónica se encuentran asociada a los fenómenos experimentados por la pasta durante el proceso de cocción, entre los cuales se encuentran pérdidas de masa, transferencia de calor, pirolisis, coquificación, contracción, dilatación, además de procesos de reordenamiento molecular con las consecuencias que esto implica sobre la densidad, anisotropía, resistividad eléctrica y resistencia mecánica.



#### 4.4.4 Propiedades mecánicas

La pasta electródica una vez que pasa a conformar los electrodos de auto-cocción tipo Söderberg está sometida a fuerzas o cargas. Por esta situación es necesario conocer las características que presenta el material con la finalidad de fabricar mezclas que le brinden a la pasta propiedades de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca rotura. La selección de una receta de fabricación de pasta electródica se basa en adecuar las propiedades mecánicas a las condiciones de servicios requeridas por el componente. Se requiere que el material posea resistencia, por estar sometido a un gran esfuerzo y temperaturas elevadas, así como también a condiciones abrasivas.

Tal como se observa en la tabla 4.9 el máximo módulo de compresión se obtuvo para la relación 50:50 con un valor de 96,268 Kg-f/cm<sup>2</sup>, y el mínimo para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40, con valor de 60,934 Kg-f/cm<sup>2</sup>. Lográndose un comportamiento bastante uniforme para las probetas fabricadas a relaciones grueso/fino de 60:40, debido a que durante el proceso de cocción de las probetas fabricadas a ésta relación, hasta una temperatura de aproximadamente 950 °C, la brea se volatilizó dejando una estructura interna (esqueleto carbonoso) con mayor firmeza y posibilidad de generar resistencia mecánica.

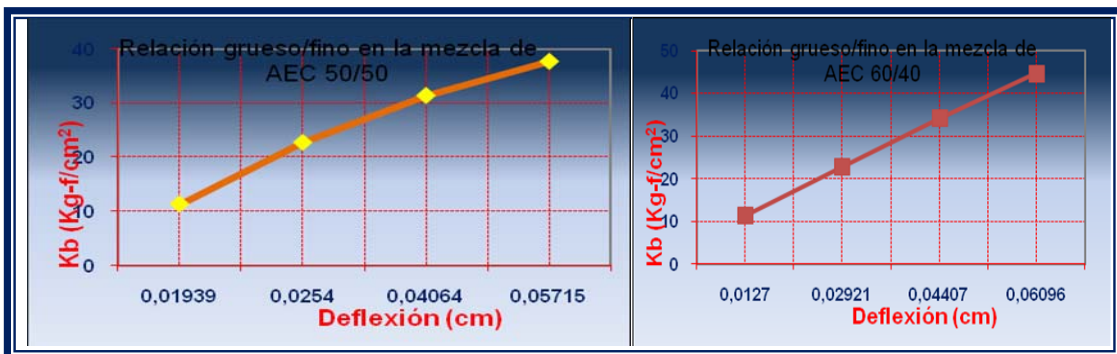
Los resultados obtenidos durante los ensayos de compresión aplicados a las probetas de pasta electródica cocida se encontraron fuera de los estándares de calidad establecidos por el procedimiento Elkem 242A, cuyo rango va de 150 – 250 Kg-f/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 4.9** Propiedades mecánicas de la pasta electrodica cocida

| Relación grueso/fino de AEC | Colada N° | Corrida N° | Módulo de compresión (Kg-f/cm <sup>2</sup> ) | Deflexión (cm) | Módulo de Flexión (Kg-f/cm <sup>2</sup> ) | Módulo de elasticidad (E) (Kg-f/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|-----------|------------|--|----------------|---|---|
| 50/50                       | 10-0672   | 1          | 82,488                                       | 0,0508         | 38,0                                      | 21.478  |
|                             |           | 2          | 63,623                                       | 0,0635         | 37,3                                      | 16.878  |
|                             | 11-0739   | 1          | 82,891                                       | 0,0508         | 28,8                                      | 16.336  |
|                             |           | 2          | 96,268                                       | 0,0508         | 28,8                                      | 16.336  |
| 60/40                       | 09-0409   | 1          | 85,450                                       | 0,0584         | 45,2                                      | 22.761  |
|                             |           | 2          | 84,940                                       | 0,0635         | 43,4                                      | 19.624  |
|                             | 10-0564   | 1          | 60,934                                       | 0,0762         | 36,2                                      | 13.664  |
|                             |           | 2          | 70,375                                       | 0,0762         | 33,9                                      | 12.776  |

