

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

OBTENCIÓN DE COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CARBONES ACTIVADOS UTILIZADOS EN LA ADSORCIÓN DEL COMPLEJO CIANURO- ÁURICO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

CRISTHIAN YOVANNI FEIJOO LOAYZA
cristhian.feijoo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVÍN Ph.D
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, Junio 2017

© Escuela Politécnica Nacional (2017)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Cristhian Yovanni Feijoo Loayza, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cristhian Yovanni Feijoo Loayza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Yovanni Feijoo Loayza, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre PhD.

DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIS 39-12, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios, por llenarme de bendiciones en el transcurso de la carrera, él siempre estuvo y estará conmigo en todos los proyectos que me proponga. Gracias por protegerme y llenarme de alegría en los momentos difíciles.

A toda mi familia, por haberme ayudado todo este tiempo. Me siento bendecido con mis papás Consuelo y Luis, que han cuidado de mí y me han ayudado toda la vida. Ellos son todo para mí. Dios los llene de bendiciones y los proteja.

A mis hermanos Wilson y Miguel, más que hermanos, son los mejores amigos que he podido conocer. Gracias por estar conmigo. También, a mis cuñadas Mary y Karen, gracias por alegrarme todo el tiempo que las he conocido.

Al Ing. Ernesto, por haber contado con su ayuda en el desarrollo de este proyecto, con sus consejos fue posible lograr todos los objetivos que me había planteado.

A toda la familia DEMEX: Inges Dianita, Eddy, Alicia, Eve, Verito, Anilu, Isaac y Wilmer, gracias por contar con su ayuda. Fue una bonita experiencia trabajar con ustedes. La calidez humana que me demostraron, hacen al DEMEX, el mejor departamento de la universidad.

A mi amiga incondicional Pauly, que siempre estuvo en las buenas y en las malas. Gracias por los consejos que me ayudaron un montón. Siempre llevaré en mi corazón todos los momentos felices que vivimos.

A don Kleverito, por ser un gran amigo y un padre para todos los tesisistas. Sus consejos, nos ayudaron mucho cuando teníamos muchas dudas.

Al Doc. Uribe, su apoyo incondicional fue muy importante para el desarrollo del proyecto. Asimismo, me demostró su amistad, que la supe valorar. A Doña Ruth y al Ing. Chico, por ayudarme todo este tiempo.

A mis amigos de la carrera, por contar con su apoyo y su amistad. Principalmente, a mis amigas de estudio Jessy, Zory, Lis, Eri, Ger y Paty, sin ustedes no hubiera logrado muchas cosas. Me demostraron su sincera amistad y todo este tiempo me sentí bendecido por su compañía.

A mis amigos tesistas Pato, Irene, Stalin C, Jenny, Vale, Raque, Stefy, Moni, Diego, Carlita, Pullas y Eve, por ayudarnos mutuamente. Con ustedes aprendí muchas cosas. Recordaré sus temas de conversación que fueron muy divertidos. Espero que les vaya bien en sus vidas profesionales.

A mis amigos del Coro: Gabo L, Andrés E, Karencita, Belen C, Cami, Sarita, Saúl, Diego, Gabo P, Armando y Richard, por estar conmigo en todo momento, siempre buscaban la manera de alegrarme el día. Para mí, ustedes son mis cantantes favoritos, siempre los recordaré en mi mente. Al Profe, por haberme enseñado que la música es el mejor regalo para la mente y el cuerpo.

A mi amiga Lucy, que siempre estuvo en las buenas y en las malas, te agradezco un montón por toda la ayuda. Eres una gran amiga y espero que todo te vaya bien.

A mis amigos y profesores del francés con los cuales aprendí muchas cosas.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos y a las personas que de alguna manera estuvieron y fui conociendo en la vida universitaria.

DEDICATORIA

A mi Dios, por llenarme de bendiciones y cuidarme todo este tiempo.

A mis Padres Luis y Consuelo, por su apoyo incondicional.

Y a mi sobrina querida Dudu, que siempre me llena de alegría.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xix
INTRODUCCIÓN	xxi
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. El carbón activado: definición, activación y aplicaciones	1
1.1.1. Definición de carbón activado	1
1.1.1.1. Porosidad en carbones	1
1.1.1.2. Grupos funcionales constituyentes del carbón	2
1.1.1.3. Clasificación de los carbones activados	2
1.1.1.4. Propiedades de los carbones activados	3
1.1.1.5. Características físico-químicas	8
1.1.2. Activación de materiales carbonosos	9
1.1.2.1. Carbonización	10
1.1.2.2. Activación	10
1.1.3. Aplicaciones de los carbones activados	12
1.1.3.1. Principales aplicaciones del carbón activado en la industria	12
1.1.3.2. Isotermas de adsorción	14
1.2. Técnicas aplicadas al mejoramiento de propiedades mecánicas de carbones activados granulares	15
1.2.1. El vidrio	15
1.2.1.1. Definición del vidrio	15
1.2.1.2. Materias primas utilizadas en la fabricación de vidrios	17
1.2.1.3. Diagramas de fases ternarios para fusión de vidrios	20
1.2.1.4. Clasificación del vidrio	21
1.2.1.5. Aplicaciones del vidrio	27
1.2.1.6. Impregnación de vidrio en carbón activado	28

1.2.2. Los polímeros	29
1.2.2.1. Aplicaciones de los polímeros	29
1.2.2.2. Impregnación de resinas poliméricas en carbón activado	30
1.2.3. Polisilano	31
1.2.3.1. Usos de los polisilanos	32
2. PARTE EXPERIMENTAL	33
2.1. Evaluación de la influencia de la impregnación de vidrio para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del carbón	35
2.1.1. Evaluación de la utilización de metasilicato de sodio pentahidratado para la formulación e impregnación de vidrio en la superficie del carbón activado	36
2.1.1.1. Determinación de la cantidad de carga fundente a impregnarse en el carbón activado	36
2.1.1.2. Determinación de la temperatura de fusión y composición de la carga fundente	37
2.1.1.3. Determinación del tiempo de fusión de los compósitos	38
2.1.2. Evaluación de la utilización de vidrio de botellas recicladas en el proceso de impregnación	38
2.1.2.1. Determinación de la composición, granulometría y temperatura de fusión de la carga fundente	40
2.1.2.2. Determinación de la dureza de carbones impregnados en función de la carga fundente	40
2.1.3. Evaluación de la utilización de fritas de esmaltado como endurecedor de la superficie del carbón activado	41
2.1.3.1. Determinación de la temperatura de fusión de la carga fundente	41
2.1.3.2. Determinación de la cantidad de carga fundente impregnada en el carbón	43
2.1.3.3. Determinación del tiempo de fusión de los compósitos	43

2.2. Evaluación de la impregnación de polisilano en carbón activado para mejorar las propiedades mecánicas del carbón	43
2.3. Caracterización de los carbones activados y los compósitos obtenidos	44
2.3.1. Caracterización físico-química de los carbones activados y compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano	44
2.3.1.1. Determinación de la dureza	44
2.3.1.2. Determinación de pérdidas por atrición	45
2.3.1.3. Análisis próximo	46
2.3.1.4. Determinación del índice de yodo	49
2.3.2. Caracterización estructural del carbón activado y compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano	50
2.3.2.1. Análisis de las muestras por Microscopía Óptica	50
2.3.2.2. Análisis de las muestras por Microscopía Electrónica de Barrido	50
2.3.2.3. Análisis BET de los carbones obtenidos	51
2.3.2.4. Análisis por Fluorescencia de rayos X del vidrio reciclado y de las fritas de esmalte	51
2.4. Determinación de la capacidad de adsorción del complejo cianuro-áurico en el carbón activado y en los compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano	52
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1. Evaluación de la influencia de la impregnación de vidrio para el mejoramiento de la dureza del carbón activado	54
3.1.1. Evaluación de la utilización de metasilicato de sodio pentahidratado para la formulación e impregnación de vidrio en la superficie del carbón activado	54
3.1.1.1. Influencia de la cantidad de carga fundente impregnada en el carbón	54
3.1.1.2. Influencia de la temperatura de fusión y composición de la carga fundente	56

3.1.1.3. Influencia del tiempo de fusión de los compósitos	58
3.1.2. Evaluación de la utilización de vidrio de botellas recicladas en el proceso de impregnación	59
3.1.2.1. Influencia de la temperatura de fusión de la carga fundente	60
3.1.2.2. Determinación de la dureza de carbones impregnados en función de la carga fundente	67
3.1.3. Evaluación de la utilización de fritas de esmalte como endurecedor de la superficie del carbón activado	68
3.1.3.1. Influencia de la temperatura de fusión de la carga fundente	70
3.1.3.2. Determinación de la dureza de los carbones impregnados con fritas en función de la carga fundente	77
3.1.3.3. Influencia del tiempo de fusión de los compósitos	78
3.2. Evaluación de la impregnación de polisilano en carbón activado para el mejoramiento de la dureza del carbón activado	79
3.3. Caracterización de los carbones activados y los compósitos obtenidos	81
3.3.1. Propiedades mecánicas	81
3.3.1.1. Determinación de la dureza	81
3.3.1.2. Determinación de las pérdidas por atrición	82
3.3.2. Análisis próximo	84
3.3.3. Propiedades de adsorción	86
3.3.3.1. Determinación del índice de yodo y del área superficial BET	86
3.3.4. Caracterización estructural del carbón activado y compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano	89
3.3.4.1. Microscopía óptica de los carbones	89
3.3.4.2. Microscopía electrónica de barrido de los carbones	94
3.4. Determinación de la capacidad de adsorción del complejo cianuro-áurico en el carbón activado y en los compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano	100

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
4.1. Conclusiones	102
4.2. Recomendaciones	104
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	116

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Propiedades de carbones activados comerciales	8
Tabla 1.2.	Composiciones químicas de vidrios comerciales	26
Tabla 3.1.	Compósitos de carbón CBA-vidrio a diferentes temperaturas y composiciones de carga fundente con tiempo de fusión de 3 h y 50 g de carga	57
Tabla 3.2.	Análisis químicos del vidrio reciclado por fluorescencia de rayos X	60
Tabla 3.3.	Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 900 °C y 1 h de meseta	62
Tabla 3.4.	Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 950 °C	64
Tabla 3.5.	Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 1 000 °C	66
Tabla 3.6.	Influencia de la impregnación de vidrio en la dureza de los compósitos carbón-vidrio reciclado (t= 1 h)	67
Tabla 3.7.	Análisis químicos de las fritas de esmalte por fluorescencia de rayos X	69
Tabla 3.8.	Temperaturas de fusión de las cargas fundentes constituidas por las diferentes composiciones de fritas de esmalte	70
Tabla 3.9.	Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 600 °C y t= 1 h)	73
Tabla 3.10.	Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 700 °C y t= 1 h)	74

Tabla 3.11.	Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 800 °C y t= 1 h)	76
Tabla 3.12.	Influencia de la utilización de diferentes fritas y de la masa de carga fundente en la dureza de los compósitos carbón-frita de esmalte (80 % frita, t= 1 h)	77
Tabla 3.13.	Dureza del carbón de baja activación, carbón activado de cuesco de palmiste y compósitos	81
Tabla 3.14.	Pérdidas por atrición de carbones activados y compósitos	83
Tabla 3.15.	Contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo del carbón activado y compósitos	85
Tabla 3.16.	Valores del índice de yodo del carbón activado y de los compósitos	87
Tabla 3.17.	Fotografías de microscopía óptica del carbón activado CAA con sus diferentes morfologías	90
Tabla 3.18.	Fotografías de microscopía óptica del compósito carbón activado-vidrio sales fundentes CAVS	91
Tabla 3.19.	Fotografías del compósito carbón activado-vidrio reciclado CAVR	92
Tabla 3.20.	Fotografías del compósito carbón activado-vidrio fritas de esmalte CAFE	93
Tabla 3.21.	Fotografías del compósito carbón activado-polisilano CASIL	94
Tabla AI.1.	Ensayo de dureza de carbón de bajo grado de activación	119
Tabla AI.2.	Ensayo de dureza del carbón activado	119
Tabla AI.3.	Factor de corrección para la determinación del índice de yodo	1233

Tabla AI.4.	Ensayos de índice de yodo del carbón de baja activación	1244
Tabla AI.5.	Ensayos del índice de yodo del carbón activado	1244
Tabla AI.6.	Ensayo de determinación de humedad del carbón activado	1255
Tabla AI.7.	Ensayo de determinación de materia volátil del carbón activado	1266
Tabla AI.8.	Ensayo de determinación de contenido de total de cenizas y carbón fijo del carbón activado	1277
Tabla AI.9.	Ensayos de cinética de adsorción de oro en el carbón activado ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)	12929
Tabla AII.1.	Ensayos de determinación de la cantidad de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C y t= 3 h)	1311
Tabla AII.2.	Composición química de la carga fundente constituida de 75 % $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y 25 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1322
Tabla AII.3.	Porcentaje de humedad de las cargas fundentes y pérdidas totales en la producción de compósitos carbón-vidrio sales fundentes	1333
Tabla AII.4.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 900 °C, t= 3 h y CF= 50 g)	1355
Tabla AII.5.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C, t= 3 h y CF= 50 g)	1377
Tabla AII.6.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 1 000 °C, t= 3 h y CF= 50 g)	139

Tabla AII.7.	Ensayos de determinación del tiempo de fusión de la carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C, CF= 50 g y 75 % Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O)	1411
Tabla AII.8.	Impregnación de sales fundentes en carbón activado con las mejores condiciones (T= 950 °C, CF= 50 g, 75% Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O y t= 1 h)	1433
Tabla AII.9.	Composición química de la carga fundente constituida por 75 % metasilicato y 25 % bórax	1444
Tabla AII.10.	Datos bibliográficos de relaciones de R _{máx} y de SiO ₂ /B ₂ O ₃	1455
Tabla AII.11.	Composición química de la carga fundente constituida por 50 % metasilicato y 50 % bórax	1466
Tabla AII.12.	Composición química de la carga fundente constituida por 25 % metasilicato y 75 % bórax	1477
Tabla AII.13.	Temperatura de fusión de los vidrios obtenidos con las composiciones de las sales fundentes	1488
Tabla AIII.1.	Resultados del análisis de fluorescencia de rayos X del vidrio reciclado	14949
Tabla AIII.2.	Composición química de la carga fundente constituida por 95 % vidrio reciclado y 5 % bórax	15050
Tabla AIII.3.	Composición química de la carga fundente constituida por 90 % vidrio reciclado y 10 % bórax	150
Tabla AIII.4.	Composición química de la carga fundente constituida por 80 % vidrio reciclado y 20 % bórax	1511
Tabla AIII.5.	Ensayo de pulverización y tamizado de vidrio de botellas recicladas	1522

Tabla AIII.6.	Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones (T= 900 °C y t= 1 h)	1533
Tabla AIII.7.	Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones (T= 950 °C y t= 1 h)	1544
Tabla AIII.8.	Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones (T= 1 000 °C y t= 1 h)	1555
Tabla AIII.9.	Ensayo de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 900 °C, 90% vidrio y dp= +150 µm)	1577
Tabla AIII.10.	Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp= +150 µm)	15959
Tabla AIII.11.	Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp= -15 +38 µm)	16161
Tabla AIII.12.	Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp=-38 µm)	1633
Tabla AIII.13.	Ensayos de determinación de los parámetros estudiados para la impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón (T= 950 °C, dp= +150 µm, 10% vidrio y t= 1 h)	1655
Tabla AIV.1.	Resultados del análisis de fluorescencia de rayos X de las fritas de esmalte	1666
Tabla AIV.2.	Composición química de la carga fundente constituida por 95 % frita 1 de esmalte y 5 % bórax	1677
Tabla AIV.3.	Composición química de la carga fundente constituida por 90 % frita 1 de esmalte y 10 % bórax	1688

Tabla AIV.4.	Composición química de la carga fundente constituida por 80 % frita 1 de esmalte y 20 % bórax	1688
Tabla AIV.5.	Composición química de la carga fundente constituida por 95 % frita 2 de esmalte y 5 % bórax	169
Tabla AIV.6.	Composición química de la carga fundente constituida por 90 % frita 2 de esmalte y 10 % bórax	169
Tabla AIV.7.	Composición química de la carga fundente constituida por 80 % frita 2 de esmalte y 10 % bórax	1700
Tabla AIV.8.	Composición química de la carga fundente constituida por 95 % frita 3 de esmalte y 5 % bórax	1700
Tabla AIV.9.	Composición química de la carga fundente constituida por 90 % frita 3 de esmalte y 10 % bórax	1711
Tabla AIV.10.	Composición química de la carga fundente constituida por 80 % frita 3 de esmalte y 10 % bórax	1711
Tabla AIV.11.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte (T= 600 °C y t= 1h)	1722
Tabla AIV.12.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte (T= 700 °C y t= 1 h)	1733
Tabla AIV.13.	Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte (T= 800 °C y t= 1h)	1744
Tabla AIV.14.	Ensayos de determinación de la composición y cantidad de frita de esmalte impregnada en carbón (T= 700 °C y 80% FE2)	1766
Tabla AIV.15.	Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de frita de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 50 g)	1788

Tabla AIV.16.	Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de frita de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 100 g)	1800
Tabla AIV.17.	Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de frita de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 150 g)	1822
Tabla AIV.18.	Ensayos de determinación del tiempo de fusión de la frita de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C, 80% FE2 y CF= 100 g)	1844
Tabla AIV.19.	Ensayos de determinación de los parámetros estudiados para la impregnación de frita de esmalte en carbón (T= 800 °C, 80% FE2, 100 g CF y t= 1 h)	1866
Tabla AV.1.	Ensayos de determinación del volumen de polisilano a impregnarse en carbón activado	1888
Tabla AV.2.	Ensayos de impregnación de polisilano en carbón activado (50 mL polisilano)	189
Tabla AVI.1.	Ensayos de atrición de carbones activados y de compósitos carbón activado - vidrio y carbón activado-polisilano	1922
Tabla AVII.1.	Ensayos de determinación de porcentajes de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo de carbones activados	1944
Tabla AVII.2.	Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio sales	195
Tabla AVII.3.	Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio reciclado	1977
Tabla AVII.4.	Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio fritas	1977
Tabla AVII.5.	Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-polisilano	1988

Tabla AVIII.1.	Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compuesto carbón activado-vidrio sales fundentes ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)	199
Tabla AVIII.2.	Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compuesto carbón activado-vidrio reciclado ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)	2000
Tabla AVIII.3.	Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compuesto carbón activado-vidrio frita de esmalte ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)	2011
Tabla AVIII.4.	Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compuesto carbón activado-polisilano ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)	2022

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Efecto de la temperatura en la entalpía en la formación de un vidrio	16
Figura 1.2.	Diagrama de fases ternario	21
Figura 1.3.	Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$	22
Figura 1.4.	Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$	24
Figura 1.5.	Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	24
Figura 1.6.	Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$	25
Figura 1.7.	Recuperación de oro versus el tiempo para el carbón activado y el compuesto carbón activado-vidrio	29
Figura 1.8.	Recuperación de oro versus el tiempo para el carbón activado y el compuesto carbón activado-resina fenólica HL-46	31
Figura 2.1.	Diagrama de flujo general del proceso	35
Figura 2.2.	Diagrama de flujo del proceso de impregnación de sales fundentes en el carbón	36
Figura 2.3.	Diagrama de flujo del proceso de impregnación de vidrio reciclado en el carbón	39
Figura 2.4.	Diagrama de flujo del proceso de impregnación de fritas de esmalte en el carbón	42
Figura 2.5.	Diagrama de flujo del proceso de impregnación de polisilano en el carbón	44
Figura 3.1.	Influencia de la cantidad de carga fundente en la dureza (75 % metasilicato y 25 % bórax, $T=950\text{ }^\circ\text{C}$, $t=3\text{ h}$)	55

Figura 3.2.	Compósitos de CBA-vidrio de sales fundentes a diferentes tiempos de fusión (T= 950 °C, 50 g cargas fundentes/100 g CBA, 75 % Na ₂ SO ₃ ·5H ₂ O)	59
Figura 3.3.	Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de cargas fundentes de vidrio reciclado	61
Figura 3.4.	Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 1	71
Figura 3.5.	Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 2	72
Figura 3.6.	Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 3	72
Figura 3.7.	Durezas de los compósitos CBA-frita de esmalte fundidos a 800 °C y 1 h con respecto a la masa de carga fundente de diferentes fritas	78
Figura 3.8.	Influencia del tiempo de fusión en la dureza de los compósitos carbón-vidrio fritas (T= 800 °C, CO= 80 % frita 2 y CF= 100 g)	79
Figura 3.9.	Durezas de los compósitos carbón-polisilano respecto al volumen de polisilano impregnado	80
Figura 3.10.	Fotografías del carbón activado por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 36x, b) 500x, y c) 700x	95
Figura 3.11.	Fotografías del compósito carbón activado-vidrio sales fundentes por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 200x, b) 400x, c) y d) 500x	96
Figura 3.12.	Fotografías del compósito carbón activado-vidrio reciclado por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 200x, y b) 731x	97

Figura 3.13.	Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) y b) 200x	98
Figura 3.14.	Fotografías del compuesto carbón activado-polisilano por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) y b) 200x, c) 400x	99
Figura 3.15.	Porcentaje de recuperación de oro por el carbón activado y por los compósitos en función del tiempo [Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.	100
Figura AII.1.	Representación de valores de $R_{\text{máx}}$ vs K	146
Figura AII.2.	Diagrama ternario del sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ con las composiciones de las cargas fundentes para la impregnación de sales	148
Figura IX.1.	Condiciones de operación del ensayo BET para el carbón activado	203
Figura IX.2.	Isotermas de adsorción-desorción del carbón activado	204
Figura IX.3.	Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del carbón activado	204
Figura IX.4.	Condiciones de operación del ensayo BET para el compuesto carbón activado-vidrio sales	205
Figura IX.5.	Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio sales	206
Figura IX.6.	Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio sales	206
Figura IX.7.	Condiciones de operación del ensayo BET para el compuesto carbón activado-vidrio reciclado	207
Figura IX.8.	Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio reciclado	208

Figura IX.9.	Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio reciclado	208
Figura IX.10.	Condiciones de operación del ensayo BET para el compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte	209
Figura IX.11.	Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte	210
Figura IX.12.	Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte	210
Figura IX.13.	Condiciones de operación del ensayo BET para el compuesto carbón activado-polisilano	211
Figura IX.14.	Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-polisilano	212
Figura IX.15.	Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-polisilano	212

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Fichas técnicas de caracterización de los carbones utilizados	117
ANEXO II	
Fichas técnicas de impregnación de vidrio en carbones utilizando como fuente de sílice metasilicato de sodio pentahidratado	1300
ANEXO III	
Fichas técnicas de impregnación de vidrio en carbones utilizando como fuente de sílice vidrio de botellas recicladas	14949
ANEXO IV	
Fichas técnicas de impregnación de vidrio en carbones utilizando como fuente de sílice fritas de esmalte	1666
ANEXO V	
Fichas técnicas de impregnación de polisilano en carbones	1877
ANEXO VI	
Fichas técnicas de atrición de carbones activados	1911
ANEXO VII	
Fichas técnicas de caracterización química de carbones activados	1933
ANEXO VIII	
Fichas técnicas de cinéticas de adsorción de oro en carbones activados	199
ANEXO IX	
Fichas técnicas del análisis BET	2033

RESUMEN

La presente investigación estuvo encaminada en la producción de carbones activados (CA) de altas resistencias mecánicas (dureza). Las materias fortalecedoras de la estructura carbonosa estudiadas fueron: vidrio obtenido de metasilicato de sodio pentahidratado (sal fundente), de botellas desechadas y de fritas de esmalte. Para la formulación de los compósitos CA-vidrio, se realizó una impregnación de los tres tipos de carga fundentes con la adición de tetraborato de sodio decahidratado en un carbón activado de cuesco de palmiste de 89 % de dureza e índice de yodo de 849 mg I₂/g, seguido de un tratamiento térmico para la fusión de las masas vítreas incorporadas. Los parámetros estudiados fueron: cantidad de carga, composiciones y granulometrías de las materias primas, temperaturas y tiempos de fusión de los materiales compuestos. Así mismo, para la obtención de compósitos CA-polisilano, el parámetro que se estudió fue el volumen de polímero a impregnarse en la superficie carbonosa. Tanto el carbón activado como los compósitos obtenidos fueron caracterizados con la determinación de sus propiedades mecánicas (dureza y pérdidas por atrición), de adsorción (índice de yodo y área superficial BET) y su composición química-morfológica.