Mientras que en los ensayos de flexión aplicados a las probetas de pasta cocida, se obtuvo que la relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC), que se ajustó a los parámetros de calidad establecidos por el código Elkem 242A (apéndice B.6), cuyo rango se encuentra entre 30,0 – 50,0 Kg-f/cm<sup>2</sup>, fue la preparada con una composición de 60% material grueso y 40% material fino. Encontrándose todos los valores obtenidos para esta relación dentro del rango establecido. Así mismo, se puede apreciar que el mayor módulo de rotura igual a 45,2 kg-f/cm<sup>2</sup>, se obtuvo para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40 y el valor mínimo obtenido igual a 28,8 Kg-f/cm<sup>2</sup>, corresponde a la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 50/50, presentando este ultimo valor una desviación del 4% respecto al valor mínimo requerido.

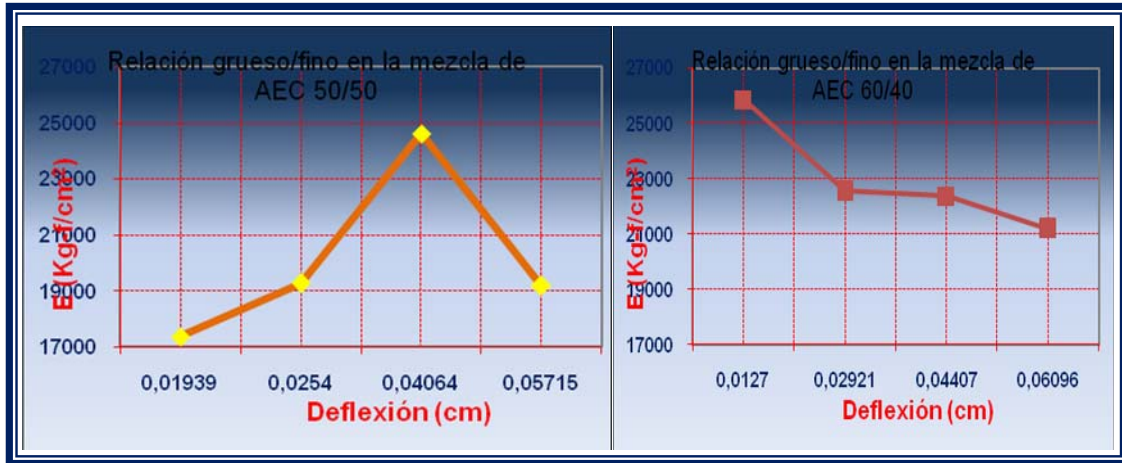
En la figura 4.6 se evidencia que la receta de sólido 60:40, empleada en la fabricación de pasta electrónica presenta el mayor módulo de elasticidad en comparación con la otra relación evaluada, lo cual representa que el material es más rígido, o sea, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada fuerza. La deformación elástica no es permanente, es decir, cuando se retira la fuerza, la pieza vuelve a su forma original. La aplicación de la carga corresponde al movimiento desde el origen a lo largo de la línea recta, hasta llegar a la carga máxima donde el material experimenta una fractura tipo A (módulo de flexión).



**Figura 4.6 Módulo de flexión promedio de la pasta electrónica fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 50/50 y 60/40 respectivamente**

La pendiente de la curva esfuerzo – deformación en su región elástica se muestra en la figura 4.7. Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de las partículas. La pasta fabricada a relación grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada de 50:50 experimentó un incremento en el módulo de elasticidad hasta alcanzar un esfuerzo de cedencia de  $24.607,00 \text{ Kg-f/cm}^2$ , punto en el cual se dio inicio a un descenso en los valores de elasticidad, hasta alcanzar  $19.178,00 \text{ Kg-f/cm}^2$  correspondiente al esfuerzo de ruptura. Mientras que los valores correspondientes a las probetas elaboradas a relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40 sufrieron un descenso progresivo en cuanto a los valores de módulo de

elasticidad en flexión arrojando un esfuerzo de cedencia igual a  $25.863,50 \text{ Kg-f/cm}^2$  y esfuerzo de rotura de  $21.192,50 \text{ Kg-f/cm}^2$ . Encontrándose el esfuerzo de cedencia y de rotura de la pasta fabricada a relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40 por encima del valor presentado por la relación 50:50.



**Figura 4.7 Módulo de elasticidad promedio presentada por la pasta electrónica fabricada a relaciones grueso/fino en la mezcla de AEC de 50/50 y 60/40**

El comportamiento mecánico en este ensayo, se realizó para observar la deformación plástica del material. Cuando se excedió el esfuerzo de cedencia, el material se deformó, es por ello que el módulo de elasticidad presentó una caída una vez alcanzado el punto correspondiente al esfuerzo de cedencia (máximo módulo de elasticidad). El componente falla, porque ya no tiene la forma original. Además, después que se inició el encuellamiento de la curva fue porque el material ya estaba muy deformado.

El módulo de elasticidad se hace mayor para la pasta fabricada a relación de sólidos de 60:40, presentando una mayor resistencia al esfuerzo a la fractura o ruptura.

Las propiedades de los materiales no arrojaron valores exactos, es decir, aún cuando los instrumentos de medida fueron los recomendados por los procedimientos

que rigieron esta investigación, existió siempre cierta dispersión o variabilidad en los resultados obtenidos en distintas probetas del mismo material. Por ejemplo, las probetas sometidas a los ensayos mecánicos, todas idénticas, preparadas a partir de la misma receta de fabricación y ensayadas todas en el mismo aparato, arrojaron resultados ligeramente distintos a las otras. Esto generó una variedad de valores de módulo de ruptura y compresión.

Existieron muchos factores capaces de producir esta inestabilidad, entre ellos la variación en la relación grueso/fino en la mezcla de AEC empleada en la fabricación de la pasta eléctrica, las variaciones en el proceso de fabricación de la probeta, la acción del operador y el equipo de calibración del aparato de medida. Además dentro del propio material pudieron existir inhomogeneidades y/o ligeras diferencias de composición de una colada a otra. Aunque se tomaron las medidas necesarias para que la posibilidad de errores en las medidas fuera el mínimo, así como para mitigar aquellos factores que pudieron generar la variabilidad en los resultados. Ésta dispersión también se evidenció para las otras propiedades evaluadas al material bajo estudio, tales como densidad aparente, apertura de poros y resistividad eléctrica.

La dispersión y variabilidad de las propiedades de los materiales fueron inevitables. A pesar de la inestabilidad de las propiedades medidas, es relevante especificar que la mayoría de estos valores se encontraron dentro de los valores típicos y/o estándares establecidos en el código Elkem 242A (apéndice B.6), el cual especifica el rango dentro de los cuales deben encontrarse las propiedades de mayor importancia con las que debe contar la pasta eléctrica tipo “A”, empleada en la conformación de los electrodos de auto-cocción tipo Söderberg utilizados por la empresa Ferroven, S.A. en los hornos de arco eléctrico sumergido en los cuales producen ferroaleaciones tales como silicomanganeso (SiMn), ferromanganeso (FeMn) y ferrosilicio (FeSi).

#### 4.5 CONCLUSIONES

1. El material grueso de AEC empleado en la fabricación de pasta electrónica bajo estudio en esta investigación presentó una desviación del 21% respecto a los valores establecidos en la PFV-PRO021, en cuanto al contenido de partículas con tamaño de grano superior de 6,30 e inferior a 9,50 mm.
2. El punto de ablandamiento de la brea de alquitrán empleada como aglomerante de las partículas gruesas y finas de AEC, en la fabricación de la pasta electrónica, es de 55°C. Estando por debajo de los requerimientos de producción de pasta tipo Söderberg (60-70 °C) y del valor reportado por los proveedores (64°C).
3. Al incrementar la relación grueso/fino en la mezcla de AEC disminuye la densidad aparente de la pasta, debido a que a mayor contenido de partículas gruesas en la mezcla se generan mayor cantidad de espacios vacíos (poros) disminuyendo la masa para un mismo volumen.
4. Las pastas fabricadas a relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 70:30 y 80:20, respectivamente; presentaron plasticidad infinita ocasionado por segregación entre las partículas debido a su tamaño, es decir, la mezcla no poseía suficiente material capaz de absorber el aglomerante lo cual generó la separación de las partículas gruesas y finas, mientras que la pasta fabricada a relación grueso/fino de 50:50 y 60:40 presentaron valores de plasticidad dentro de los parámetros de calidad de la empresa (20-40%).