El compósito carbón activado-vidrio sales fundentes se obtuvo con las siguientes condiciones: relación másica carga/carbón de 0,5/1, carga fundente de 75 % metasilicato de sodio pentahidratado y 25 % tetraborato de sodio decahidratado, temperatura y tiempo de fusión de 950 °C y 1 h, respectivamente. Lográndose una dureza del 98 % y un índice de yodo de 470 mg I₂/g.

El compósito de carbón activado-vidrio reciclado se preparó con los siguientes parámetros: relación másica carga/carbón de 2:1, carga fundente de 90 % vidrio reciclado (150 µm) y 10 % tetraborato de sodio decahidratado, temperatura y tiempo de fusión de 950 °C y 1 h, respectivamente. El cual presentó una dureza del 93 % y un índice de yodo de 591 mg I₂/g.

La formulación del compósito carbón activado-vidrio fritas de esmalte se obtuvo con una relación másica de carga/carbón de 1:1, carga con un 80 % de frita 2 y 20 %

tetraborato de sodio decahidratado, temperatura y tiempo de fusión de 800 °C y 1 h, respectivamente. Lográndose una dureza del 95 % y un índice de yodo de 690 mg I₂/g.

El compósito carbón activado-polisilano fue obtenido por la impregnación de 50 mL de polímero por 100 g de carbón activado, el cual presentó una dureza del 99 % e índice de yodo de 667 mg I₂/g.

El ensayo de atrición revela que el carbón activado presenta un 53 % de pérdidas de material y con la adición de vidrio utilizando como fuentes de sílice provenientes de las sales fundentes, vidrio reciclado y fritas de esmalte, las pérdidas se reducen a valores de 36, 46 y 39 %, respectivamente. En cambio, en la impregnación de polisilano este parámetro se reduce a 31 %, confirmándose que en todos los casos existe un reforzamiento de la estructura del carbón activado.

Las recuperaciones del complejo cianuro-áurico en solución obtenidas fueron del 98, 57, 89, 90 y 26 % para el carbón activado, compósitos con vidrio sales, vidrio reciclado, vidrio fritas y polisilano, respectivamente. Concluyéndose que en el compósito carbón activado-vidrio fritas, los mecanismos de reforzamiento superficial del compuesto son los más apropiados para obtener carbones activados con mayor rendimiento de recuperación de metales preciosos. Materiales que presentan el mayor índice de yodo, un valor de dureza y rendimiento de adsorción dentro de los estándares requeridos para el uso en la minería.

INTRODUCCIÓN

Una de las materias primas utilizadas en la fabricación de carbón activado granular es la cáscara de coco, la cual presenta una buena resistencia a la atrición y altos niveles de actividad (Schaeffer, 2013, p. 2). Los carbones activos granulares utilizados en la extracción del oro tienen durezas superiores al 97 % (Adams, 2016, p. 538).

La dureza se define como la resistencia del carbón a la erosión y ruptura, donde una masa de carbón es sometida a la acción mecánica con un número determinado de bolas de acero colocadas en un recipiente, el cual se somete a una acción de rotación y golpeteo por 30 minutos. La masa de carbón retenida en un tamiz de abertura cercana a la mitad de la abertura del tamiz que define el tamaño nominal del carbón original, representa el porcentaje de dureza (NTE INEN 1989:94, 1995). Asimismo, las pérdidas por atrición se definen como el porcentaje de carbón (fracción fina) que no puede ser recuperado en procesos de adsorción del oro. (Marsden y House, 2006).

Los carbones activados granulares utilizados en minería presentan resistencias mecánicas bajas, lo que ocasiona la eliminación del carbón como material fino en las pulpas cianuradas, el cual no puede ser recuperado y genera pérdidas económicas en el proceso, relacionadas con las pérdidas de oro, debido a que se adsorbe en el carbón fino, por ende, no puede ser recuperado ya que se descarta en las pulpas. Por lo que se sugiere, establecer métodos para reforzar la estructura de carbones activados provenientes de materiales lignocelulósicos (Beltrán, 2012, p. 44).

La recuperación de oro en el proceso de cianuración se realiza por varios métodos, entre los cuales se tiene: adsorción con carbón en lixiviación con recuperaciones del 60 al 80 % del oro total (Azañero, 2001), adsorción con carbón en pulpa con rendimientos del 99 al 100 % y adsorción con carbón inmovilizado con rendimiento del 98 %. A pesar de que la técnica con carbón inmovilizado se obtiene altos rendimientos, presenta el inconveniente de utilizar mayor cantidad de material

adsorbente en comparación al proceso convencional con carbón en pulpa (Beltrán, 2012, p. 44). Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de dicho material, se han propuesto las siguientes investigaciones para obtener carbones activos modificados físicamente, que presentan una mayor dureza:

Díaz (2015), propone la impregnación de vidrio en la estructura del carbón con el objetivo de aumentar la dureza de dicho material. En su experimentación, utiliza como constituyentes del vidrio: metasilicato de sodio pentahidratado como fuente de sílice (SiO_2) y tetraborato de sodio decahidratado como fuente de óxido de boro (B_2O_3). El carbón virgen utilizado tiene una dureza inicial de 58 %, con la impregnación del vidrio se aumenta dicha propiedad mecánica a 82 % (p. 64).

La investigación realizada por Miño (2004), logra aumentar la dureza de carbones activados de cuesco de palmiste con la impregnación de resinas poliméricas en la superficie carbonosa. La dureza inicial del carbón activado utilizado es de 75 %, y con el fin de incrementar la resistencia mecánica, sintetiza dos compósitos de carbón activado-resina: uno, carbón activado-resina fenólica con una dureza del 93 % y otro, carbón activado-resina epóxica con dureza de 96 % (p. 77). Ambos métodos descritos logran mejorar las propiedades mecánicas de carbones activados de materiales lignocelulósicos con baja y/o mediana dureza. El inconveniente que presentan estas experimentaciones es la reducción de la capacidad de adsorción en un 50-60 % (Díaz, 2015, p. 65 y Miño, 2004, p. 77).

El presente proyecto propone la producción de compósitos de carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de carbones activados utilizados en la adsorción del complejo cianuro-áurico. Con esto se logrará evitar las pérdidas por atrición de carbones granulares, lo cual, significa pérdidas económicas en la industria minera: por consumo de material adsorbente y pérdidas de oro en carbón fino producidas en el proceso de adsorción de metales preciosos de pulpas cianuradas (Beltrán, 2012, p. 44).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. EL CARBÓN ACTIVADO: DEFINICIÓN, ACTIVACIÓN Y APLICACIONES

1.1.1. DEFINICIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Se conoce como carbón activado a todo material carbonoso que ha sido sometido a procesos químicos y/o físicos para aumentar su área superficial mediante la creación de porosidad en su estructura (Chowdhury, Scott, Westerhoff, Leto, Nowack, y Corwin, 2013, p. 3). Los materiales que forman un carbón activo están unidos por enlaces grafiticos, cuyos espacios se conocen como porosidad (Marsh y Rodríguez, 2006, p. 14).

El principal uso de este material con alta superficie interna es la adsorción de sustancias, presentes tanto en fase líquida como en fase gaseosa (Menéndez, 2012, p. 58). El área superficial de un carbón comercial se encuentra en un rango de 500-1500 m²/g (Deiana, Petkovic y Noriega, 1998, p. 90).

La materia prima para su producción comprende un sin número de materiales entre los cuales se tiene carbón de origen mineral como la antracita, grafito y lignito; carbones de origen orgánico como desechos celulósicos de plantas madereras y alimenticias (huesos de frutas); y algunos derivados de plásticos, resinas y polímeros (Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 58-59).

1.1.1.1. Porosidad en carbones

La porosidad en carbones activados corresponde a los espacios existentes entre átomos de carbono o compuestos presentes en el carbón. La porosidad en carbones presenta muchas irregularidades, en cambio en materiales que presentan una geometría definida como las zeolitas, estos espacios tienen una dimensión definida (Marsh y Rodríguez, 2006, p. 89).

La porosidad se obtiene por pirólisis y gasificación del carbono presente en el material celulósico como es el caso de la lignina y la celulosa. La temperatura de tratamiento térmico define la estructura general del carbón. Con un aumento de esta temperatura se logra una mayor estabilización de la estructura (Marsh y Rodríguez, 2006, p. 89).

La formación de redes tridimensionales compuestas de capas no lineales de seis a ocho carbonos, unidas por enlaces reticulares establecen la dureza característica de carbones microporosos (Marsh y Rodríguez, 2006, pp. 89-90).

1.1.1.2. Grupos funcionales constituyentes del carbón

Un carbón activado no se constituye únicamente de carbono, también tiene en su estructura heteroátomos como el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre y otros constituyentes minerales. La presencia de estos heteroátomos depende de la naturaleza de la materia prima utilizada en la producción de carbones activos (Marsh y Rodríguez, 2006, p. 323). El oxígeno presente en carbones, otorga propiedades polares a los mismos. Por lo tanto, en soluciones acuosas, hay una interacción de las moléculas de agua con los átomos de oxígeno superficiales (Bansal y Goyal, 2005, p. 8).

La interacción entre la superficie del carbón y agentes oxidantes como el ácido nítrico (HNO_3), forma complejos orgánicos oxigenados como enlaces C-O, quinonas, carboxilo, lactonas, éteres y otros. Estos tipos de enlaces determinan las propiedades catalíticas y pH de cada uno de los carbones (Nudelman, 2004, p. 68). La interacción del carbón con amonio, melanina y úrea aportan a la superficie carbonosa grupos funcionales nitrogenados, que confieren propiedades y características especiales al carbón (Bandosz, 2006, p. 9).

1.1.1.3. Clasificación de los carbones activados

Según el tamaño del poro el carbón se divide en tres tipos: carbones microporosos son aquellos que tienen en su interior poros de tamaño no superiores a 2 nm. Los

carbones mesoporosos poseen poros comprendidos entre los 2-50 nm y los macroporosos tienen una porosidad mayor a los 50 nm (Gómez et al., 2010, p. 23).

Por otro lado, los carbones activos se clasifican por su granulometría en dos tipos: carbones granulares con diferentes tamaños de diámetro, comprendidos entre los 0,2 y 5 mm (mallas # 70 y # 4, respectivamente), y los pulverizados que se presentan con una granulometría menor a 74 μm (malla # 200) (Activated Carbon Technologies PTY LTD, 2016).

1.1.1.4. Propiedades de los carbones activados

Desde los inicios de los tiempos, los carbones han sido utilizados en procesos de purificación de sustancias líquidas y gaseosas (Menéndez, 2012, p. 58). La descontaminación de estas sustancias consiste en la eliminación de coloración, olores y sabores causados por elementos contaminantes (Cecen y Aktas, 2011).

La microporosidad convierte al carbón activo en un material de alta superficie y de capacidad de retención extraordinaria. Por su parte, la meso y macroporosidad cumplen la función de retención de sustancias de mayor tamaño molecular en la superficie del carbón.

Por su naturaleza apolar tiene la capacidad de adsorber sustancias apolares y de gran volumen molecular como los colorantes, hidrocarburos, entre otros (Lenntech, 2006). La adición de sustancias con oxígeno e hidrógeno a la superficie del carbón, elevan la afinidad de adsorción de moléculas polares y además de crear una estructura ácido-base en el mismo.

La molécula adsorbida en la superficie del carbón le sucede lo siguiente: en el caso de que sea tóxica es transformada a inerte mediante reacciones químicas catalíticas o puede adherirse a la superficie debido a la acción de las fuerzas de Van der Waals (Castells, 2012, p. 312). Para entender esto se presentan dos ejemplos que se describen a continuación: la degradación del ion cianuro a cianatos

de desechos provenientes de la extracción de oro de plantas metalúrgicas, y otro ejemplo es la recuperación del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en el proceso de adsorción de oro de mineral de mina (Marsden y House, 2006, p. 480).

Las principales propiedades para caracterizar a un carbón activado se describen a continuación:

a) Propiedades físicas

Densidad aparente

Se determina por los gramos ocupados por cada mL, o de manera general, como la masa de carbón en un determinado volumen. Este parámetro considera la suma de volúmenes de las partículas y de los espacios vacíos entre las partículas (Hendricks, 2006, p. 774).

El rango de densidades aparentes de carbones activados granulares es de 0,3 – 0,6 g/cm³ (Chowdhury et al., 2013, p. 4). Para carbones sub-bituminosos existe un 35 % menos masa ocupando un volumen que en el caso de carbones con mayor densidad (Potwara, 2012, p. 14).

Densidad real

Se considera como la masa ocupada por el carbón por unidad de volumen, no se considera la porosidad y el volumen entre partículas (Gómez et al., 2010, p. 44). Generalmente, los valores de densidad real de carbones activados se encuentran entre los 2,15 - 2,20 g/ cm³ (Desotec, 2015).

Granulometría de las partículas

Conocido como la distribución de los tamaños de partículas de carbón y se cuantifica por un análisis de tamices (Hendricks, 2006, p. 774). Los tamaños de carbones activados granulares que generalmente se utilizan son: de 1,2 x 2,4 mm a 1,7 x 3,4 mm (Marsden y House, 2006, p. 303).

b) Propiedades mecánicas

Dureza

La dureza se define como la resistencia del carbón a la erosión y ruptura (Desotec, 2015; Hendricks, 2006, p. 774), donde una masa de carbón es sometida a la acción mecánica de un número determinado de bolas de acero colocadas en un recipiente específico, el cual se somete a una acción de rotación y golpeteo por 30 minutos. La masa de carbón retenida en un tamiz de abertura cercana a la mitad de la abertura del tamiz que define el tamaño nominal del carbón original, representa el porcentaje de dureza (NTE INEN 1989:94, 1995).

Un carbón duro es menos propenso a rupturas y es capaz de generar menos material fino, durante procesos de transporte y agitación. La materia prima de preferencia para la producción de carbones activados de alta dureza es la cáscara de coco (Potwara, 2012, p. 14). Mayoritariamente, las presentaciones de los carbones activos son los del tipo pulverizados y los peletizados, ya que la mayoría de las materias primas tienen durezas bajas (Koplan, Okun, Hillman, Lane, Pearson y Aranoff, 2006, p. 1-4).

Pérdidas por atrición

Las pérdidas por atrición se cuantifican por el porcentaje de carbón que no puede ser recuperado en el proceso de extracción de oro. Los mecanismos asociados al rompimiento del carbón se detallan a continuación:

- Atrición carbón – sólido en sistemas de mezclado, carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL).
- Atrición carbón – carbón en sistemas de mezclado y solución CIP, CIL, elusión y lavado ácido.
- Atrición carbón – carbón, carbón – acero en procesos de secado como la reactivación térmica y transporte en baldes.

- Rompimiento del carbón durante el transporte en bombas, eductores y retención en tamices.
- Ruptura del carbón por choque térmico en el proceso de reactivación térmica.
- Abrasión durante remoción química de compuestos inorgánicos contaminantes del carbón activado (Marsden y House, 2006, p. 333).

Las pérdidas por atrición del material adsorbente son variantes de planta en planta, y depende de las condiciones de cada etapa de extracción del oro:

- Velocidad de agitación
- Velocidad de transporte del carbón
- Tipo y configuración de sistemas de adsorción
- Equipamiento (bombas)
- Tiempos de residencia

El consumo de carbón por cantidad de mineral procesado en plantas metalúrgicas varía de 15 a 80 g/ton, con un valor promedio de 40 g/ton. Repartiéndose las pérdidas en procesos de carbón en columna de 20 a 40 g/ton y en procesos de agitación, CIP y CIL de 40 a 60 g/ton. Específicamente el consumo se distribuye según los siguientes mecanismos:

- Circuitos de mezclado – adsorción: 40 %
- Transporte del carbón entre tanques y en columnas de desorción: 6 %
- Elusión, con inclusión del transporte y regeneración del carbón: 7 %
- Regeneración (enfriamiento y tamizado): 47 % (Marsden y House, 2006, p. 333)

c) Análisis próximo

Humedad

Se considera al contenido de humedad ligada al carbón activado, se determina como la pérdida de peso mediante un calentamiento a 150 °C durante 3 horas. El contenido de humedad es inferior al 5 % y puede incrementar durante el transporte y el almacenamiento del carbón (Desotec, 2015).

Materia volátil

La materia volátil se termina como la pérdida de masa en un proceso de calentamiento (950 °C), durante 7 minutos con un crisol tapado. El contenido de material volátil da una idea del grado de carbonización de un carbón activado utilizado en mecanismos de adsorción (ASTM D 5832-98, 2014).

Cenizas

La ceniza constituye el material inorgánico del carbón activado, y su contenido depende de la materia prima utilizada. Es la fracción que no presenta características para ser activada, por lo cual, la presencia de ceniza reduce la efectividad de la activación del carbón (Bandos, 2006, p. 14). Un lavado ácido del carbón activado reduce el contenido de cenizas a valores del 1 al 2 % (Potwara, 2012, p. 14). Este parámetro se obtiene calentando el material por 2 horas a 950 °C con crisol abierto.

Carbón fijo

El carbón fijo se conforma del contenido de carbono remanente, obtenido por la eliminación de la materia orgánica. Este material constituye la fracción combustible que puede ser gasificada en la obtención de carbones activados. Se cuantifica como el contenido total de carbón activado menos el porcentaje de material volátil y de cenizas (Celignis, 2017).

d) Propiedades de adsorción

Número de yodo

El número o índice de yodo da una idea del área superficial de un carbón activado. Se cuantifica como los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón. Los

cuescos de coco activados presentan los mayores índices de yodo, son capaces de adsorber moléculas de diámetros inferiores, como es el caso de sustancias químicas orgánicas volátiles (Potwara, 2012, p. 14).

En la Tabla 1.1 se presentan las propiedades de carbones activados comerciales de diferentes materias primas.

Tabla 1.1. Propiedades de carbones activados comerciales

Material base	Cáscaras de coco	Carbón bituminoso	Carbón sub-bituminoso	Carbón lignítico
Densidad aparente (g/cm ³)	0,48 - 0,54	0,48 - 0,54	0,35 - 0,37	0,37 - 0,38
Número de Yodo (mg I ₂ /g)	1 050 - 1 300	850 - 1 000	1 000 - 1 100	500 - 600
Número de melaza	< 200	200 - 230	> 300	> 300
Ceniza total (%)	< 3	8 - 15	10 - 15	16 - 30
Dureza (%)	98 - 99	85 - 90	86 - 90	65 - 75

(Potwara, 2012, p. 14)

Área superficial

Mide el área interna de un carbón o material activado que presenta una determinada porosidad. La unidad de medida es m² de área superficial por unidad de masa de material adsorbente. Para la determinación de este parámetro se utilizan gases capaces de ser adsorbido físicamente, como el nitrógeno (N₂). El método consiste en la adsorción típica del nitrógeno a su temperatura de ebullición (77 K), mediante el uso de las isothermas BET (Gómez et al., 2010, pp. 48-49).

1.1.1.5. Características fisico-químicas

a) Características físicas

La estructura física que presenta el carbón activo es similar al grafito y con porosidad bien definida. Se pueden identificar los tres tipos de poros: microporos

($dp < 2$ nm), mesoporos ($dp = 2-50$ nm) y macroporos ($dp > 50$ nm) (Marsh & Rodríguez, Activated carbon, 2006).

b) Características químicas

La naturaleza química de un carbón activo está compuesta de carbón puro similar a materiales carbonosos de origen natural como el grafito y la antracita. Su composición química se constituye de 75-80 % de carbón fijo, 5-10 % de cenizas, 1-3 % de humedad y 7-9 % de material volátil. Un carbón activado típico se constituye químicamente de los siguientes elementos: 88 % carbono; 0,5 % hidrógeno; 6-7 % oxígeno; 0,5 % nitrógeno, 1 % azufre y el restante equivalente a constituyentes inorgánicos (Bansal y Goyal, 2005, p. 2).

El porcentaje de ceniza depende de la materia prima a utilizarse. La ceniza se considera como un material de origen inorgánico. Por no presentar carácter orgánico, este material no puede ser activado. En estos casos, un alto porcentaje de materia inorgánica en materiales lignocelulósicos, reduce la efectividad de activación de los mismos (Koplan et al., 2006, p. I-4).

La eliminación parcial de la ceniza se realiza con un lavado ácido. La acción del ácido elimina parte de los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , otros) presentes en la materia inorgánica (Koplan et al., 2006, p. I-7).

1.1.2. ACTIVACIÓN DE MATERIALES CARBONOSOS

Antes de mencionar los procesos de activación existentes, se debe considerar los criterios de selección de la materia prima apta para ser activada:

- Materiales con una alta dureza y densidad
- La presencia de un bajo contenido de materia inorgánica (cenizas)
- La disponibilidad y el costo (Bandosz, 2006, p. 9; Gómez et al., 2010, p. 3)

1.1.2.1. Carbonización

La carbonización es el primer paso para la preparación de carbones activados. Es un proceso térmico que se lleva a cabo a temperaturas superiores a los 500 °C. En esta etapa existe una serie de reacciones de deshidratación y volatilización en la materia precursora. Las condiciones de trabajo pueden efectuarse en dos tipos de atmósferas: la primera consiste en una atmósfera oxidante con relaciones estequiométricas muy bajas de aire y a temperaturas no superiores a los 600 °C (Bandosz, 2006, p. 17); por otro lado, se tiene una carbonización del precursor en una atmósfera reductora a temperaturas de 500 a 800°C (Chowdhury et al., 2013, p.3).

En el proceso de carbonización se produce una eliminación de elementos como el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre, por una volatilización pirolítica del material inicial (Bansal y Goyal, 2005, p. 2). Las reacciones de combustión remueven parte del material volátil y con esto se produce condensados (hojas de poliaromáticos), que viene a ser los bloques de construcción de los carbones activados. En este punto, se tiene una estructura porosa pobre, con intersticios entre los condensados, los cuales pueden estar llenos de alquitrán (Newcombe y Dixon, 2006, p. 157).

1.1.2.2. Activación

Las reacciones de activación consisten en la interacción del agente activante con átomos de carbono de material previamente carbonizado. De esta manera, se obtiene una matriz carbonosa que con el tiempo de activación se va agujereando, lo que permite generar poros de diferentes tamaños, los cuales conceden la porosidad característica de carbones activos (Bansal y Goyal, 2005, p. 2).

a) Activación física

La activación física consiste en la inyección de CO₂ o H₂O vapor a temperaturas entre los 800 °C y 900 °C. En el proceso se elimina parte del material carbonoso

en la fase gaseosa, para la generación de nuevos poros (Marsh y Rodríguez, 2006, p.8).

El término de gasificación de material carbonoso se conoce como “burn off” y representa el grado o porcentaje de pérdida por activación. Entre mayor sea el porcentaje de “burn off”, mayor será el grado de activación, hasta llegar a un máximo y luego desciende (Inagaki y Kang, 2016, p. 241).

Las reacciones químicas que ocurren en el proceso físico se determinan por la eliminación de átomos de carbono, con lo cual se generan poros (Gómez et al., 2010, p. 21). A continuación, se presentan las principales reacciones, mostradas en las Ecuaciones 1.1 a 1.4.



b) Activación química

La activación química consiste en la impregnación de sustancias químicas al material lignocelulósico, que luego es sometido a temperaturas de 400-600°C. A estas temperaturas se produce reacciones de deshidratación y la formación de estructuras porosas en el carbón (Koplan et al., 2006, p. 1-7). Las sustancias activantes más utilizadas son: cloruro de zinc, ácidos minerales (fosfórico, sulfúrico) y algunas sales (Bandosz, 2006, p. 4). La ventaja de la activación química es la recuperación de la sustancia activante, pudiéndose reutilizar en el proceso (p. 28).

La activación con cloruro de zinc ($ZnCl_2$) comprende una impregnación de la sal en el material lignocelulósico, seguido de un tratamiento térmico a temperaturas de 500-800 °C. El rendimiento del proceso es mayor que la activación térmica, pero en cambio, las propiedades como la densidad, abrasión y dureza del producto final disminuyen considerablemente (Bandosz, 2006, p. 27).

La activación con ácido fosfórico (H_3PO_4) al igual que al cloruro se realiza una impregnación del ácido en el material lignocelulósico y un tratamiento térmico inicial a 100-200 °C, seguido de un segundo tratamiento a 400-500 °C. Un lavado final del producto es necesario para regular su pH y para la eliminación de ácido en exceso. El carbón activado obtenido por activación de este ácido, presenta una heterogeneidad en la microporosidad, con diferentes tamaños y volúmenes de poro. El ataque químico con soluciones concentradas de ác. fosfórico desarrolla en mayor proporción meso y macroporosidad en comparación con los otros tipos de activación existentes (Marsh y Rodríguez, 2006, p. 326-327).

La activación con hidróxido de potasio (KOH) consiste en dos etapas: la primera, se impregna el KOH al carbón en un tratamiento térmico a 100°C con evaporación total de la solución; y la segunda, un tratamiento térmico a 700-900 °C. Es necesario un lavado con agua o con alguna solución ácida con el fin de remover la base restante. Por este método se logra una mayor microporosidad con poros de diámetros menores a los 2 nm (Nogués, García y Rezeau, 2010, p. 375).

1.1.3. APLICACIONES DE LOS CARBONES ACTIVADOS

1.1.3.1. Principales aplicaciones del carbón activado en la industria

El tratamiento de aguas residuales hoy en día está direccionado en el uso de carbón activado. Debido a las propiedades de adsorción del carbón, se puede remover sustancias orgánicas y/o inorgánicas contaminantes de aguas. Industrialmente, se utilizan columnas de carbón granular, donde la solución contaminante entra en contacto con la superficie carbonosa. El líquido tratado posee una concentración de sustancia contaminante menor a la permisible, para luego ser reutilizada en el proceso o ser desechado (Manahan, 2006, p. 217).

En el tratamiento de gases, las sustancias contaminantes contenidas en la fase gaseosa son removidas por la acción adsortiva del carbón activado. Industrialmente, los mecanismos de tratamientos de gases funcionan de la

siguiente manera: el carbón activo es colocado como camas en tanques cilíndricos; el flujo de gas contaminado es forzado a ingresar por una serie de tanques de purificación conectados; el contacto del gas con la superficie carbonosa remueve las sustancias contaminantes; por último, el gas purificado es expulsado por el último tanque (Woodard y Curran, 2006, p. 347).

La clarificación del jugo de caña es otra de las aplicaciones industriales del carbón. El proceso consiste en la preparación de un jarabe de 60-70 °Brix, al cual se somete a un tratamiento térmico a 90 °C durante 1-2 h, con la adición de 1,5 % de carbón activado en polvo (74 µm). El material adsorbente retiene sustancias causantes de la coloración, olores y sabores extraños del jugo. En el proceso de filtración se utiliza una precapa de tierra de diatomeas, donde el carbón es retenido y el jugo clarificado es filtrado (Panda, 2011, pp. 27-28; Valenzuela, Martínez y Montaña, 2009).

El carbón activado se utiliza en la recuperación de metales preciosos como el oro y la plata. Las principales características que debe presentar este material son las siguientes (Marsden y House, 2006, p. 297):

- Capacidad adsortiva, 24 mg Au/g CA
- Alta velocidad de adsorción, 90 % recuperación del oro en solución en 1 hora
- Resistencia mecánica, durezas mayores al 98 %
- Distribución de tamaño de partícula, mallas 6x12 (- 3,36 mm + 1,68 mm)

El carbón activado utilizado en el proceso de adsorción de oro entra en contacto con las pulpas cianuradas, las cuales han sido obtenidas de la lixiviación de minerales auríferos con cianuro de sodio. El carbón es alimentado en contracorriente al flujo de la pulpa y pasa por una serie de 3 o más tanques conectados entre sí. El material adsorbente preñado de oro es recuperado de los primeros tanques, a los cuales ingresa la pulpa cianurada. Luego, el carbón es desorbido en unas columnas de elución, para recuperar el oro que ha sido adsorbido (Bartlett, 1998, pp. 63-64).

Las granulometrías de carbones activados utilizados en minería están en el rango de mallas menor a la # 6 y mayor a la # 14 (-3,36 mm +1,41 mm) y su densidad aparente es inferior a 1 g/cm³. El material precursor utilizado para carbones en minería es la concha de coco, por presentar buenas propiedades de adsorción y alta resistencia a la atrición (Bartlett, 2013, pp. 63).

Para establecer la cinética de adsorción de cada uno de los carbones activados, se han propuestos diferentes modelos matemáticos que facilitan la interpretación de los resultados. Los diferentes modelos se detallan a continuación:

1.1.3.2. Isotermas de adsorción

a) Isotermas de Freundlich

La isoterma de Freundlich describe el comportamiento de carbones utilizados en procesos de purificación de aguas residuales (Chowdhury et al., 2013, p. 7-8). Se presenta en la Ecuación 1.6.

$$\frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad [1.6]$$

Donde:

X/m: es la masa de sustancia absorbida por masa de material adsorbente.

C_e: es la concentración en equilibrio de la sustancia absorbida en solución luego de ocurrir el fenómeno de adsorción.

K_f y n: son las constantes empíricas.

Para el tratamiento de los datos, se representan gráficamente los valores de X/m y de concentración, a través de la siguiente regresión lineal en ejes logarítmicos, como se presenta en la Ecuación 1.7.

$$\text{Log} \left(\frac{X}{m} \right) = \text{Log} K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad [1.7]$$

b) Isotermas BET

Este modelo matemático fue desarrollado por los científicos Brunauer, Emmett y Teller. Esta teoría habla de la adsorción en múltiple capa, presentada en la Ecuación 1.7.

$$\frac{\frac{P}{P_o}}{a\left(1-\frac{P}{P_o}\right)} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C-1}{a_m C} \frac{P}{P_o} \quad [1.8]$$

Donde:

P: es la presión

P_o: es la presión del adsorbato en la saturación

a: es la cantidad de adsorbato retenido.

a_m: es la adsorción máxima, cuando se tiene una monocapa.

C: es la constante que relaciona los calores de adsorción entre la primera capa y las multicapas.

La teoría BET es generalmente utilizada para caracterizar carbones activados, ya que con ella se conoce la micro, meso y macroporosidad que posee un determinado carbón (Bardosz, 2006, p. 20).

1.2. TÉCNICAS APLICADAS AL MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE CARBONES ACTIVADOS GRANULARES

1.2.1. EL VIDRIO

1.2.1.1. Definición del vidrio

Se define como vidrio a toda materia inorgánica que ha sido sometida a un proceso de fusión y una vez enfriado presenta características de un líquido muy viscoso y de un sólido rígido. El vidrio puede ser incoloro, transparente o coloreado

dependiendo de su constitución química, su estructura es amorfa y dura (Fernández, 2003, pp. 54-55; Grau y Muñoz, 2013).

En la Figura 1.1. se muestra el proceso de fusión de un vidrio. Cuando una masa vítrea en su estado líquido comienza a enfriarse, la estructura atómica cambia progresivamente y es característica de la temperatura de fusión. Si el líquido es enfriado por debajo de la temperatura de fusión sin presentar cristalización se obtiene un líquido subenfriado. A medida que se sigue enfriando, no existe un cambio abrupto de la entalpía debido a la reorganización estructural discontinua del líquido. Además, en el enfriamiento, la viscosidad aumenta inversamente con la temperatura. La entalpía comienza a desviarse de la línea de equilibrio, cuando la viscosidad del líquido subenfriado es muy grande, con lo cual se fijan las características del vidrio y se obtiene un sólido rígido (Shelby, 2005, p. 3-4).

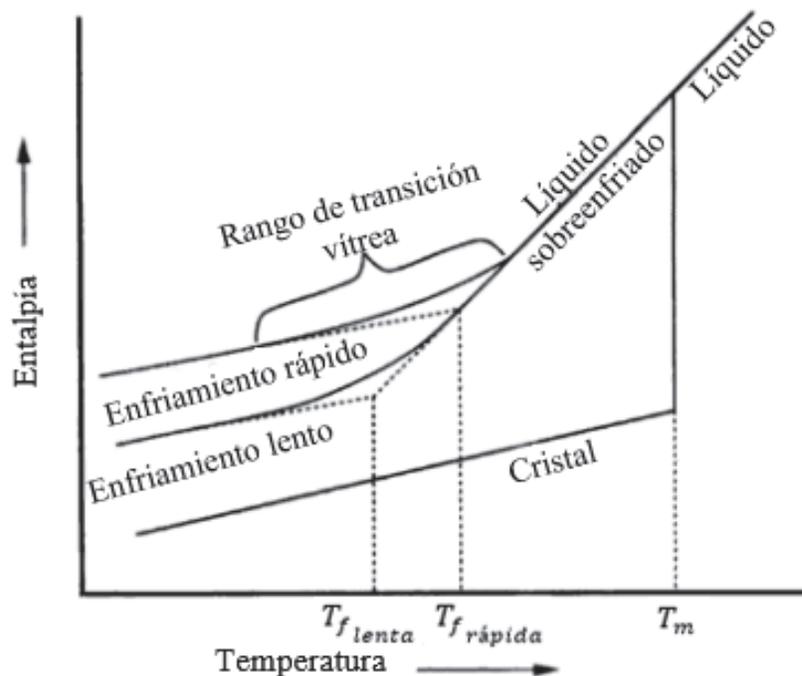


Figura 1.1. Efecto de la temperatura en la entalpía en la formación de un vidrio

El estado de transición de líquido subenfriado a sólido rígido se conoce como región de transformación vítrea. A tasas de enfriamiento más lentas, la curva de equilibrio se consigue a temperaturas más bajas. En cambio, a una tasa de enfriamiento más

rápida, el vidrio obtenido tiene una entalpía mayor y el proceso sucede a temperaturas más altas (Shelby, 2005, p. 4-5).

La temperatura de transición vítrea define la conversión de un líquido subenfriado a un sólido rígido (vidrio), en el enfriamiento; y la transformación del sólido a comportarse como un líquido viscoelástico, en el momento de un calentamiento (Shelby, 2005, p. 5).

1.2.1.2. Materias primas utilizadas en la fabricación de vidrios

Las materias primas utilizadas en la fabricación de vidrios comprenden una gama de compuestos inorgánicos, tanto de origen natural como de origen sintético. El constituyente principal usado en la mayoría de los vidrios es la sílice (SiO_2), debido a su abundancia en la superficie terrestre (Castells, 2012, p. 432; Grau y Muñoz, 2013).

La sílice puede formar una matriz vítrea definida pero su alta temperatura de fusión (1 600 °C), está asociada a altos consumos energéticos. Para lo cual, industrialmente son utilizadas sustancias que reducen la temperatura de fusión del vidrio, como es el caso de los óxidos de metales de la I y II familia: óxido de sodio (Na_2O), óxido de potasio (K_2O), óxido de calcio (CaO), óxido de boro (B_2O_3) y otros (Rapp, 2002, p. 190).

De acuerdo a las funciones que desempeña cada uno de los constituyentes del vidrio, se tiene una clasificación de las materias primas utilizadas que se explican a continuación:

- Vitrificantes
- Fundentes
- Estabilizantes y
- Componentes secundarios

a) Vitrificantes

Las sustancias vitrificantes, llamadas también como sustancias formadoras de red, son la base de todos los vidrios y son aquellas que proporcionan las características a los mismos: transparencia a la luz ultravioleta y resistencia a cambios bruscos de temperatura (Navarro, Gómez, García y Águeda, 2010, p. 255).

La principal materia prima vitrificante es la sílice en forma de arena. El porcentaje de sílice se puede variar en un 50 y 80 % en peso de la masa total (Fernández, 2003, pp.130-131). El porcentaje de pureza de los materiales silícicos aptos en la producción de vidrio es de 99,5-98,5 % (Rincón, s.f., p. 51).

Otro compuesto formador de red es el pentaóxido de fósforo (P_2O_5). Se incorpora por materias como el ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato de calcio y bario ($Ca_3(PO_4)_2$, $Ba_3(PO_4)_2$) (Rincón, s.f., p. 56).

b) Fundentes

Los constituyentes fundentes bajan el punto de fusión de la sílice de 1 600 a 800 - 1 200 °C. Además, se conocen como modificadores de la red vítrea, por ocupar los espacios libres entre los enlaces Si-O-Si.

Generalmente los fundentes son óxidos de metales alcalinos y alcalino térreos: K_2O , Li_2O , Na_2O , CaO , MgO , BaO y de otros metales como PbO , ZnO , y el más usado industrialmente es el óxido de boro (B_2O_3). Las materias primas que proporcionan los óxidos indicados son carbonatos, sulfatos, nitratos y otras sales (Paine, 1991, p. 96; Vázquez, 2005, p. 52).

El óxido alcalino más utilizado es el de sodio presente en un 12 a 15 % en peso del vidrio. Además, de lograr disminuir la temperatura de fusión, se reduce el coste en la producción. Los vidrios que contienen óxido de potasio, la viscosidad aumenta comparados con los que poseen sodio, lo que produce una reducción de la

presencia de fisuras. La desventaja de utilizar óxido de potasio es la disminución de la estabilidad química a la acción de álcalis y de ácidos.

Los vidrios de litio presentan un tiempo de fusión notablemente más corto, debido a la disminución de la temperatura, decaimiento de viscosidad y tensión superficial (Fernández, 1991, pp. 137-140).

La adición de óxidos de calcio y de magnesio son necesarios para brindar estabilidad al producto. Los porcentajes de estos compuestos se encuentran entre 5-11% CaO y 1-3% MgO (Lefteri, 2002, p. 146).

Los vidrios de plomo son utilizados para la protección de la emisión de rayos X, en óptica, en la producción de elementos eléctricos y electrónicos (bombillas, soldadura metálica, tubos de televisores). Su contenido es mayor al 10 %. Cuando su concentración es alta se comporta como un formador de red y cuando es baja actúa como un modificador (Weller, Unnewehr, Tasche y Härth, 2009, pp. 11, 104). Al igual que el plomo, los vidrios de óxido de boro, cuando su contenido de boro es alto actúa como formador de red (boratos) y en menores proporciones, como modificador de red (borosilicatos). Su principal función es disminuir el coeficiente de dilatación térmica del vidrio y ofrecer estabilidad química. La desventaja es que este tipo de vidrios son sensibles a cambios de temperatura (Holleman y Wiberg, 1995, pp. 85-86).

El óxido de zinc (ZnO) incrementa el índice de refracción y la resistencia química, aumenta la dureza y el afinado se mejora, con la reducción de la viscosidad a temperaturas elevadas. El porcentaje de incorporación no supera el 5 %. Las materias primas fuentes del óxido son: carbonato de zinc (ZnCO_3), óxido de zinc (ZnO), hemimorfita ($2\text{ZnO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) (Rincón, s.f., p. 58).

c) Estabilizantes

Los compuestos estabilizantes son adicionados para corregir los efectos negativos de la presencia de elementos alcalinos y mejorar los daños reticulares que se

ocasionan. Un estabilizante incrementa la resistencia química y dureza del vidrio. Entre los componentes más utilizados se tiene: óxidos de calcio (CaO), de magnesio (MgO), de aluminio (Al_2O_3), de boro (B_2O_3), entre otros (Pfaender, 1996).

El óxido de aluminio (Al_2O_3) es añadido en un 1 a 3 %, a través de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), compuestos minerales y rocas como los feldespatos. La adición de feldespatos reduce la temperatura de fusión de los vidrios, y es de fácil incorporación (Rincón, s.f., p. 58).

d) Componentes secundarios

Los componentes secundarios tienen la función de ser colorantes, decolorantes, opalizantes y fluidificantes del material vítreo. Su presencia es mínima. El antimoniato de calcio ($\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$) es un agente opacificante. Los óxidos de manganeso, hierro, cobalto, cobre y sales de plata se utilizan para dar coloración al vidrio (Janssens, 2013).