5. El mayor volumen de poros lo presentó la pasta fabricada a relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 50:50, con valores entre 11,16 y 18,47%.
6. La pasta fabricada a relación 60:40 presentó un esqueleto carbonoso con partículas más unificadas y por ende con mayor resistencia a los cambios o procesos de mecanizados a los cuales fue sometido.
7. El mayor módulo de rotura igual a  $45,2 \text{ kg-f/cm}^2$ , se obtuvo para la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 60:40 y el valor mínimo obtenido igual a  $28,8 \text{ Kg-f/cm}^2$ , corresponde a la relación grueso/fino en la mezcla de AEC de 50:50, encontrándose este último fuera de los estándares de calidad establecidos por el procedimiento Elkem A/S 242A (30-50  $\text{Kg-f/cm}^2$ )
8. La relación grueso/fino en la mezcla de AEC que proporcionó las propiedades físicas y mecánicas más adaptadas a las exigencias de incrementar la eficiencia en la calidad de la pasta electrónica cocida fue la relación 60:40.

#### **4.6 RECOMENDACIONES**

- 1.** Evaluar el comportamiento diario de la granulometría del material empleado en la fabricación de la pasta electrónica (material fino y grueso de AEC), así como también de las mezclas preparada para la fabricación de las diferentes coladas de pasta y el porcentaje de plasticidad de esta última.
- 2.** Establecer el ensayo de punto de ablandamiento de la breca como un ensayo de rutina, con la finalidad de comprobar que la breca adquirida por la empresa cumpla con los estándares de calidad exigidos por Ferroven, S.A. y reportado por los proveedores.
- 3.** Emplear breca de alquitrán con punto de reblandecimiento superior a los 70°C, con la finalidad de disminuir el grado de deformación presentado por la pasta electrónica.
- 4.** Reparar el horno empleado en la cocción de las probetas de pasta electrónica, evaluadas en esta investigación, debido a que su estructura se encuentra bastante deteriorada.
- 5.** Hacer mantenimiento correctivo y calibración al equipo empleado en la medición de resistividad eléctrica.



## BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. HERNÁNDEZ, María. **“Evaluación del efecto que produce la relación pasta electródica/arcilla sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la mezcla tapa piqueras para un horno de aleaciones de manganeso”**. UNEXPO. Ciudad Guayana, Octubre (2008).
2. GONZALEZ, Neglys. **“Influencia de la plasticidad y grado de enfriamiento en la deformación de los bloques y cilindros de pasta electródica producidos en Ferroven S.A”**. UNEXPO. Ciudad Guayana, Octubre (2008).
3. RALPH, SETTON. **“Carbon molecules and materials**. Editorial Taylor & Francis. USA (2.002).
4. SIEGFRIED Wilkening. **“Erosion Rate Testing of Graphite Cathode Materials, Light Metals”**. Marzo (2005).
5. Mc CABE, Warren. **“Operaciones unitarias en Ingeniería Química”**. Editorial McGraw-Hill. 4<sup>ta</sup> edición: España (1991).
6. Manual de operaciones de planta de pasta electródica. Ferroven.
7. INZUNZA, Evelyn. **“Protección del cátodo de las celdas electrolíticas con recubrimientos basados en TiB<sub>2</sub>”**. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Julio de (2007).