Materiales afinantes contrarrestan la formación y eliminan las burbujas formadas en el enfriamiento. Algunas sustancias utilizadas son: nitratos de sodio y potasio (NaNO_3 y KNO_3), sulfato de sodio, y óxidos de antimonio y arsénico (Sb_2O_3 y As_2O_3). En algunos casos, se adiciona compuestos de selenio para la neutralización de efectos de coloración causados por la presencia de óxidos de hierro (Rincón, s.f., p. 59).

1.2.1.3. Diagramas de fases ternarios para la determinación de la temperatura de fusión de vidrios

Un diagrama ternario es la representación gráfica de la mezcla de sustancias que forman un compuesto con características determinadas. Se representa con un triángulo equilátero, presentado en la Figura 1.2, al cual, las aristas (A, B y C) del mismo representan el 100 % de pureza de uno de sus componentes. Las rectas

obtenidas por dos puntos de las aristas (AB, AC y BC) corresponden a mezclas binarias y cualquier punto (P) que se encuentre dentro del triángulo corresponden a una mezcla ternaria. Para la representación en el diagrama, se trazan líneas paralelas a cada lado del triángulo con las respectivas composiciones. El punto donde convergen las líneas corresponde a la composición deseada (Campbell, 2012, pp. 196-197).

Los diagramas ternarios en la producción de vidrios son útiles en la determinación de la temperatura de fusión. Las líneas representadas en el diagrama corresponden a isothermas a una presión determinada. La temperatura de fusión de un vidrio se determina con la aproximación de la composición estudiada con una de las líneas isotérmicas.

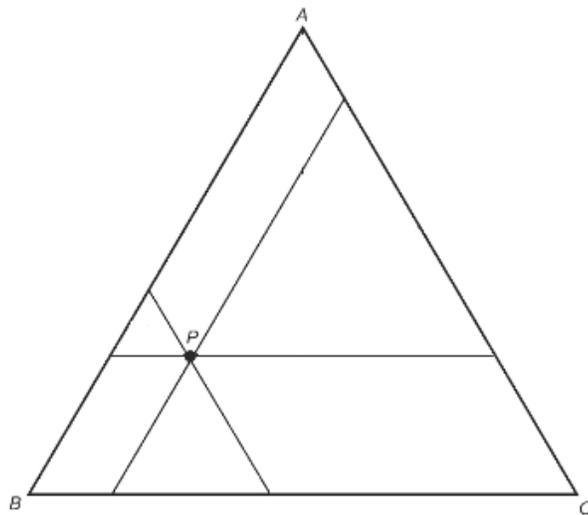


Figura 1.2. Diagrama de fases ternario

1.2.1.4. Clasificación del vidrio

Los vidrios como ya se ha dicho, se obtienen de la fusión de sílice (SiO_2) con óxidos alcalinos, alcalino-térreos y otros más. Debido al porcentaje de estos óxidos presentes en la red vítrea se tiene las siguientes clasificaciones (Punmia, Jain y Jain, 2004, p. 102):

- Vidrios sodocálcicos
- Vidrios de potasio y plomo

- Vidrios de potasio y calcio
- Vidrios borosilicatos
- Vidrios comunes
- Fritas de esmalte

a) Vidrios sodocálcicos

Los vidrios sodocálcicos tienen una composición química de 71-75 % sílice (SiO_2), 12-16 % óxido de sodio (Na_2O) y 10-15 % óxido de calcio (CaO). Son utilizados en la fabricación de vidrios de ventanas, vajillas y recipientes. Sus principales propiedades son: buena resistencia térmica y a la tensión, transmisión de la luz, químicamente inerte y su proceso de fabricación es muy económico (Grau y Muñoz, 2013). El diagrama de la Figura 1.3 muestra la coexistencia de compuestos formados por los óxidos de silicio, de sodio y de calcio. Con la introducción de la composición de un vidrio comercial, se puede estimar su temperatura mínima de fusión y con la cual se establece la temperatura de operación en la industria.

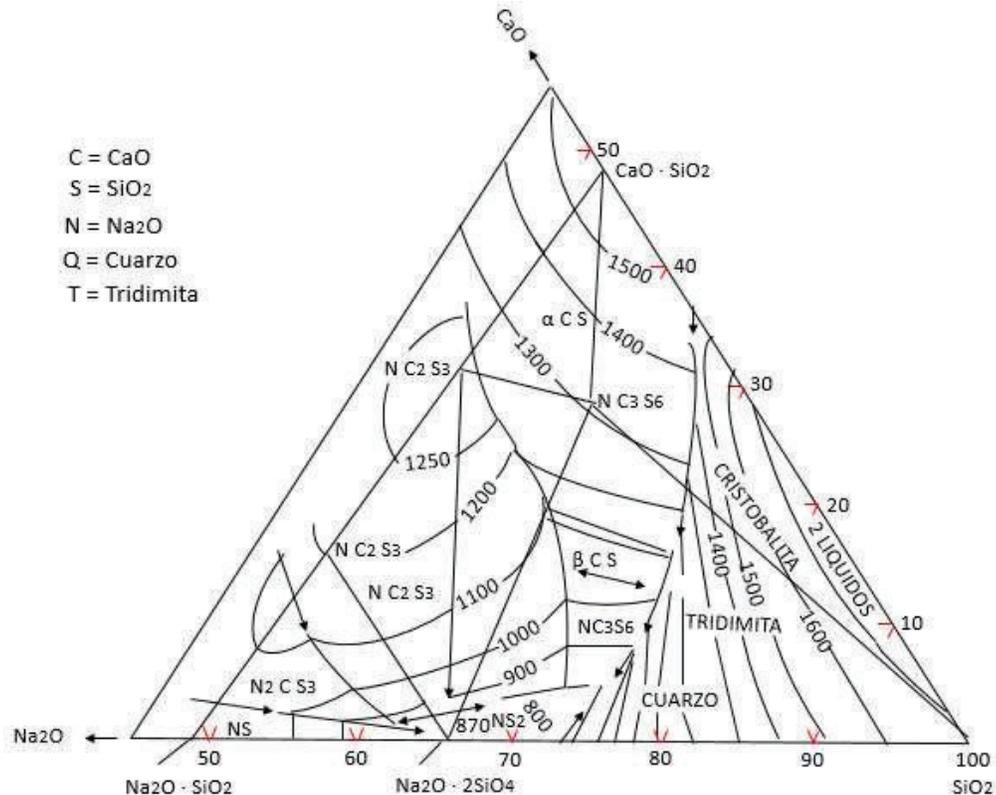


Figura 1.3. Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$
(CMEMaterials, sf)

b) Vidrios de potasio y plomo

Los vidrios de potasio y plomo conocidos como cristal de roca, tienen un peso específico entre los 3-3,3. Tienen un aspecto brillante y pueden ser pulidos fácilmente. Son utilizados en la fabricación de bombillas eléctricas y de lentes por sus propiedades ópticas. Generalmente, se componen de 54-65 % SiO_2 , 13-15 % K_2O y 25-30% PbO (Grau y Muñoz, 2013; Punmia, Jain y Jain, 2004, p. 102).

c) Vidrios de potasio y calcio

Los vidrios de potasio y calcio tienen composiciones similares que los vidrios sodocálcicos, pero en este caso, se reemplaza el sodio por átomos de potasio. Son conocidos como vidrios duros o vidrios Bohemian. Son vidrios con alto punto de fusión por lo que no funden a bajas temperaturas. Son utilizados para producir artículos de laboratorio, tubos de combustión y vidriería culinaria.

d) Vidrios borosilicatos

Los vidrios borosilicatos son utilizados para material de laboratorio, utensilios de cocina, debido a la alta resistencia al calor y al choque térmico. Estos vidrios presentan baja resistencia térmica, lo que permite ser utilizada en la unión de metales. Además, estos vidrios poseen una alta resistencia mecánica y al ataque químico. Una composición particular es la siguiente: 81 % SiO_2 , 13 % B_2O_3 , 4 % Na_2O y 2 % Al_2O_3 (Bray, 2001, p. 56; Shelby, 2005, p.267).

En las Figuras 1.4 y 1.5, representan diagramas trifásicos para unos vidrios borosilicato de sodio y de calcio, respectivamente, cuyos óxidos constituyentes son: sílice (SiO_2), óxido de boro (B_2O_3), óxido de sodio (Na_2O) /óxido de calcio (CaO). Estos gráficos son útiles en la determinación de la temperatura de fusión de las cargas propuestas con las sales fundentes y con el vidrio reciclado utilizadas en esta experimentación.

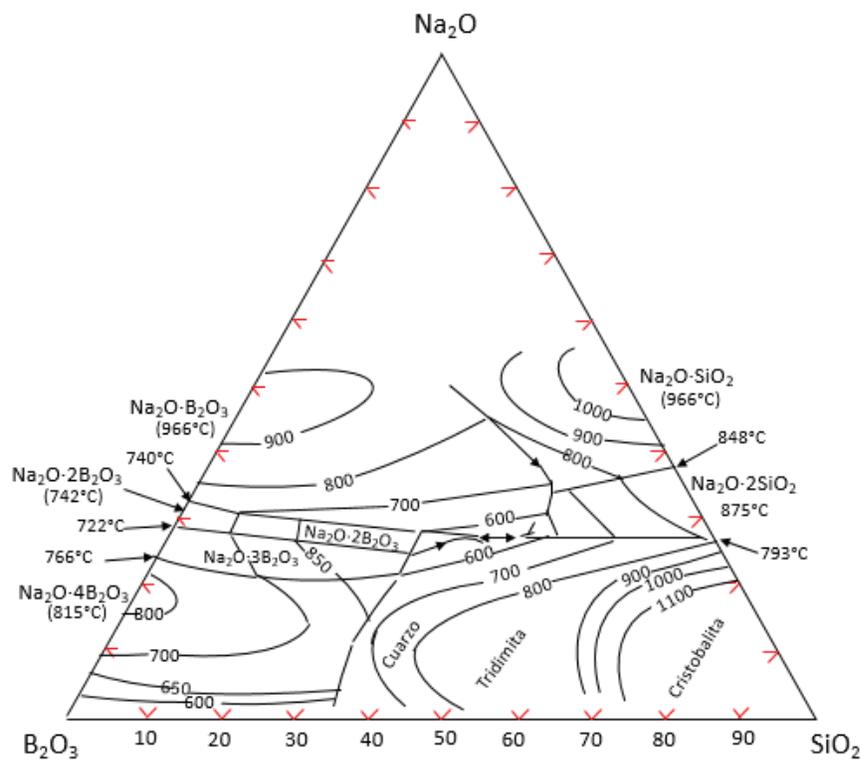


Figura 1.4. Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$
(Fernández, 1991, p. 167)

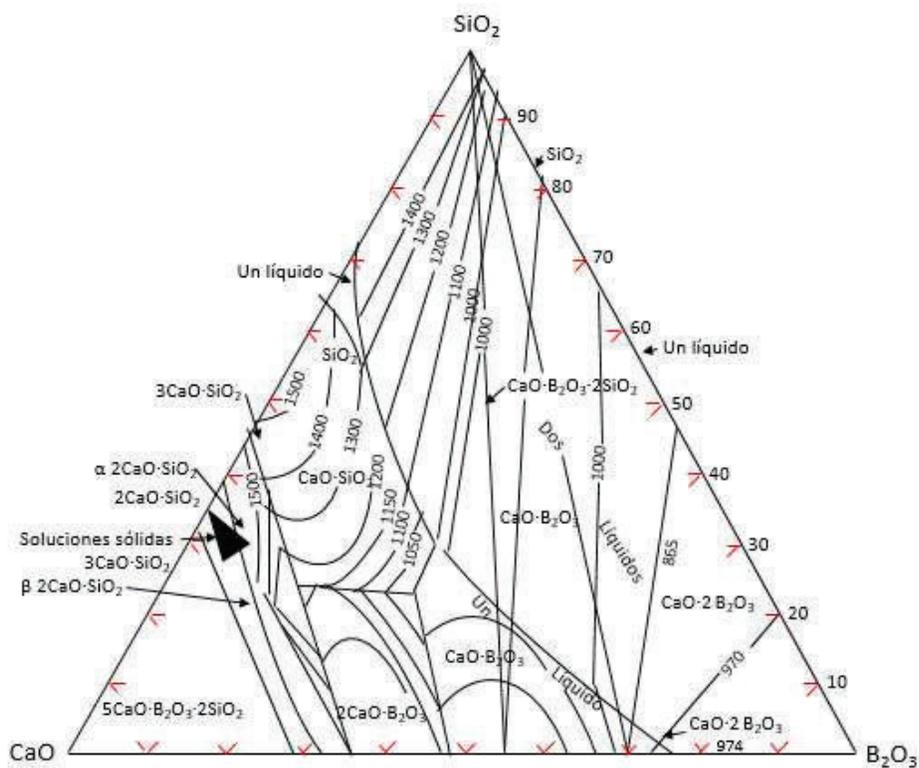


Figura 1.5. Diagrama ternario sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaO}$
(Marrillet y Rottner, 2013)

Tabla 1.2. Composiciones químicas de vidrios comerciales

Tipo	SiO₂ (%)	Na₂O (%)	CaO (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)
Botella (verde)	60-65	7-15	7-15	2-7	< 2
Botella (transparente)	71-75	5-15	5-15	1-4	-
Laminado	71-74	13-17	10-15	0,5	< 0,2
Bombilla	72-75	12-15	10-12	0,1	-

(Caselles, Gómez, Molero y Sardá, 2015, p. 399)

f) Fritas de esmalte

Las fritas de esmalte se tratarán dentro de este grupo, ya que las mismas poseen características similares a los vidrios. Se entiende por fritas de esmalte a todo material vítreo obtenido por fusión de materias y con enfriamiento rápido. La temperatura de fusión de las materias constituyentes de los esmaltes se encuentra alrededor de los 1 300-1 500 °C, los compuestos solubles en agua al momento de fundirse, producen una masa vítrea insoluble (Escribano, Carda y Cordoncillo, 2001, pp. 25-26).

Las ventajas que presentan las fritas frente al vidrio son: la aplicación sobre superficies se produce con mayor uniformidad, reduciéndose el efecto de la segregación de la masa vítrea. Las fritas funden a temperaturas y tiempos más bajos, en comparación con cargas fundentes de igual composición, esta ventaja permite la adición de una mayor proporción de óxidos como el SiO₂ y Al₂O₃, los cuales mejorarían las propiedades mecánicas y químicas del vidrio (Escribano, Carda y Cordoncillo, 2001, pp. 111-112).

1.2.1.5. Aplicaciones del vidrio

El vidrio por ser un material duro, frágil y transparente presenta un sin número de aplicaciones a nivel industrial.

- En medicina son muy utilizados los vidrios bioactivos, también conocidos como biomateriales. Se definen como materias sintéticas destinadas a la producción de dispositivos médicos que guardan una interacción con los sistemas biológicos. Los productos obtenidos a partir de estos materiales son los siguientes: implantes dentales, rellenos para huesos temporales, en cirugía de columna vertebral, reconstrucción maxilofacial, entre otras (El-Meliegy y Van Noort, 2012, pp. 3 y 5).
- Las fibras de vidrios se caracterizan por ser resistentes, elásticas y de alta duración. Se emplean como aislantes térmicos de cerramientos, techos, cubiertas, etc. En juntas de carpintería, en recipientes y depósitos de agua. Como aislante acústico en paredes, suelos y techos. En redes de la comunicación (TV, radio, internet) y en hormigones armados (Crespo, 2010, pp. 292-293).
- Un gran porcentaje del vidrio comercial es utilizado en la fabricación de envases de bebidas, conservas y otros alimentos. Los recipientes vítreos toman un gran interés en la conservación y en la calidad de los alimentos procesados envasados (Escudero, 2015, p. 170).
- Los vidrios de óxido de boro son aptos para material de laboratorio, utensilios de cocina y otros. La composición boro-silicato en estos materiales hace que el coeficiente de expansión térmica sea bajo, por lo cual, son resistentes al calor, y además al ataque químico (Higgins y Bolton, 2010, p. 312).
- Los vidrios calcógenos basados en elementos de S, Te y Se, con la adición de elementos como As, Sb, Ge, Ga, entre otros tienen aplicaciones de actividad óptica. Estos materiales son dopados de tierras raras como Er, Pr, Nd, otros,

para optimizar su actividad. En la actualidad, los vidrios calcógenos son incorporados en la tecnología de las telecomunicaciones, con el fin de mejorar las propiedades físicas de sistemas de fibra o planares (Zakery y Elliott, 2007, p. 1).

1.2.1.6. Impregnación de vidrio en carbón activado

Díaz (2015), realizó ensayos de impregnación de vidrio en la superficie de carbón activado. Las materias primas utilizadas para formular la composición del vidrio fueron: metasilicato de sodio pentahidratado, tetraborato de sodio decahidratado y óxido de calcio. El carbón activado fue de cuesco de palmiste, con una dureza del 58 % y un índice de yodo de 298 mg I₂/g (p. 69).

Se determina que la incorporación de óxido de calcio en la carga fundente, no presenta mejores resultados en la dureza de los compósitos obtenidos con las tres sustancias estudiadas. Y concluye, que los mejores constituyentes del vidrio son el metasilicato de sodio y el tetraborato de sodio.

La carga fundente para obtener el compósito de mayor resistencia mecánica fue de composición, 75 % de metasilicato de sodio y 25 % tetraborato de sodio. La dureza del compósito con aquella composición fue de 82 %, representando un incremento del 41 % de la dureza con respecto de la inicial. En contraparte, el índice de yodo se ve afectado con una disminución de su valor en un 63 % (Díaz, 2015, pp. 69 y 87).

Las condiciones óptimas encontradas por este proceso se definen: 50 g de carga fundente (75 % Na₂SiO₃·5H₂O y 25 % Na₂B₄O₇·10H₂O), 950 °C como temperatura de fusión y 3 horas de fusión. Además, el compósito obtenido tiene una capacidad de adsorción de oro de soluciones sintéticas del 62 %, se observa en la Figura 1.7, con respecto al carbón activado con un 77 % (Díaz, 2015, pp. 64, 75 y 69).

Por lo tanto, en esta investigación se seleccionó las mejores condiciones de operación. En este caso, se trabaja con carbones activados de mayor grado de

activación (cercanos a 900 mg I₂/g), con el fin de evaluar las propiedades de adsorción luego de la impregnación.

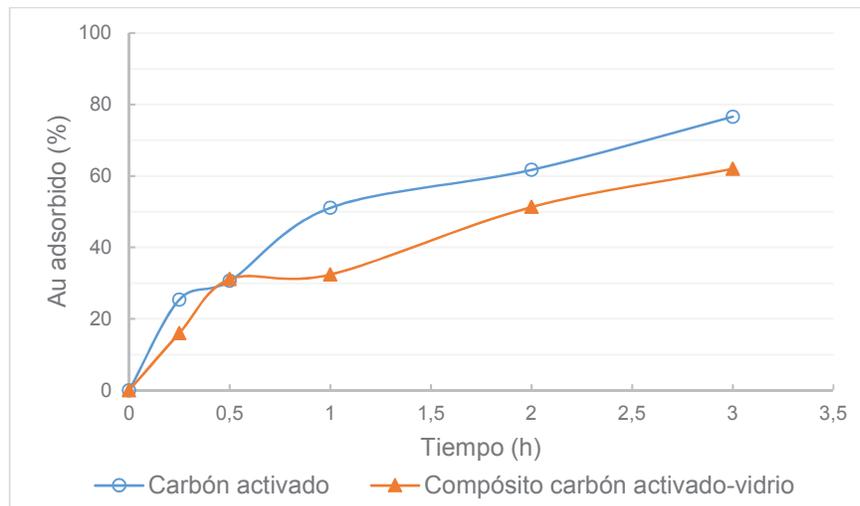


Figura 1.7. Recuperación de oro versus el tiempo para el carbón activado y el compuesto carbón activado-vidrio
(Díaz, 2015, p. 76)

1.2.2. LOS POLÍMEROS

La palabra polímeros proviene de los vocablos griego (*poly* y *meros*), cuyo significado es mucho y partes, respectivamente (Carraher, 2013, p. 25). Un polímero es una macromolécula constituida por una serie de unidades de moléculas repetitivas. La sustancia primaria se conoce como monómero, el cual se puede unir con otras moléculas de su misma especie o de diferente constitución. Cuando el monómero es de la misma composición química se dice que se tiene un homopolímero. En cambio, si se tiene distinta constitución el polímero se conoce como copolímero (Beltrán y Marcilla, 2012, pp. 17, 18).

1.2.2.1. Aplicaciones de los polímeros

- El polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno y polietileno tereftalato son los plásticos más utilizados en aplicaciones de embalaje (Alavi et al., 2015, p. 4).

- Dentro de la medicina, se tiene el uso de copoliésteres segmentados en implantes de largo plazo para aplicaciones ortopédicas. Los polímeros anfifílicos por ser resistentes al impacto son utilizados en la regeneración de tejidos de cartílago. Además, sistemas de cianoacrilato son conocidos como sellantes y adhesivos de fracturas de huesos y dientes (Shalaby y Salz, 2007, p. 4).
- En el área de la construcción, por ejemplo, el policloruro de vinilo es usado en la fabricación de cubiertas protectoras, en canalizaciones y guías de cortinas. El policarbonato y el polimetilmetacrilato en materiales protectores transparentes en alumbrado, construcción y en la edificación (Beltrán y Marcilla, 2012, p. 143).

1.2.2.2. Impregnación de resinas poliméricas en carbón activado

Miño (2004), en su investigación, realizó el estudio de la impregnación de resinas en carbón activado. Las resinas estudiadas fueron las siguientes: fenólica éster, fenólica HL-46, epóxica de baja viscosidad y acrílica. El carbón activado utilizado de dureza del 87 % e índice de yodo de 625 mg I₂/g (pp. 44 y 70).

En su estudio, se realizó una modificación de la norma ASTM para la determinación de la dureza, utilizando 24 mL de carbón, que la norma requiere de 100 mL. Este cambio fue realizado ya que se utilizaron materias primas de costo elevado y poca accesibilidad a las mismas. Por lo cual, la dureza del carbón virgen con la norma modificada fue de 75 % (Miño, 2004, p. 70).

La resina seleccionada fue la fenólica HL-46, por su costo accesible comparada con las demás utilizadas. Las condiciones de operación del proceso de impregnación comprenden: 20 minutos de impregnación en carbón, temperatura de polimerización 150°C y el tiempo de exposición a la polimerización de 30 minutos. Como resultado, obtuvo un compuesto del 93 % de dureza, con índice de yodo de 360 mg I₂/g. Se nota un incremento de la dureza de 24 % y una disminución del índice de yodo de 42 % (Miño, 2004, pp. 65 y 70). La capacidad de adsorción de oro por el compuesto fue de 27 %, se presenta en la Figura 1.8, en comparación con el carbón activado, la cual fue de 99 % (Miño, 2004, pp. 71-73).

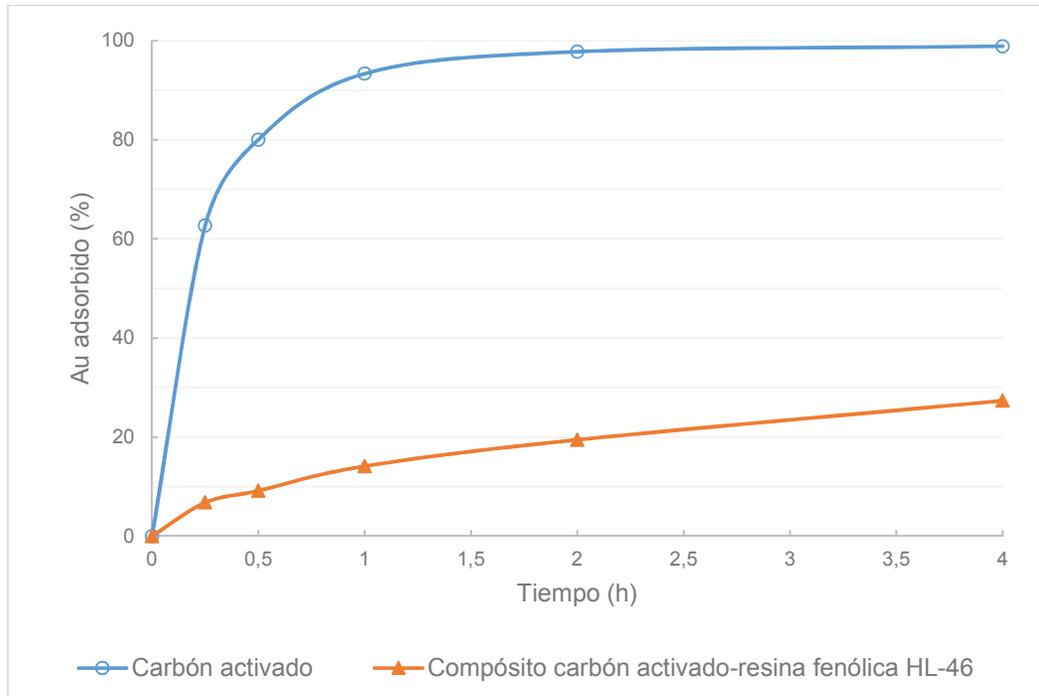


Figura 1.8. Recuperación de oro versus el tiempo para el carbón activado y el compuesto carbón activado-resina fenólica HL-46 (Miño, 2004, pp. 71-72)

En la experimentación propuesta, se hizo uso de un polímero del silicio conocido como polisilano (silicona comercial), para evaluar la influencia de la impregnación del material polimérico en carbón activado. Se evalúa, el volumen a impregnarse, el incremento de la dureza y la variación del índice de yodo. Además, se eligió esta sustancia por su relativo bajo costo y su amplia accesibilidad en el mercado.

1.2.3. POLISILANO

Los polisilanos se obtienen como homopolímeros o copolímeros, todo depende de los radicales enlazados a los átomos de silicio. La cadena de continuidad es ocupada por dos enlaces. Estos materiales son resistentes a temperaturas no superiores a los 300 °C; son inertes al oxígeno y ligeramente susceptibles a la hidrólisis. Cumplen una amplia aplicación como materiales cristalinos e insolubles. Son constituyentes de sólidos parcialmente cristalinos, flexibles, amorfos y elastómeros (Mark, Allcock y West, 2005, pp. 200-201).

1.2.3.1. Usos de los polisilanos

- En microelectrónica, para la producción de fotoresistores de acción ultravioleta. En electrofotografía, como elementos de fotoconductores (Mark, Allcock y West, 2005, 201).
- Por su composición elemental los polisilanos son precursores de carburo de silicio.
- Utilizados como matriz de diodos orgánicos de emisión de luz fosforescente.
- Por sus propiedades de semi y fotoconducción, son aplicados en energía fotovoltaica orgánica. Además, en semiconductores de efecto de campo orgánico (Muzafarov, 2011, pp. 21-27).

2. PARTE EXPERIMENTAL

Las materias primas utilizadas en la experimentación corresponden a carbones activados derivados de materiales lignocelulósicos como el cuesco de palmiste y el cuesco de coco. Cuando el cuesco de palmiste se somete a procesos de carbonización y de activación, se obtienen carbones activados con definidas propiedades físicas, químicas y de adsorción.

Se trabajó con un carbón activado granular mallas # 4×8 (-4,75 mm +2,36 mm) producido por activación física con vapor de agua y dióxido de carbono, a partir de cuesco de palmiste. Los ensayos de impregnación de las diferentes sustancias en el material carbonáceo, se los realizó con carbones de bajo índice de yodo (CBA) menor a 200 mg I₂/g. Con los mejores resultados obtenidos en cada una de las técnicas utilizadas, se realizaron procesos de impregnación con carbones de alto índice de yodo (CAA) cercano a los 900 mg I₂/g. Asimismo, se realizó una comparación de las propiedades con un carbón comercial Calgon GRC20.

Las materias primas usadas como fuentes de sílice (SiO₂) para la formulación de vidrios fueran las siguientes:

- Metasilicato de sodio pentahidratado (Na₂SiO₃·5H₂O)
- Vidrios de botellas recicladas
- Fritas de esmalte

Los parámetros que se estudiaron para la impregnación de vidrio en carbones activados utilizando como materia prima metasilicato de sodio fueron los siguientes: cantidad de la carga fundente de 10, 20, 30, 40 y 50 g por 100 g de carbón; composición de la carga fundente de 25, 50 y 75 % Na₂SiO₃·5H₂O y 75, 50 y 25 % tetraborato de sodio decahidratado (Na₂B₄O₇·10H₂O), respectivamente; temperaturas de fusión de 900, 950 y 1 000 °C y tiempos de fusión de 1, 2 y 3 horas.

Para el caso de la incorporación de vidrio reciclado, las botellas fueron reducidas de tamaño y trituradas en un pulverizador de discos. El polvo obtenido fue tamizado

en seco en malla # 100 y el pasante fue separado por deslamado en malla # 400. Se formularon 4 cargas fundentes con la adición de 0, 5, 10 y 20 % de tetraborato de sodio, para las 3 granulometrías estudiadas (+150, -150+38 y -38 μm), las cuales se trataron térmicamente a 900, 950 y 1 000 °C por 1 hora. Las composiciones que presentaron las mejores características vítreas fueron utilizadas en la impregnación de 200 g de material vítreo por 100 g de carbón.

En el caso de las fritas, se utilizaron 3 tipos de diferente composición, a las cuales se adicionaron un 5, 10 y 20 % de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. A las cargas formuladas se las sometió a un proceso térmico a 600, 700 y 800 °C por 1 hora. Las composiciones que lograron fundirse fueron seleccionadas para impregnar 50, 100 y 150 g por 100 g de carbón. Asimismo, se evaluó el tiempo de fusión de los materiales compuestos a 15, 30 y 60 min, con el fin de evaluar el rendimiento de producción de los compósitos.

Por otro lado, se evaluó la influencia de la impregnación de polisilano (silicona líquida comercial) en carbón activado. El parámetro que se estudió fue la variación de volumen de polímero impregnado (10, 20, 30, 40 y 50 mL) por cada 100 g de carbón activado.

Para determinar la influencia de la impregnación de vidrio como de polisilano, se realizaron ensayos de dureza de los compósitos obtenidos, mediante el uso de la norma ASTM D3802-10 y la norma ecuatoriana NTE INEN 1989:94. La resistencia a la abrasión con ensayos de pérdidas por atrición. El análisis próximo midió el porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo de cada compuesto. Se determinó el índice de yodo y la superficie específica por las isothermas BET. La morfología se evaluó con las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Y la capacidad de adsorción se determinó con las cinéticas de adsorción de oro.

La Figura 2.1 muestra el resumen del esquema del proceso experimental realizado para la obtención de compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano.

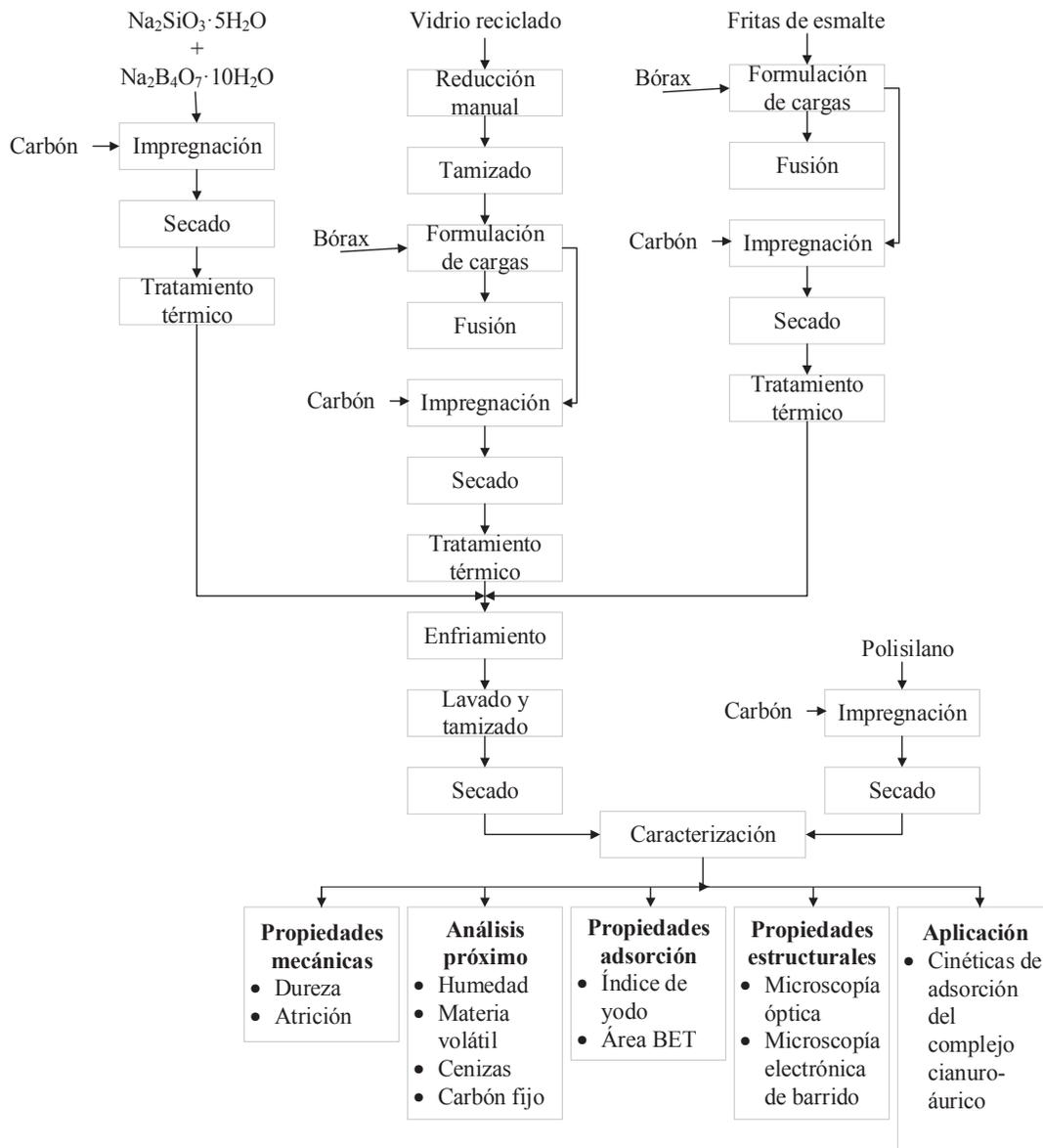


Figura 2.1. Diagrama de flujo general del proceso

2.1. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA IMPREGNACIÓN DE VIDRIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CARBÓN

En esta sección, se realizaron ensayos de impregnación de vidrio, utilizando como fuente de sílice (SiO_2), tres materias primas: metasilicato de sodio pentahidratado, vidrio de botellas recicladas y fritas de esmalte.

2.1.1. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE METASILICATO DE SODIO PENTAHIDRATADO PARA LA FORMULACIÓN E IMPREGNACIÓN DE VIDRIO EN LA SUPERFICIE DEL CARBÓN ACTIVADO

En la Figura 2.2 se ilustra el diagrama de flujo del proceso experimental para la impregnación de sales fundentes en carbón, cuya metodología se detalla en los 3 siguientes puntos presentados en esta sección.

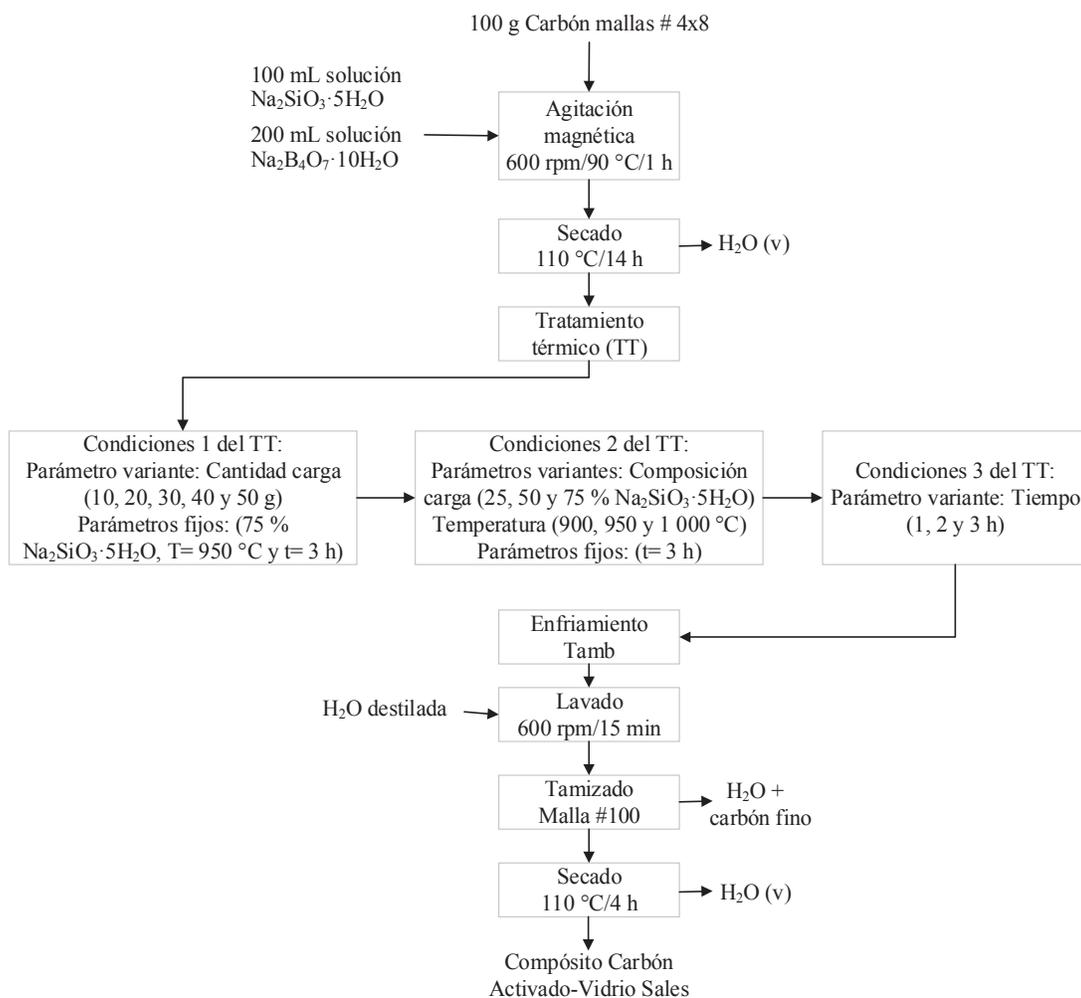


Figura 2.2. Diagrama de flujo del proceso de impregnación de sales fundentes en el carbón

2.1.1.1. Determinación de la cantidad de carga fundente a impregnarse en el carbón activado

La determinación de la cantidad óptima de carga fundente se efectuó con ensayos de impregnación de 10, 20, 30, 40 y 50 g de sales por cada 100 g de carbón CBA,

respectivamente. La composición seleccionada fue de 75 % metasilicato de sodio pentahidratado y 25 % tetraborato de sodio decahidratado, debido a que esos valores son recomendados por bibliografía (Díaz, 2015, p. 65).

Las soluciones de metasilicato se formularon disolviendo 7,5; 15,0; 22,5; 30,0 y 37,5 g de la sal en 100 mL de agua destilada. Por tanto, las soluciones de tetraborato correspondientes se prepararon con la disolución de 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 y 12,5 g de la sal en 200 mL de agua destilada. Se mezclaron los 100 g de carbón con las soluciones de metasilicato y de tetraborato correspondientes, por agitación magnética y las muestras se calentaron a 90 °C en una plancha de calentamiento por un periodo de una hora. La humedad restante se eliminó por evaporación total en reposo. Las muestras se secaron en una estufa a una temperatura de 110 °C.

Las muestras secas fueron ingresadas en una mufla desde la temperatura ambiental hasta alcanzar los 950°C, condiciones 1 del tratamiento térmico, presentadas en la Figura 2.2. Una vez a la temperatura de trabajo, las muestras permanecieron en la mufla por un periodo de tres horas. Luego, se apagó la mufla y las muestras estuvieron dentro del equipo hasta un enfriamiento a temperatura ambiental. Se realizó un lavado de los compósitos (carbón activado-vidrio) con agua destilada con agitación mecánica a 600 rpm por un periodo de 15 minutos. Se tamizó los carbones húmedos con malla #100 (150 µm) y se secaron completamente los compósitos en estufa a 110°C.

Se determinó la dureza inicial del carbón CBA y la correspondiente a los compósitos carbón-vidrio mediante el método ASTM D3802-10 y la norma ecuatoriana NTE INEN 1989:94. De los cinco ensayos se seleccionó el compósito que presenta la mayor la resistencia mecánica con respecto al carbón virgen.

2.1.1.2. Determinación de la temperatura de fusión y composición de la carga fundente

Con la cantidad de carga fundente seleccionada en la sección 2.1.1.1, se formularon ensayos (condiciones 2 del TT, Figura 2.2), donde se utilizaron tres

temperaturas: 900, 950 y 1 000 °C y tres composiciones de carga fundente: 75, 50 y 25 % de metasilicato de sodio pentahidratado con los respectivos porcentajes de tetraborato de sodio decahidratado. El proceso de impregnación, secado y fundido de las muestras es el mismo ejecutado en el procedimiento anterior. En este caso se obtuvieron nueve compósitos, de los cuales se seleccionó el compósito que presentó la mayor dureza.

2.1.1.3. Determinación del tiempo de fusión de los compósitos

Determinada la temperatura del tratamiento térmico y la composición de la carga fundente, se realizaron ensayos de fusión a los tiempos de 1, 2 y 3 h a la temperatura encontrada, con el fin de evaluar el rendimiento de producción de los compósitos. De los tres ensayos, se seleccionó el material compuesto que presentó la mayor dureza y el mayor rendimiento. Se entiende como rendimiento de producción, a la cantidad de compósito obtenido por cantidad de materiales primas utilizadas.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Peso compósito}}{\sum \text{Pesos componentes}} * 100 \quad [2.1]$$

2.1.2. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE VIDRIO DE BOTELLAS RECICLADAS EN EL PROCESO DE IMPREGNACIÓN

En este caso se reemplazó el uso de metasilicato de sodio pentahidratado por vidrio de botellas recicladas. Para la reducción de tamaño del vidrio, se rompió manualmente las botellas con un martillo. Seguido, se pulverizó los trozos vítreos en un pulverizador de discos por un tiempo de dos minutos. Se realizó un tamizado seco, con malla #100 (150 µm). La fracción menor a 150 µm se tamizó en húmedo con malla #400 (38 µm). El material fino se dejó sedimentar, se retiró el agua clarificada y se secó el vidrio en una estufa a la temperatura de 110 °C.