8. RUDOLF P. Pawlek. **“Aluminium Wettable Cathodes: An Update, Light Metals”**. Febrero (2000).
9. RAYMOND C. Perruchoud, Kirstine L. Hulse, Urs Buhlen and Wernwr K. Fisher. **“Light Metals”**. Julio (1987).
10. MORENO, Enrique. **“Tecnología de producción del ferrosilicio”**. 3<sup>era</sup> Edición. Venezuela (2005).
11. GONZÁLEZ, Oscar. **“Control de Calidad de la Pasta Söderberg”**.
12. Norma estandar internacional ISO 12985-2. **“Carbonaceous materials used in the production of aluminium – Baked anodes and cathode block. Determination of apparent density and of open porosity using a hydrostatic method. ISO (2000)**.
13. MANGANON, Pat L. **“Ciencia de materiales. Selección y diseño”**. Editorial Prentice Hall. 1<sup>era</sup> Edición. Mexico (2001). Páginas 124-137.
14. SMITH, Willians. **“Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales”**. Editorial McGraw Hill. 4<sup>ta</sup> Edición. México (2006). Páginas 786-798.
15. BEDFORD, Anthony. **“Mecánica de materiales”**. Editorial Prentice Hall. 1<sup>era</sup> edición. Colombia: (2002). Páginas 524-542.
16. GONZALEZ, Neglys. **“Influencia de la plasticidad y grado de enfriamiento en la deformación de los bloques y cilindros de pasta eléctrica producidos en Ferroven S.A”**. UNEXPO. Ciudad Guayana, Octubre (2008).

17. David G. de Oliveira, Eduardo N. Cernach. **O Electrodo Söderberg, Sua Operação esen consumo**. II Seminario sobre operación del electrodo Söderberg. Victoria –España. **1986**.
18. A.G. Arneses, R. Innvaer, L. Olsen y S. Okstand. **Operación de Electroodos Söderberg**. ILAFA-Ferroaleaciones (**1978**).
19. HERNANDEZ, María. **“Caracterización de mezcla tapa piqueras del horno IV de producción de aleaciones de manganeso de Ferroatlántica de Venezuela, S.A. (Ferroven, S.A.)”**. UNEXPO. Ciudad Guayana, Octubre (**2007**).
20. ERROL G. Kelly; David J. **“Introducción al procesamiento de minerales”**. Editorial Limusa. Mexico D.F.
21. CALLISTER, William D. **“Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”**. Editorial Reverté. 4<sup>ta</sup> edición. México (**2004**).

## BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. CEGARRA, Cesar. **“Evaluación y optimización del proceso de obtención de antracita calcinada en planta de pasta electrodica de la empresa Ferroven, S.A”**. UNEXPO. Ciudad Guayana, Enero (2005).
2. Norma estándar internacional ISO 12986-1. **“Carbonaceous materials used in the production of aluminium – Prebaked anodes and cathode block. Determination of bending/shear strength by a three-point method. ISO (2000).**
3. Norma estándar internacional ISO 18515. **“Carbonaceous materials for the production of aluminium – Cathode block and baked anodes. Determination of compressive strength. ISO (2000)**
4. ASKELAND, Donald R. **“Ciencia e ingeniería de los materiales”**. Editorial: International Tomson Editores. 3<sup>era</sup> edición: México (1998).
5. GEANKOPLIS, C.J. **“Proceso de transporte y operaciones unitarias”**. Editorial Continental, S.A. de C.V. 3<sup>era</sup> edición: México (1998).
6. ARIAS, Fidas. **“El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica”**. Editorial Episteme. 5<sup>ta</sup> edición: Marzo (1997).
7. HIMMELBLAU, David M. **“Principios básicos y cálculos en ingeniería química”**. Editorial Prentice-Hall. 6<sup>ta</sup> edición: México (1997).

8. AVNER, Sydney H. **“Introducción a la metalurgia física”**. Editorial McGraw-Hill. 2<sup>da</sup> edición: México (1995).
9. Manual de procedimientos Elkem. **“Elektrokemisk A/S”**. Oslo – Noruega. Enero (1980).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>TÍTULO</b>    | "Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la pasta electródica empleada en la conformación de electrodos de auto-cocción tipo Söderberg" |
| <b>SUBTÍTULO</b> |  |