En la Figura 2.3 se muestra la metodología experimental para la obtención de compósitos de carbón activado-vidrio reciclado. Asimismo, en los dos puntos siguientes se detalla el procedimiento que se presenta en la figura.

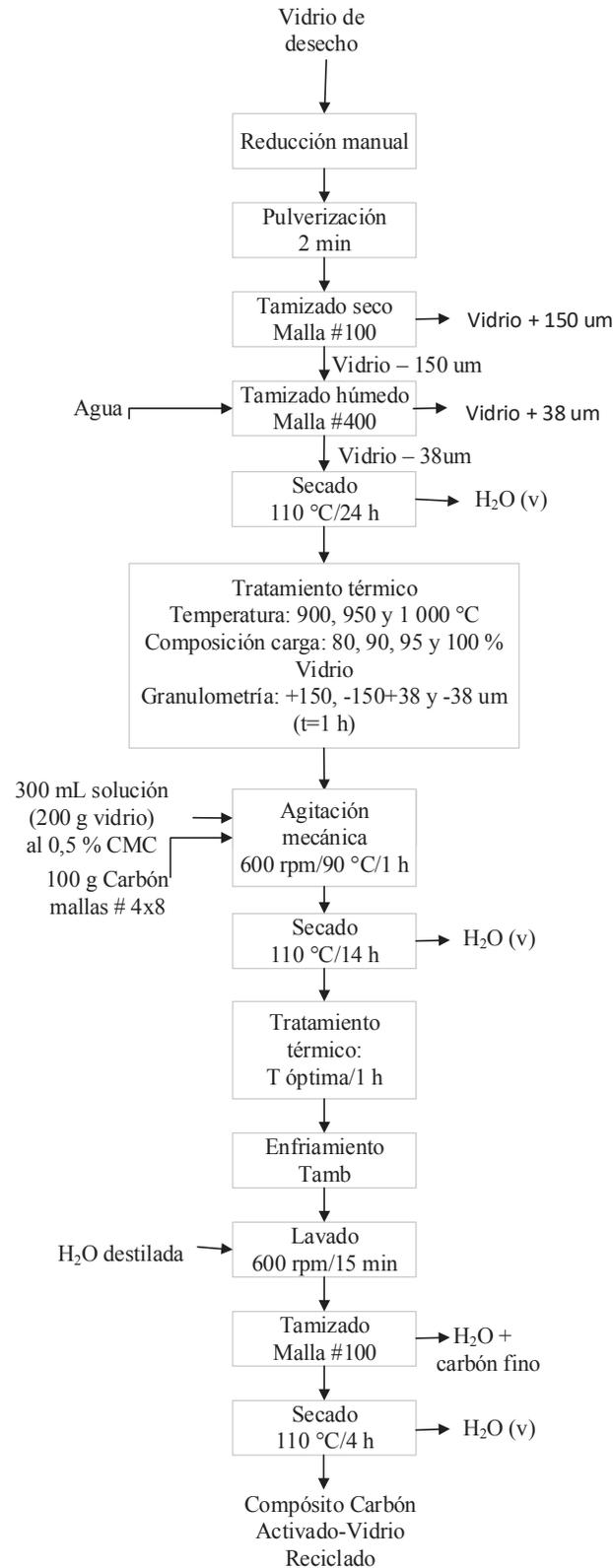


Figura 2.3. Diagrama de flujo del proceso de impregnación de vidrio reciclado en el carbón

2.1.2.1. Determinación de la composición, granulometría y temperatura de fusión de la carga fundente

Los parámetros que se estudiaron con la utilización de vidrio de botellas recicladas fueron los siguientes: la granulometría de vidrio, la composición y temperatura de fusión de la carga fundente.

Se realizaron ensayos de fusión de los diferentes vidrios: vidrio retenido en malla # 100 (+150 μm), vidrio retenido en malla # 400 (-150 +38 μm) y vidrio pasante de malla # 400 (-38 μm). Asimismo, se evaluó la fusión de las tres granulometrías de vidrio con un 5, 10 y 20 % de tetraborato de sodio decahidratado. Las temperaturas de fusión a las cuales se desarrolló las fundiciones fueron 900, 950 y 1 000°C por el tiempo establecido en la formulación de compósitos carbón activado-vidrio sales fundentes.

Se eligieron las cargas que fundieron a la menor temperatura, con el fin de minimizar pérdidas de carbón por combustión en la producción de los compósitos.

2.1.2.2. Determinación de la dureza de carbones impregnados en función de la carga fundente

Las cargas fundentes que presentaron las mejores condiciones de fusión, se utilizaron para impregnar en 100 g de carbón activado, 200 g de carga fundente (vidrios reciclados de diferentes granulometrías con su respectivo porcentaje de bórax) contenidos en una solución al 0,5 % de CMC (carboximetilcelulosa) aforada a un volumen de 300 mL con agua destilada. La temperatura de impregnación fue 90 °C por una hora con agitación mecánica a 600 rpm. Se secaron las mezclas (carbón activado-vidrio) a 110 °C en una estufa.

El proceso de fundido se realizó similar a los ensayos anteriores, con el mejor tiempo de fusión encontrado. De los compósitos obtenidos, se seleccionó el que presentó la mayor dureza.

2.1.3. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE FRITAS DE ESMALTADO COMO ENDURECEDOR DE LA SUPERFICIE DEL CARBÓN ACTIVADO

En este método se utilizaron 3 tipos de fritas comerciales, las cuales son usadas en el esmaltado de materiales cerámicos. Se decidió utilizar estos materiales, debido que los mismos tienen un coeficiente de dilatación térmica bajos. Este factor es importante en el momento de realizar esmaltados, porque de esta manera se garantiza que el esmalte pueda adherirse a la superficie a ser tratada.

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de flujo para la obtención de compósitos de carbón activado-vidrio fritas, cuyo procedimiento experimental está relacionado con la metodología planteada en los 3 siguientes puntos:

2.1.3.1. Determinación de la temperatura de fusión de la carga fundente

En la experimentación se propuso utilizar tres tipos de fritas comerciales de diferentes composiciones. Se formularon tres composiciones de cargas por cada frita, con un 5, 10 y 20 % de tetraborato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), respectivamente. Se obtuvieron 9 composiciones de esmaltes (tres por cada frita). A las mezclas sólidas, se adicionó agua hasta obtener una pulpa al 40-50 % de sólidos. Cada pulpa se colocó en una navecilla y las mismas se secaron en una estufa a 110 °C.

Las muestras se sometieron a fusión a tres temperaturas diferentes: 600, 700 y 800 °C. Las muestras fueron ingresadas a una mufla desde la temperatura ambiental, se calentaron hasta la temperatura de fusión, permanecieron a esa temperatura por un tiempo de 1 hora y se apagó el equipo transcurrido dicho tiempo.

En este punto, se seleccionó las composiciones de carga fundente que lograron fundirse a la menor temperatura posible, con el fin de minimizar pérdidas de carbón por combustión, en la producción de los compósitos.

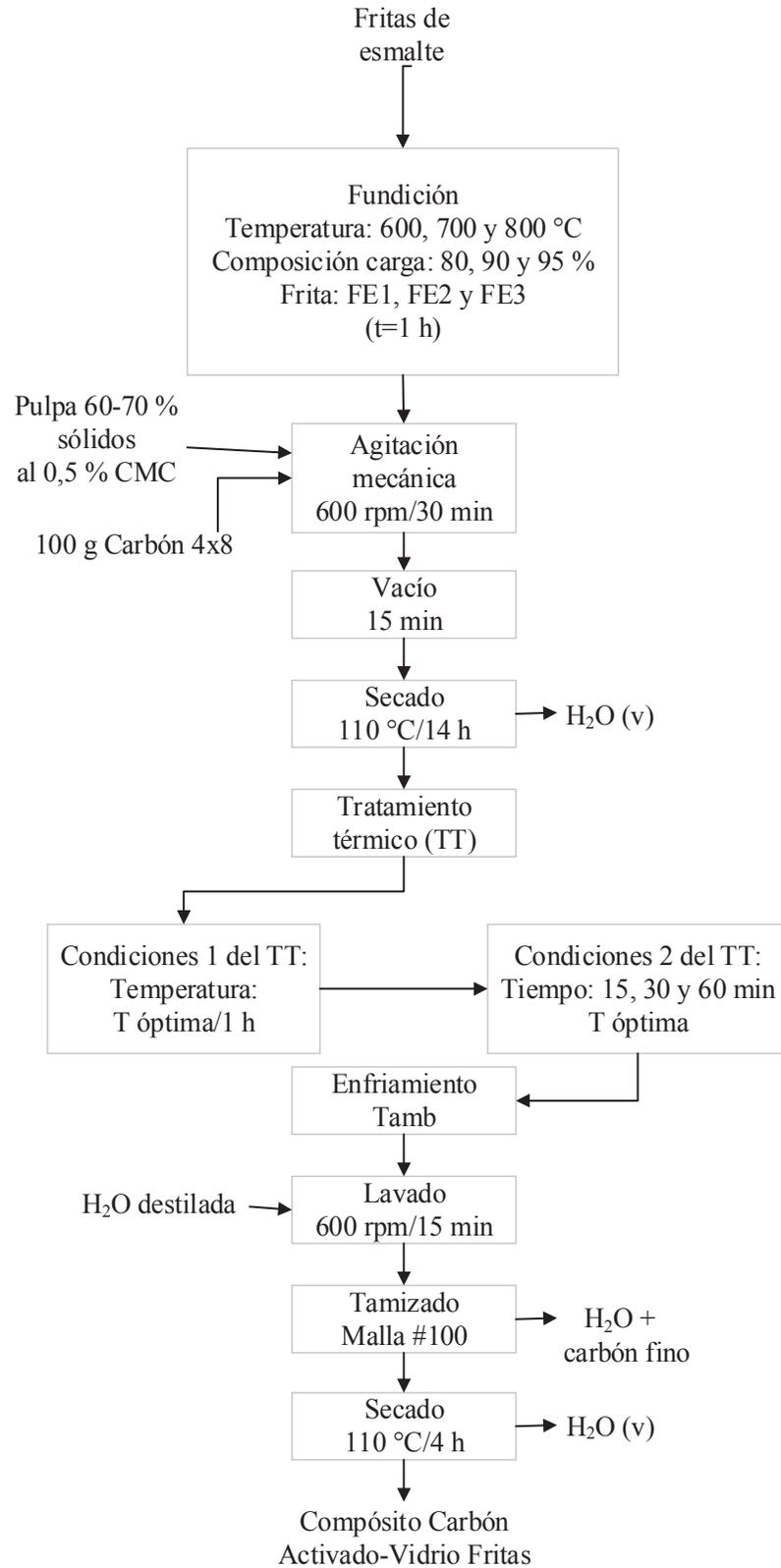


Figura 2.4. Diagrama de flujo del proceso de impregnación de fritas de esmalte en el carbón

2.1.3.2. Determinación de la cantidad de carga fundente impregnada en el carbón

Con las composiciones de las cargas fundentes y la temperatura de operación determinadas, se realizaron ensayos de impregnación con carbón activado. Se formularon cargas fundentes con las composiciones elegidas, adicionando a la misma una solución acuosa de CMC al 0,5 % hasta obtener una pulpa al 60-70 % de sólidos. Se probaron con 50, 100 y 150 g de carga fundente por cada 100 g de carbón CBA. Las pulpas con el carbón fueron agitadas con agitador mecánico por media hora y se sometieron las mezclas a vacío por un periodo de 15 minutos (con el fin de eliminar los gases presentes en la porosidad del carbón y lograr la adsorción de la mayor cantidad de carga fundente), con la utilización de una bomba de vacío. Se fundieron las mezclas carbón activado-carga fundente en la mufla a las condiciones de operación encontradas en la sección 2.1.3.1.

2.1.3.3. Determinación del tiempo de fusión de los compósitos

Determinada la cantidad de carga fundente de la sección 2.1.3.2 a impregnar en el carbón activado, se realizaron ensayos de fusión a tiempos de 15, 30 y 60 minutos. En este caso, se seleccionó el compósito que presentó la mayor dureza en el menor tiempo posible y con un buen rendimiento de producción.

2.2. EVALUACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN DE POLISILANO EN CARBÓN ACTIVADO PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CARBÓN

Se propuso un método diferente a los explicados anteriormente, con el mismo objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de carbones activados, utilizando como agente reforzador: polisilano (silicona líquida comercial). En la Figura 2.5 se detalla el proceso de obtención de compósitos de carbón activado-polisilano.

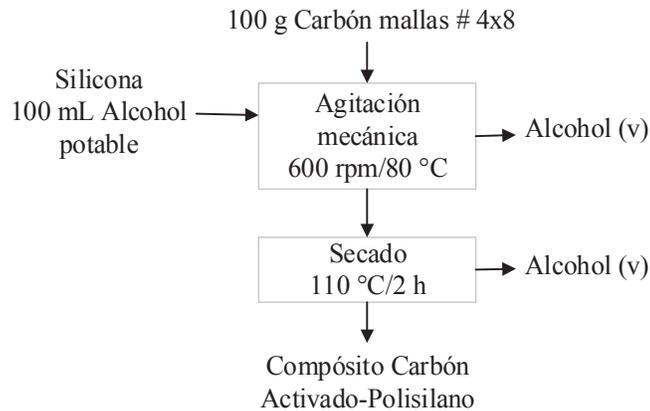


Figura 2.5. Diagrama de flujo del proceso de impregnación de polisilano en el carbón

Las pruebas con el carbón CBA consistieron de la siguiente manera: se disolvieron 10, 20, 30, 40 y 50 mL de polisilano en 100 mL de etanol potable, respectivamente. Se adicionaron 100 g de carbón CBA a cada solución, se calentaron las mezclas a 80 °C con una agitación mecánica a 600 rpm. Los compósitos libres de alcohol, se secaron en una estufa a 110 °C.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS Y LOS COMPÓSITOS OBTENIDOS

2.3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS CARBONES ACTIVADOS Y COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO

2.3.1.1. Determinación de la dureza

El número de dureza mide la resistencia mecánica del carbón a reducirse de tamaño o romperse, cuando existe la acción de un agente externo sobre el mismo. Los ensayos realizados se aplicaron tanto al carbón activado como a los compósitos obtenidos. El objetivo de la técnica estuvo encaminada a la determinación del porcentaje de dureza de los carbones producidos en la experimentación.

Las normas aplicadas en la determinación de la dureza de carbones fueron: norma ASTM D35802-10 y la norma ecuatoriana NTE INEN 1989:94. Las normas especificadas se detallan en el ANEXO I.

2.3.1.2. Determinación de pérdidas por atrición

El ensayo de pérdidas por atrición en carbones activados, mide la resistencia del carbón a la erosión y rompimiento durante su uso. Esta técnica mide el porcentaje de recuperación y de pérdidas del carbón mediante un tamizado húmedo del material atricionado. El proceso de la técnica aplicada fue el siguiente:

Se pesaron 300 g de carbón y se adicionó 300 mL de agua destilada para formular una pulpa al 50 % de sólidos. Luego, la pulpa fue vertida dentro de la base de la celda, se la mezcló con un agitador adaptado a la celda a una velocidad de 900 rpm por un periodo de 24 horas. Terminado el tiempo de operación, se apagó el equipo y se tamizó el carbón en húmedo con la malla # 8. Se secó el carbón tamizado en una estufa a 110 °C. Por último, se tamizó 100 g de carbón atricionado y se realizó el ensayo de dureza, para determinar la influencia de la atrición en las propiedades mecánicas del carbón activado y de los compósitos.

Las pérdidas de carbón por atrición representan el porcentaje de material pasante de la malla de granulometría establecida. El tamaño de partícula fue $-4,75 \text{ mm} +2,36 \text{ mm}$ (mallas # 4x8). Cálculos determinados con las Ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\% \text{Recup. CA} = \frac{m_{\text{ret. mt}}}{m_0} 100 \quad [2.1]$$

$$\% \text{Pérd. CA} = 100 - \% \text{Recup. CA} \quad [2.2]$$

Donde:

% Recup. CA: porcentaje de recuperación de carbón activado

$m_{\text{ret. mt}}$: masa retenida en la malla de trabajo (g)

m_0 : masa inicial (g)

% Pérd. CA: porcentaje de pérdidas de carbón activado (%)

2.3.1.3. Análisis próximo

a) Contenido de humedad

El contenido de humedad mide el porcentaje de agua o humedad que puede ser eliminada del carbón activado por un proceso de secado. La determinación de la humedad del carbón activado se realizó con el uso de la norma ASTM D2867: Standard test methods for moisture in activated carbon.

Materiales y reactivos

- Estufa, marca Memmert Instrumente, modelo UL 80
- Desecador
- Balanza analítica de cuatro cifras decimales
- Crisoles de porcelana

Procedimiento:

Se pesó aproximadamente 1 g de carbón activado en una balanza analítica y se lo colocó en un crisol de porcelana. Se ingresaron los crisoles con las muestras en una estufa a una temperatura de 110 °C por un periodo de 3 horas. Se retiraron los crisoles y se los colocaron en un desecador. El enfriamiento de las muestras fue hasta temperatura ambiente. Por último, se pesaron los crisoles enfriados en la balanza analítica y se reportó el peso de las muestras secas. Este ensayo se realizó por duplicado.

La determinación de la humedad se reportó con un cálculo matemático por medio de la Ecuación 2.3 :

$$M = \frac{C-D}{C-B} 100 \quad [2.3]$$

Donde:

M: humedad del carbón (%)

B: masa del crisol (g)

C: masa del crisol más la muestra original (g)

D: masa del crisol más la muestra seca (g)

b) Contenido de materia volátil

El contenido de materia volátil se define como la fracción de sustancias que pueden evaporarse a temperaturas inferiores a la temperatura de combustión del carbón activado. Un alto contenido de volátiles en materias primas, reduce el rendimiento de la producción de carbones activos, debido al material que se pierde por volatilización.

La determinación del porcentaje de material volátil del carbón activado se realizó con el uso de la norma ASTM D5832: Standard test method for volatile matter content of activated carbon samples.

Materiales y reactivos

- Mufla, marca Comecta
- Desecador
- Balanza analítica de cuatro cifras decimales
- Crisoles de porcelana

Procedimiento:

Con la determinación de la humedad del carbón, se determinó el porcentaje de materia volátil. Para esto se utilizó los pesos registrados en la ficha AI.3, correspondientes a las muestras secas. Los carbones libres de humedad fueron ingresados a la mufla a la temperatura de 950 °C, por un periodo de 7 minutos. Los crisoles fueron colocados con su respectiva tapa. Las muestras fueron retiradas de la mufla y colocadas en el desecador. Una vez enfriadas, se registraron los pesos de los crisoles en una balanza analítica.

El cálculo correspondiente a la determinación del porcentaje de materia volátil presente en el carbón activado, se realizó con el uso de la Ecuación 2.4 :

$$V = \frac{C-D}{C-B} 100 \quad [2.4]$$

Donde:

V: porcentaje de material volátil (%)

B: peso del crisol (g)

C: peso del crisol más la muestra original (g)

D: peso del crisol más la muestra sin volátiles (g)

c) Contenido total de cenizas

El contenido total de cenizas se define como los constituyentes inorgánicos presentes en el carbón. A temperaturas superiores a los 800 °C, se convierten los compuestos inorgánicos en óxidos. Los óxidos en mayor proporción presentes en materiales carbonosos son: la sílice y el óxido de aluminio.

La determinación del porcentaje total de cenizas del carbón activado se realizó con el uso de la norma ASTM D2866: Standard test method for total ash content of activated carbon.

Materiales y reactivos

- Mufla, marca Comecta
- Desecador
- Balanza analítica de cuatro cifras decimales
- Crisoles de porcelana

Procedimiento:

Se continuó con el uso de la muestra secada y sin presencia de volátiles. Se colocaron los crisoles sin tapa en la mufla a 950 °C por 2 horas. Pasado ese tiempo,

se retiraron los crisoles y se los colocó en el desecador. Se reportaron los pesos de los crisoles con las muestras convertidas en cenizas, con la ayuda de la balanza analítica.

El cálculo del contenido total de cenizas presentes en carbones activados se determinó con la Ecuación 2.5:

$$A = \frac{D-B}{C-B} 100 \quad [2.5]$$

Donde:

A: contenido total de cenizas (%)

B: peso del crisol (g)

C: peso del crisol más la muestra original (g)

D: peso del crisol más la muestra convertida en cenizas (g)

d) Contenido de carbón fijo

Por otro lado, el porcentaje de carbón fijo se determinó con la Ecuación 2.6:

$$CF = 100 - V - A \quad [2.6]$$

Donde:

CF: porcentaje de carbón fijo (%)

V: porcentaje de materia volátil (%)

A: contenido total de cenizas (%)

2.3.1.4. Determinación del índice de yodo

El índice de yodo mide de manera indirecta la microporosidad de carbones activos. Se define como los miligramos de yodo que son adsorbidos por gramo de carbón (NTE INEN 1988:94, 1995, p.1).

La metodología aplicada en la determinación del número de yodo, se detallada en el ANEXO I.

2.3.2. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL CARBÓN ACTIVADO Y COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO

2.3.2.1. Análisis de las muestras por Microscopía Óptica

La microscopía óptica es una técnica analítica que mide la macro y la micro estructura de la mayoría de los materiales sólidos. El análisis de materiales compuestos, por ejemplo, materiales reforzados por fibras, se estudia la interacción morfológica que existe entre la materia virgen y la fibra, que se utiliza como elemento de reforzamiento de estructura. Además, con esta técnica se encamina a la resolución de problemas, análisis de fallas, estudio de nuevos materiales y en el control de la calidad (Hayes y Gammon, 2010, pp. 17-19).

La observación de las muestras de carbón activado y de los 4 mejores compósitos se realizó en un microscopio óptico petrográfico, marca Olympus, modelo SZX16-SZX10.

2.3.2.2. Análisis de las muestras por Microscopía Electrónica de Barrido

La microscopía electrónica es una técnica de análisis de muestras sólidas, con la cual se puede conocer la topografía, morfología, estructura y química de las mismas. Existen dos tipos de microscopías electrónicas: de barrido y de transmisión.

Las muestras interaccionan con los electrones bombardeados en una cámara, en la cual se crea un vacío, estas interacciones son causantes de producir emisiones de una variedad de partículas o radiaciones. Las señales detectadas son utilizadas en la caracterización de las muestras. Las imágenes obtenidas pueden estar en el

rango de los micrómetros y de los nanómetros. Además, se puede obtener un análisis semicuantitativo de los elementos presentes (Ayache, Beaunier, Boumendil, Ehret y Laub, 2010, pp. 33, 36).

La morfología del carbón activado como de los 4 compósitos se realizó con el empleo de un microscopio electrónico de barrido, marca Tescan Vega LMU provisto de un analizador EDS Bruker.

2.3.2.3. Análisis BET de los carbones obtenidos

El análisis de superficie específica mediante el modelo BET establece la caracterización de materiales que presentan una determinada superficie específica. El principio de la teoría se fundamenta en el método de Langmuir (adsorción en monocapa), aplicada a la adsorción de múltiple capa.

Las tres importantes hipótesis en las que se basa esta técnica son las siguientes:

- La adsorción física de las moléculas de gas en la superficie del sólido se produce de capa por capa en forma indefinida.
- No existe alguna interacción entre cada capa de adsorción.
- En cada capa de adsorción se aplica la teoría de Langmuir (Rivière y Myhra, 2009, p. 345).

En la experimentación se realizó el estudio de la superficie específica del carbón activado y de los 4 mejores compósitos obtenidos. El equipo utilizado fue un analizador BET, marca Quantachrome NovaWin.

2.3.2.4. Análisis por Fluorescencia de rayos X del vidrio reciclado y de las fritas de esmalte

La técnica de fluorescencia de rayos X consiste en la emisión de rayos X primarios sobre las partículas de la muestra, la cual, a su vez emite rayos X secundarios,

característicos de cada elemento presente. El análisis cualitativo se basa en el reconocimiento de cada radiación y el análisis cuantitativo mide la intensidad de aquellas radiaciones detectadas (Hernández y González, 2002, pp. 42-43).

El vidrio y las fritas de esmalte fueron caracterizadas mediante este método con el uso de un equipo de Fluorescencia de rayos X S8Tiger, con el programa Spectra Plus. Las muestras fueron calcinadas en mufla marca SNOL durante media hora a 700 °C, con el fin de determinar las pérdidas por calcinación. Se pesaron 0,5 g de muestra calcinada con 7 g de fundente, se fundieron en una perladora a una temperatura de 1 050 °C. Las perlas obtenidas se insertaron en el equipo y se realizó un barrido total de las mismas. En el reporte de los resultados, la composición química es elemental y mediante un cálculo estequiométrico, se reportaron los resultados en forma de óxidos.

2.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL COMPLEJO CIANURO-ÁURICO EN EL CARBÓN ACTIVADO Y EN LOS COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO

Inicialmente, se preparó una solución sintética de cianuro-áurico ($[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$). Para esto, se disolvió 1 g de cianuro de sodio con agua destilada previamente regulada a un pH mayor a 10,5, con la adición de NaOH. Se adicionaron 100 mL de solución estándar de oro de 100 mg/L utilizada en espectroscopia de Absorción Atómica y se aforó con agua destilada a un volumen de 1 L.

Se pesó 0,5 g de carbón activado en 5 matraces Erlenmeyer diferentes, y a cada uno se adicionaron 100 mL de la solución sintética de oro, respectivamente. Las mezclas de carbón y solución de oro, se agitaron por la acción de agitadores magnéticos en una plancha de agitación, por periodos de 15, 30, 60, 120 y 180 minutos, respectivamente. Se filtraron cada una de las mezclas en papel filtro retentivo y se tomaron las alícuotas respectivas. La determinación de la

concentración de oro de las soluciones tratadas con carbón activado se realizó con las lecturas por espectrofotometría de absorción atómica con flama en un equipo Perkin Elmer AAnalyst 300. El procedimiento descrito se repite para los cuatros mejores compósitos obtenidos.

Con los resultados de absorción atómica, se realizó gráficas de porcentajes de recuperación de oro (por el carbón activado y por los compósitos seleccionados) a los diferentes tiempos.

De los resultados obtenidos, se comparó las propiedades que presentaron los compósitos respecto al carbón activado virgen CAA, y de los cuales, se seleccionó el compósito que presentó las mejores propiedades mecánicas y la mayor capacidad de adsorción de oro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección muestra los resultados obtenidos en la experimentación del proyecto realizado. La caracterización físico-química y de adsorción se realizó tanto para el carbón activado como para los compósitos obtenidos. Los resultados de las impregnaciones con distintos tipos de vidrio, así como la incorporación de polisilano ($[\text{CH}_3\text{-Si-CH}_3]_n$), se resumen en las tablas y gráficas presentadas en esta sección, en los anexos se muestran las fichas con el detalle de los resultados obtenidos. Asimismo, en esta sección se analizará la influencia de la formación de capas superficiales, sobre la matriz del carbón, en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del mismo.

3.1. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA IMPREGNACIÓN DE VIDRIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DUREZA DEL CARBÓN ACTIVADO

En esta sección se estudió la influencia de la impregnación de vidrio en la matriz del carbón activado con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Las materias primas utilizadas como fuente de sílice fueron las siguientes: metasilicato de sodio pentahidratado, vidrio reciclado y fritas de esmalte.

3.1.1. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE METASILICATO DE SODIO PENTAHIDRATADO PARA LA FORMULACIÓN E IMPREGNACIÓN DE VIDRIO EN LA SUPERFICIE DEL CARBÓN ACTIVADO

3.1.1.1. Influencia de la cantidad de carga fundente impregnada en el carbón

La carga fundente se constituyó de 75 % de metasilicato de sodio pentahidratado y 25 % de tetraborato de sodio decahidratado (bórax), sometidas a un tratamiento térmico de 950 °C por 3 h. En ensayos preliminares se determinó que a 950 °C, la

carga fundente con la composición indicada presentó fusión total de la materias primas utilizadas. Se confirma que la temperatura mínima de fusión para este vidrio es de 930 °C, como se determina en el diagrama de fases ternario presentado en la Figura AII.2 del ANEXO II.

En la Figura 3.1, se reportan las durezas determinadas con base a la metodología descrita en el ANEXO I correspondientes a los compósitos obtenidos en función de las masas de cargas fundentes impregnadas por cada 100 g de carbón de baja activación (CBA). Se observa que, con el aumento de la masa de las sales impregnadas, se obtienen compósitos de mayor dureza.

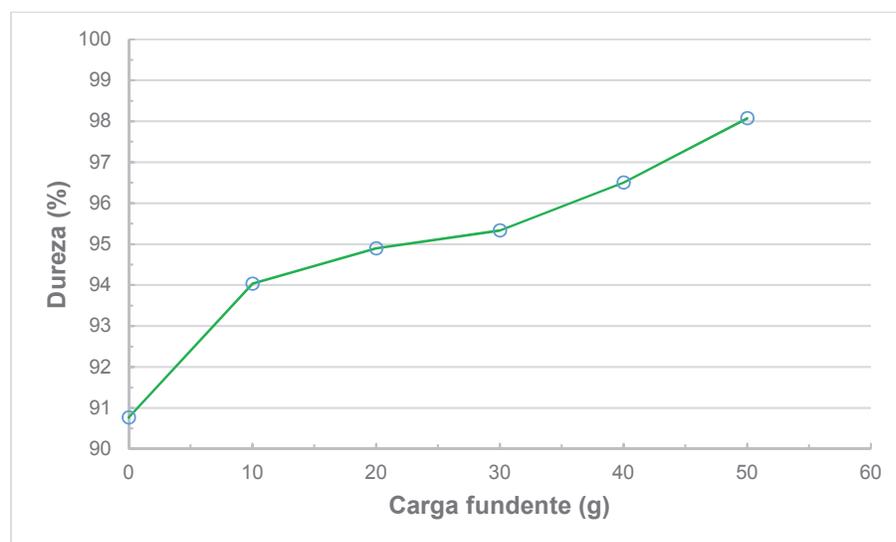


Figura 3.1. Influencia de la cantidad de carga fundente en la dureza (75 % metasilicato y 25 % bórax, T= 950 °C, t= 3 h)

Siguiendo la tendencia de la curva, se tendría que, si se trabaja con cargas fundentes superiores a 50 g/100 g CBA, la dureza alcanzaría valores cercanos al 100 %. Díaz (2015), determinó que en una impregnación de 60 g de cargas fundentes por 100 g de carbón, la dureza del compósito no presenta incrementos considerables (p. 65), por lo tanto, se llegó a un límite de impregnación con 50 g de materias formadoras de vidrio.

De los resultados presentados, se seleccionó la carga fundente de 50 g/100 g CBA, obteniéndose el compósito con la mayor dureza (98,1 %). En este punto, se logró

el objetivo de la experimentación, de obtener un carbón con una dureza superior al 98 %.

Es importante señalar que durante este proceso se alcanzan pérdidas importantes de peso (del 35 al 42 %), presentadas en la tabla AII.3 asociadas a la materia prima, debidas a la evaporación del agua ligada de las sales hidratadas y a la combustión del carbón. En la Tabla AII.1 del ANEXO II, se encuentran las masas de los materiales compuestos obtenidos. El porcentaje de humedad presente en los compósitos se encuentra aproximadamente entre 2,8 y 10,3 %, el cual se presenta en la tabla AII.3, éste es eliminado en el proceso de secado a 110 °C durante 14 horas, trayendo como consecuencia el arrastre de parte de las sales fundentes durante la evaporación del agua, culminando este proceso al final del tratamiento térmico a los 950 °C. Se observa que las sales evaporadas se depositan en las paredes del recipiente de reacción, formando capas de vidrio fundido.

El carbón por estar en contacto con el oxígeno a altas temperaturas es combustionado, ocurriendo las reacciones entre el carbono y oxígeno. La presencia de oxígeno produce condiciones de alta reactividad, lo que ocasiona reacciones que tienen preferencia en la superficie de las partículas. Por un lado, estas interacciones provocan la combustión del material carbonoso, y ligado a las mismas, la microporosidad se transforma en meso y/o macroporosidad (Gómez et al., 2010, p. 22).

3.1.1.2. Influencia de la temperatura de fusión y composición de la carga fundente

Una vez seleccionada la cantidad de carga fundente de 50 g/100 g CBA, se estudió el comportamiento de la temperatura y de la composición de la masa vítrea. Las composiciones estudiadas fueron: 25, 50 y 75 % de metasilicato de sodio pentahidratado; 75, 50 y 25 % de bórax, respectivamente. Conjuntamente, se evaluó el efecto de las temperaturas de tratamiento térmico a 900, 950 y 1 000 °C. En la Figura AII.2 del ANEXO II, se representan las composiciones indicadas anteriormente en un diagrama de fases ternario del sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ y se

determina que las temperaturas de fusión de las cargas son 830, 810 y 930 °C para las composiciones de 25, 50 y 75 % metasilicato de sodio, respectivamente. De los ensayos preliminares de fusión de los vidrios, se observa que todas las composiciones presentan un estado vítreo definido con transparencia total, a las tres temperaturas de fusión.

La Tabla 3.1, muestra los resultados de los valores de dureza obtenidos en función de las temperaturas de tratamiento térmico y las composiciones de carga fundentes.

Tabla 3.1. Compósitos de carbón CBA-vidrio a diferentes temperaturas y composiciones de carga fundente con tiempo de fusión de 3 h y 50 g de carga

Carbón	Temperatura (°C)	Na₂SiO₃·5H₂O (%)	Dureza (%)	Dureza promedio (%)
CBA	-	-	90,8	-
CBAVS1	900	75	96,5	96,3 ± 0,1
CBAVS2		50	96,3	
CBAVS3		25	96,2	
CBAVS4	950	75	98,1	97,4 ± 0,5
CBAVS5		50	97,4	
CBAVS6		25	96,6	
CBAVS7	1 000	75	97,8	96,3 ± 1,2
CBAVS8		50	96,5	
CBAVS9		25	94,5	

Se observa que un aumento de metasilicato en la carga fundente, favorece el proceso de impregnación, ya que se incorpora un mayor porcentaje de sílice, en forma de vidrio sobre la superficie del carbón. Bray (2001), indica que la presencia de óxido bórico proporciona al vidrio resistencia química, incrementa la fuerza mecánica, reduce la tendencia a la desvitrificación y baja el coeficiente de dilatación térmica. En todas las temperaturas se obtuvo que la mejor composición es 75 % de

metasilicato y 25 % de bórax, siendo la temperatura de 950 °C la que evidencia el compósito con la mayor dureza ($97,4 \pm 0,5$).

Fernández (1991) menciona que la formación de coordinaciones tetraédricas de boro (BO_4), cierran el retículo vítreo y fortalecen su estructura. En el anexo II, se realiza el cálculo de las fracciones de coordinaciones tetraédricas para las tres composiciones de cargas fundentes utilizadas. Los valores obtenidos fueron 0,48; 0,48 y 0,53, que se presentan en las tablas AII.9, AII.11 y AII.12, para las cargas con un 25, 50 y 75 % de metasilicato de sodio, respectivamente. Por lo cual, en el vidrio con mayor porcentaje de metasilicato de sodio (75 %), su estructura tendría mayor cantidad de coordinaciones (BO_4) y, por lo tanto, el vidrio impregnado sería reforzado por este tipo de enlaces. Se deduce que los compósitos con esta composición de carga fundente presentarán una mayor dureza respecto a las otras composiciones, conjeturas que coinciden con las señaladas por Parkinson et al (2007) y Grandjean et al (2007).

3.1.1.3. Influencia del tiempo de fusión de los compósitos

Con el fin de mejorar el rendimiento de producción de los compósitos, se propuso realizar los ensayos con las mejores condiciones encontradas en tres tiempos diferentes: 1, 2 y 3 h. En la Figura 3.2, se muestran los valores de los rendimientos obtenidos para cada material compuesto. Así mismo, se encuentran las durezas de los mismos en los tiempos experimentados. El tiempo de exposición a la fusión de las materias primas seleccionado fue de 1 hora, ya que, con este se logra la mayor dureza y menores pérdidas de material.

Se nota claramente que, el aumento del tiempo de fusión afecta desfavorable el rendimiento de producción de los compósitos, como resultado de la reacción entre el oxígeno y los átomos de carbono. Según Gómez et al. (2010) una disminución del tiempo de exposición, mejora el rendimiento e incrementa la dureza, al contrarrestar la reacción $\text{O}_2\text{-C}$ o burn-off. Un incremento del tiempo involucra una

mayor permanencia de las materias primas en procesos de combustión no controlados.

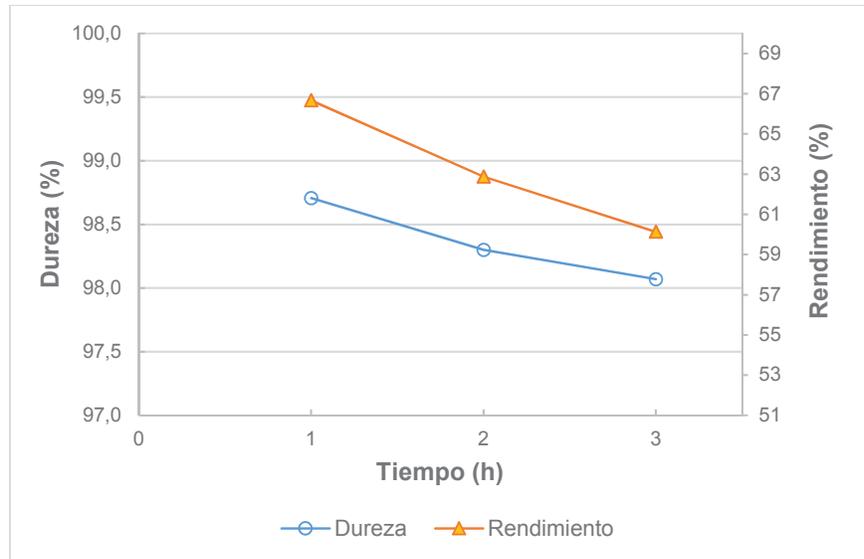


Figura 3.2. Compósitos de CBA-vidrio de sales fundentes a diferentes tiempos de fusión (T= 950 °C, 50 g cargas fundentes/100 g CBA, 75 % Na₂SO₃·5H₂O)

En este punto, se puede concluir que las mejores condiciones de operación para la impregnación de sales son: 50 g cargas fundentes con una composición del 75 % de metasilicato y 25 % de bórax por cada 100 g CBA, temperatura de fusión de 950 °C y tiempo de fusión de 1 hora. El compósito presenta un incremento de 7,9 puntos en la dureza con respecto al carbón CBA. Con las condiciones indicadas, se estudió la evaluación de la impregnación de sales fundentes en el carbón de alta activación (CAA) en las propiedades mecánicas y de adsorción del mismo.

3.1.2. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE VIDRIO DE BOTELLAS RECICLADAS EN EL PROCESO DE IMPREGNACIÓN

La impregnación de carbón CBA a partir de vidrio reciclado fue seleccionada como alternativa de reforzamiento del mismo. El vidrio de botella es un material duro y transparente, resistentes a la luz, al agua y a sustancias químicas, cuyo punto de fusión es alrededor de los 1 200 °C (Castells, 2012, p. 437). Con la adición de

sustancias fundentes como el bórax se logra reducir la temperatura de fusión del vidrio a valores inferiores a los 1 000 °C.

Para la estimación de la composición química del vidrio reciclado, se realizó un análisis por espectroscopia de fluorescencia de rayos X. En la Tabla 3.2 se presentan los resultados cuantitativos de la composición del vidrio de desecho. Se observa, que los componentes principales son los óxidos de silicio, de aluminio y de sodio, los cuales son parte de la composición de los vidrios de botellas. El componente mayoritario es la sílice (SiO₂), la cual es la formadora de la red vítrea y otorga al vidrio características como resistencia mecánica y química. El óxido de aluminio (Al₂O₃) actúa como un agente estabilizante de la red vítrea, incrementando la dureza y resistencia química del vidrio. Los óxidos de sodio (Na₂O) y de potasio (K₂O) son incorporados para reducir la temperatura de fusión de la sílice (Caselles et al., 2015, p. 399).

Tabla 3.2. Análisis químicos del vidrio reciclado por fluorescencia de rayos X

Componente	Composición (% p/p)
SiO ₂	66,9
Al ₂ O ₃	2,4
Na ₂ O	4,3
CaO	0,8
K ₂ O	0,8
P ₂ O ₅	0,1

3.1.2.1. Influencia de la temperatura de fusión de la carga fundente

Con el fin de bajar la temperatura de trabajo, se utilizó bórax como agente fundente del vidrio (Miranda et al., 2008). Las composiciones de las cargas fueron: 80, 90, 95 y 100 % de vidrio reciclado y 20, 10, 5 y 0 % de bórax, respectivamente. Se trabajó con tres granulometrías de vidrios: $\emptyset \geq 150 \mu\text{m}$, $150 > \emptyset > 38 \mu\text{m}$ y $\emptyset < 38 \mu\text{m}$. Las temperaturas del tratamiento térmico fueron: 900, 950 y 1 000 °C. En la Figura 3.3, se realiza una estimación de la temperatura de fusión de las cargas

fundentes de vidrio reciclado. Se observa que la temperatura mínima para fundir el vidrio sin adición de sustancias es 910 °C; con la incorporación de 20 % de bórax a la carga, se logra disminuir la temperatura a 850 °C.