**AUTOR (ES):**

| <b>APELLIDOS Y NOMBRES</b> | <b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>                                       |
|----------------------------|--|
| AROCHA R., MARLLELYN V.    | <b>CVLAC:</b> 17.113.291<br><b>E MAIL:</b> marllelyn18@hotmail.com |
|                            | <b>CVLAC:</b><br><b>E MAIL:</b>                                    |
|                            | <b>CVLAC:</b><br><b>E MAIL:</b>                                    |
|                            | <b>CVLAC:</b><br><b>E MAIL:</b>                                    |

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**


---

Propiedades físicas

---

Propiedades mecánicas

---

Pasta electródica cruda

---

Pasta electródica cocida

---

Electrodos Söderberg

---

Rotura de electrodo

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

| ÁREA                           | SUBÁREA            |
|--------------------------------|--------------------|
| INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADA | INGENIERÍA QUÍMICA |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |
|                                |                    |

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La presente investigación está dedicada a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la pasta electrodica empleada en la conformación de electrodos de auto- cocción tipo Söderberg, con la finalidad de incrementar su eficiencia dentro del proceso de reducción de metales llevado a cabo en hornos de arco eléctrico sumergido; mediante caracterización física del material sólido alimentado al proceso, medición del punto de ablandamiento de la brea de alquitrán empleada como aglomerante del agregado seco, fabricación de pasta a relaciones grueso/fino en la mezcla de antracita eléctricamente calcinada (AEC) de 50:50; 60:40; 70:30 y 80:20, respectivamente. Obteniéndose que la relación grueso/fino en la mezcla que proporcionó propiedades físicas y mecánicas más adaptadas a las exigencias de incrementar la eficiencia en la calidad de la pasta fue la relación 60:40.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

| <b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>                            | <b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b> |                                |              |              |              |
|---|------------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>PARRA FRANK</b><br><br><b>ASESOR ACADÉMICO</b>     | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>                      | <b>AS(x)</b> | <b>TU</b>    | <b>JU</b>    |
|   | <b>CVLAC:</b>                      |                                |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      | <b>frankparra@hotmail.com</b>  |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      |                                |              |              |              |
| <b>MORENO ENRIQUE</b><br><br><b>ASESOR INDUSTRIAL</b> | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>                      | <b>AS</b>    | <b>TU(x)</b> | <b>JU</b>    |
|   | <b>CVLAC:</b>                      | <b>8.942.325</b>               |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      | <b>emoreno@ferroven.com.ve</b> |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      |                                |              |              |              |
| <b>BITTAR SIMÓN</b><br><br><b>JURADO PRINCIPAL</b>    | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>                      | <b>AS</b>    | <b>TU</b>    | <b>JU(x)</b> |
|   | <b>CVLAC:</b>                      | <b>3.957.961</b>               |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      | <b>SBittar@gmail.com</b>       |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      |                                |              |              |              |
| <b>OCHOA OSVALDO</b><br><br><b>JURADO PRINCIPAL</b>   | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>                      | <b>AS</b>    | <b>TU</b>    | <b>JU(x)</b> |
|   | <b>CVLAC:</b>                      |                                |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      | <b>osvaldo.ochoa@gmail.com</b> |              |              |              |
|   | <b>E_MAIL</b>                      |                                |              |              |              |

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

|             |            |            |
|-------------|------------|------------|
| <b>2010</b> | <b>04</b>  | <b>20</b>  |
| <b>AÑO</b>  | <b>MES</b> | <b>DÍA</b> |

**LENGUAJE. SPA**



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

| <b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>                                     | <b>TIPO MIME</b>   |
|--|--------------------|
| TESIS. Evaluación de propiedades de pasta<br>electrónica.doc | Application/msword |
|  |                    |

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L M N O P  
Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5  
6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN (Ciudad Guayana) **(OPCIONAL)**

**TEMPORAL:** Diez (10) meses **(OPCIONAL)**

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero químico

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pre-grado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería química

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado \_\_\_\_\_  
 "Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y  
 sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de  
 Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario"  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

AROCHA R. MARLLELYN V.

**AUTOR**

**AUTOR**

**AUTOR**

PARRA FRANK

BITTAR SIMÓN

OCHOA OSVALDO

**TUTOR**

**JURADO**

**JURADO**

SALAS IRAIMA

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**