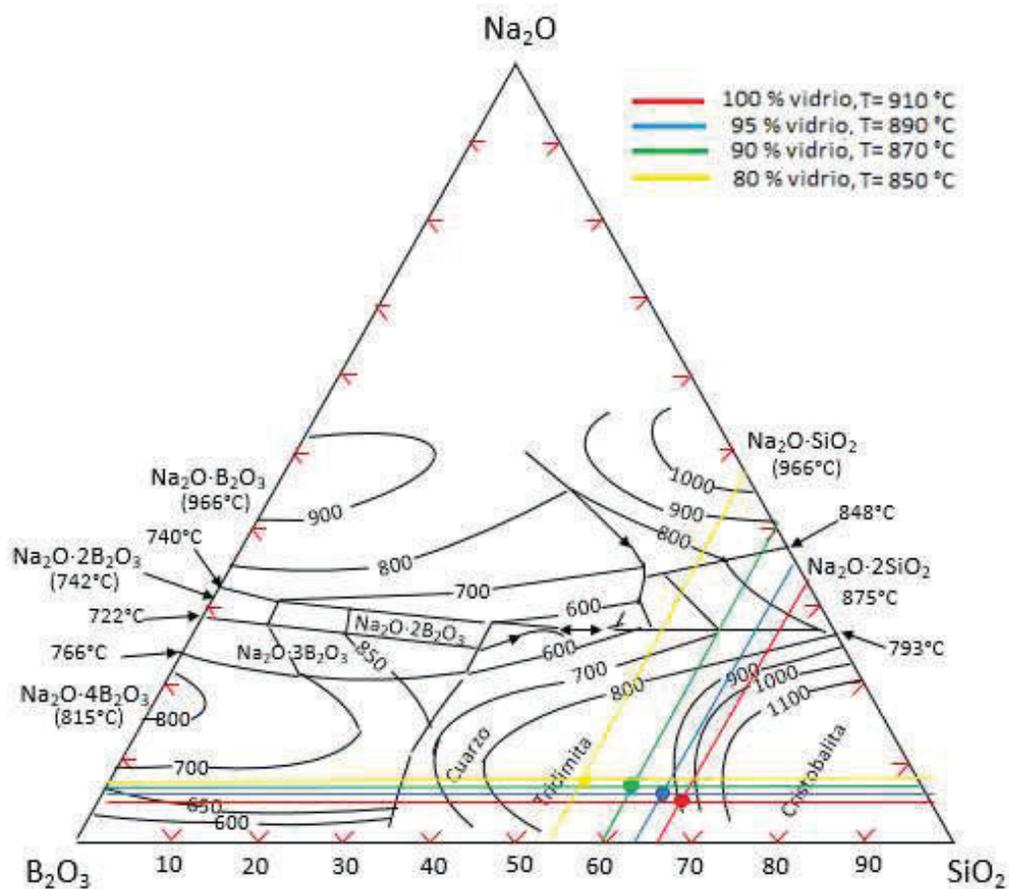
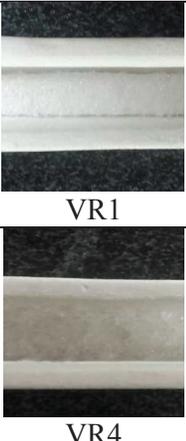
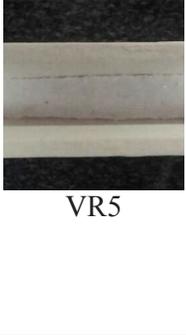


Figura 3.3. Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de cargas fundentes de vidrio reciclado

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados de fusión de las cargas formuladas a 900 °C por un periodo de una hora (tiempo de meseta). En su totalidad, los vidrios presentaron materias primas infundidas en el proceso térmico. Únicamente, la carga con granulometría malla +100 ($\phi \geq 150 \mu\text{m}$) y con una composición de 80 % de vidrio (VR4), fundió completamente. El aspecto físico superficial de este vidrio, se caracteriza por presentar ondulaciones, imperfecciones y agrietamiento. Borsella (2009) indica que, en procesos de enfriamiento no controlados, debido a las tensiones generadas, el vidrio presenta agrietamiento en todo su volumen.

Tabla 3.3. Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 900 °C y 1 h de meseta

Nombre	dp (µm)	Vidrio reciclado (%)	Bórax (%)	Observación*	Resultado
VR1	+150	100	0	Porcentaje bajo de fusión de vidrio, fracciones de vidrio en forma de esferas, vidrio opaco.	 VR1
VR2		95	5	Porcentaje bajo de fusión de vidrio, vidrio opaco.	
VR3		90	10	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio opaco con brillo superficial.	
VR4		80	20	Fusión completa de vidrio. Formación de masa vítrea agrietada.	
VR5	-150 +38	100	0	Porcentaje bajo de fusión de vidrio. Formación de masa vítrea con apariencia superficial de piel de naranja. Vidrio opaco.	 VR5
VR6		95	5	Porcentaje bajo de fusión de vidrio. Vidrio opaco.	
VR7		90	10	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio opaco con brillo superficial.	
VR8		80	20	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio opaco con brillo superficial.	
VR9	-38	100	0	Porcentaje bajo de fusión de vidrio. Vidrio opaco con marcada rugosidad.	 VR10
VR10		95	5	Porcentaje bajo de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco.	
VR11		90	10	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco.	
VR12		80	20	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco brillante.	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

En la muestra VR1 la masa vítrea contiene infundidos, al no lograrse la temperatura de transición vítrea de la composición estudiada. Se observa que, en las paredes del recipiente de reacción se formaron pequeñas esferas de vidrio, y, por lo tanto, la textura del fundido tiene rugosidad marcada en toda su superficie, fenómenos ya observados por González, Túnez y Ruiz (2007).

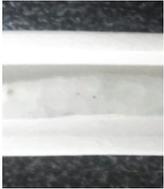
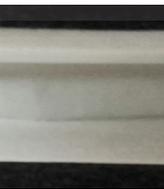
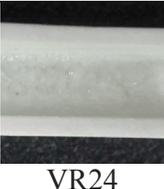
El aspecto vítreo de las muestras fundidas es notorio cuando se incrementa la concentración de bórax añadido a las mismas. Según González, Túnez y Ruiz (2007) los óxidos de boro favorecen a la disminución de la temperatura de fusión de la mayoría de las materias formadoras de vidrio. Así mismo, estos óxidos reducen la formación de hendiduras y el agrietamiento (pp. 1642-1643).

Las muestras VR1, VR2, VR5, VR6, VR9 y VR10 presentan un porcentaje bajo de fusión de vidrio, es decir son opacas y su coloración es blanca. Las muestras VR3, VR7, VR8, VR11 y VR12 presentan una masa vítrea medianamente fundida, en estos casos se mejoró el aspecto vítreo debido al aumento del porcentaje de bórax, por lo cual presentan un brillo superficial. En el caso de las cargas compuestas de vidrio menor a 38 μm (VR9, VR10, VR11 y VR12), fundieron parcialmente y ocurre el fenómeno de recogido de la masa. Este defecto, podría ocasionar irregularidades y una mala impregnación del vidrio en el carbón.

Los resultados de los ensayos a 950 °C se encuentran en la Tabla 3.4. Las muestras que tienen una composición 100 % vidrio reciclado en todas sus granulometrías (VR13, VR17 y VR21), presentan porcentaje medio de fusión, las masas vítreas tienden a recogerse y agrietarse. Según Fernández (1991) la presencia de las tensiones, ocasiona la formación de agrietamiento en las masas fundidas, al momento del enfriamiento dentro de la mufla (p. 267).

El tratamiento térmico a 950 °C presentó el mismo comportamiento que las muestras fundidas a 900 °C. Según Plodinec (2000), a medida que se aumenta el porcentaje de bórax en la carga fundente, se acerca cada vez más a la temperatura de transición vítrea (p. 189).

Tabla 3.4. Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 950 °C

Nombre	dp (µm)	Vidrio reciclado (%)	Bórax (%)	Observación*	Resultado
VR13	+150	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco y agrietado	
VR14		95	5	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR15		90	10	Porcentaje alto de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR16		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y fisurado	
VR17	-150 +38	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco y agrietado	
VR18		95	5	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR19		90	10	Porcentaje alto de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR20		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y fisurado	
VR21	-38	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Se observa recogimiento en la masa de vidrio. Vidrio opaco	
VR22		95	5	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio opaco y agrietado	
VR23		90	10	Porcentaje alto de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR24		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y fisurado	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

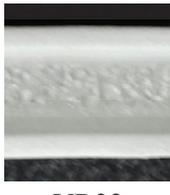
Las cargas fundentes correspondientes a la granulometría $\varnothing \geq 150 \mu\text{m}$ VR15 y VR16 presentaron porcentaje alto de fusión. Estas muestras poseen un estado vítreo definido, pero el agrietamiento se genera por la presencia de tensiones producidas en el enfriamiento de las mismas. Fernández (1991) indica que el tamaño recomendado de las partículas constituyentes del vidrio en la fusión está entre los 0,1-0,5 mm (p. 269). Por lo cual, el diámetro de los granos de vidrio estudiados ($\varnothing \geq 0,15 \text{ mm}$) se encuentra dentro del rango recomendado.

En la mayoría de las composiciones vítreas que lograron fundirse, vienen acompañadas de tensiones, Fernández (1991) indica que este fenómeno es generado debido a que las capas exteriores al enfriarse más rápido, alcanzan un estado de rigidez y se contraen, impidiendo que el interior estando más caliente relaje sus tensiones. Por lo cual, las capas profundas se encuentren sometidas a fuerzas de compresión, en cambio, en los exteriores del vidrio se ejercen fuerzas de tracción.

Las muestras VR14, VR18 y VR22 presentan porcentaje medio de fusión, por lo cual, su masa vítrea es traslúcida, lográndose reducir el recogimiento de los vidrios. Estas cargas fundentes no fueron seleccionadas, ya que podrían ocasionar problemas en el momento de la impregnación. Los ensayos VR15, VR16, VR19, VR20, VR23 y VR24 fundieron completamente y fueron seleccionados para realizar la impregnación de vidrio en carbón.

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de la fusión de los vidrios a $1\ 000\ ^\circ\text{C}$. En la Tabla 3.5 se observa que las cargas sin adición de bórax (100 % vidrio) VR25, VR29 y VR33, lograron fundirse, pero no presentan una transparencia, posible no se alcanzó sobrepasar la transición vítrea. Asimismo, con la reducción de la granulometría del vidrio, las masas de vidrio tienden a recogerse. Con la adición del agente fundente (bórax), se alcanza la transición vítrea y se mejora su textura. El aspecto superficial de los vidrios va desde rugoso (5 % de bórax) a liso (con 20 % bórax). La granulometría a la cual los vidrios presentan las mejoras características vítreas es $+150 \mu\text{m}$ (malla +100).

Tabla 3.5. Resultados de fusión de vidrio reciclado con diferentes granulometrías y composiciones a 1 000 °C

Nombre	dp (µm)	Vidrio reciclado (%)	Bórax (%)	Observación	Resultado
VR25	+150	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	 VR25
VR26		95	5	Porcentaje alto de fusión de vidrio. Vidrio transparente y agrietado	
VR27		90	10	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	 VR28
VR28		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	
VR29	-150 +38	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	 VR29
VR30		95	5	Porcentaje alto de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR31		90	10	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	 VR32
VR32		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	
VR33	-38	100	0	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio opaco y agrietado	 VR33
VR34		95	5	Porcentaje medio de fusión de vidrio. Vidrio traslúcido y agrietado	
VR35		90	10	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	 VR36
VR36		80	20	Fusión total. Vidrio transparente y agrietado	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

En conclusión, se seleccionaron las cargas fundentes que presentan las mejores características vítreas: fusión completa de las materias primas, transparencia total, superficie lisa y baja proporción de agrietamiento; con la consideración de utilizar la menor temperatura de fusión, a fin de evitar las pérdidas de material carbonoso, causadas por la reacción de combustión entre el carbón y el oxígeno, presente en la atmósfera del horno. De los resultados de la fusión de las cargas fundentes, se observa que, a 900 °C, la carga formada por un vidrio de granulometría + 150 μm , composición de 80 % de vidrio y 20 % bórax presenta fusión completa, por lo cual fue seleccionada para la impregnación con carbón.

3.1.2.2. Determinación de la dureza de carbones impregnados en función de la carga fundente

Los resultados de la impregnación de vidrio en carbón se muestran en la Tabla 3.6. Al observar que la dureza del compósito obtenido a 900 °C no presenta un incremento considerado, se procedió a realizar un tratamiento térmico a 950 °C, con el fin de evaluar la influencia de la temperatura de fusión de las materias fundentes y su comportamiento en el reforzamiento de la matriz del carbón.

Tabla 3.6. Influencia de la impregnación de vidrio en la dureza de los compósitos carbón-vidrio reciclado ($t=1$ h)

Carbón	Temperatura (°C)	Granulometría vidrio (μm)	Composición vidrio (%)	Dureza (%)
CBA	-	-	-	90,8
CBAVR4	900	+150	80	91,8
CBAVR15	950	+150	80	92,2
CBAVR16			90	93,4
CBAVR19		-150 +38	80	91,9
CBAVR20			90	92,5
CBAVR23		-38	80	90,2
CBAVR24			90	91,3

Se observa que la dureza de los compósitos carbón-vidrio reciclado aumenta con el incremento del porcentaje de vidrio. La mayor presencia de sílice (SiO_2) en la carga fundente favorece el reforzamiento de la superficie del carbón, como se indicó en la sección 3.1.1.2. Con la reducción del diámetro del vidrio, las durezas de los compósitos presentan valores menores, es probable que las cargas fundentes hayan fundido rápidamente ocasionando que la masa vítrea sea recogida y como resultado se tiene que el vidrio no haya sido adherido a la superficie del carbón.

De los cálculos de la composición del vidrio de desecho, presentados en las Tablas AIII.3 y AIII.4 del ANEXO III, se determinaron los porcentajes en peso de óxido de silicio obteniéndose valores de 53,5 y 60,3 % de SiO_2 para las composiciones con 80 y 90 % de vidrio reciclado, respectivamente. Asimismo, se calcularon las proporciones de óxido de aluminio como agente estabilizante de la red vítrea, obteniéndose valores de 1,9 y 2,2 % de Al_2O_3 , en el orden respectivo, porcentajes que se encuentran en el intervalo recomendado por bibliografía, del 1 al 3 % (Rincón, sf, p. 58)

El compósito que presentó la mejor resistencia mecánica fue el obtenido con una carga fundente de 90 % de vidrio reciclado y 10 % bórax, con un tamaño de grano +150 μm , relación carga/carbón de 2/1, temperatura y tiempo de fusión de 950 °C y 1 h, respectivamente. Este presenta un incremento en la dureza de 2,6 puntos respecto al carbón de baja activación, CBA. Con estas condiciones se evaluó la influencia de la impregnación de vidrio reciclado en el carbón activado, CAA, en sus propiedades mecánicas y de adsorción.

3.1.3. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE FRITAS DE ESMALTE COMO ENDURECEDOR DE LA SUPERFICIE DEL CARBÓN ACTIVADO

En la investigación se probó con tres tipos de fritas con la adición de 5, 10 y 20 % de bórax para la formulación de los esmaltes. Las 9 composiciones fueron tratadas a las temperaturas de 600, 700 y 800 °C, todas a 1 hora de meseta a la temperatura máxima. Para estimar la composición de cada una de las fritas utilizadas, se realizó

un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX). Los resultados de este análisis se reportan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Análisis químicos de las fritas de esmalte por fluorescencia de rayos X

Óxido (%)	Frita 1	Frita 2	Frita 3
SiO ₂	58,0	44,8	55,3
Al ₂ O ₃	20,8	12,1	4,9
CaO	19,1	7,2	21,5
K ₂ O	3,7	1,9	3,2
Na ₂ O	2,2	4,5	1,9
MgO	0,7	0,1	11,2
BaO	0,2	10,1	0,1
ZnO	0,1	18,0	0,1
P ₂ O ₅	0,1	0,1	0,1
Fe ₂ O ₃	0,2	0,14	0,2
TiO ₂	0,1	0,1	0,1

El óxido de silicio actúa como agente vitrificante del esmalte, aumenta la viscosidad y el punto de fusión, otorga resistencia mecánica y química al vidrio (Avgustinik, 1983, pp. 543-544). En esmaltes, el SiO₂ se adiciona en un 40 a 50 % y en caso de aplicación como capa de fondo se alcanza porcentajes de hasta 85 % SiO₂ (Vielhaber, 2002, p. 7). Se observa en todas las fritas que los valores porcentuales de sílice se encuentran dentro del intervalo recomendado por bibliografía. El óxido de aluminio se incorpora para mejorar la resistencia química y la elasticidad del esmalte, con este óxido se disminuye la presencia de resquebrajaduras (Avgustinik, 1983, p. 544).

Los óxidos de sodio y de potasio (Na₂O y K₂O) son incorporados para reducir la temperatura de fusión de los esmaltes. El óxido de sodio es el más utilizado industrialmente y las materias primas de donde se obtienen son los carbonatos, hidróxidos y feldespatos. El K₂O se adiciona a manera de carbonatos (Sánchez, García-Ten y Regueiro, 2006). El óxido de calcio (CaO) aumenta la resistencia química y mecánica del esmalte, es recomendable añadirlo hasta un máximo de

5 %, ya que a mayor proporción podría haber presencia de desvitrificaciones en las masas vítreas. El óxido de magnesio (MgO) se comporta igual que el CaO, pero su presencia contrarresta la aparición de desvitrificaciones en el vidrio (Fernández, 1991, pp. 139-140; Vielhaber, 2002, p. 13).

El óxido de bario (BaO) mejora el brillo, la elasticidad y actúa como un buen fluidificante (Vielhaber, 2002, p. 13). El óxido de zinc (ZnO) eleva el brillo de los esmaltes, incrementa la resistencia a la tracción y compresión, disminuye el coeficiente de dilatación térmica, aumenta la dureza y la resistencia química (Vielhaber, 2002, p. 13; Fernández, 1991, p.143). El Fe₂O₃ se presenta como una impureza de las materias primas o puede ser adicionado para dar coloración a los vidrios, por ejemplo, las botellas verdes. Adicionalmente, el TiO₂, cumple la función de otorgar características ópticas a los vidrios (Sánchez et al., 2006).

3.1.3.1. Influencia de la temperatura de fusión de la carga fundente

La estimación de la temperatura de fusión de las fritas de esmaltes se determina mediante el uso de diagrama de fases ternarios con las composiciones de cada una de las cargas fundentes estudiadas. En la Tabla 3.8, se presentan las temperaturas de fusión de las diferentes cargas determinadas en los diagramas ternarios.

Tabla 3.8. Temperaturas de fusión de las cargas fundentes constituidas por las diferentes composiciones de fritas de esmalte

Frita	Composición fritas (%)	Composición bórax (%)	Temperatura fusión (°C)
Frita 1	100	0	> 1 050
	95	5	1 050-1 000
	90	10	> 1 000
	80	20	1 000-965
Frita 2	100	0	> 1 000
	95	5	950
	90	10	900
	80	20	850
Frita 3	100	0	> 1 050
	95	5	1 050-1 000
	90	10	> 1 000
	80	20	1 000-965

En la Figura 3.4, se representan las composiciones de las masas vítreas constituidas por frita de esmalte FE1 con diferentes porcentajes de bórax añadido.

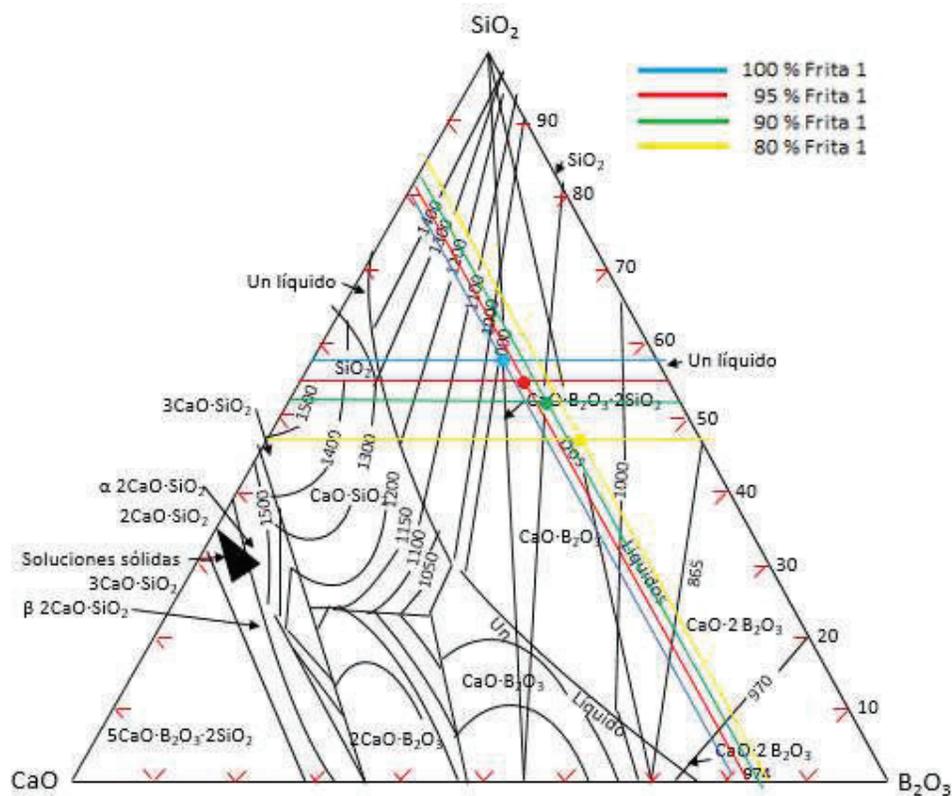


Figura 3.4. Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 1

La Figura 3.5 presenta el diagrama ternario necesario para la determinación de las temperaturas de fusión de las cargas constituidas por la frita 2. En este caso, se considera la suma de los porcentajes de BaO y ZnO, ya que estos dos óxidos presentan similares puntos de fusión de 1 923 y 1 975 °C, respectivamente. De la Tabla 3.8, se observa que la frita 2 sin adición de fundente (bórax) presenta una temperatura de fusión mayor a los 1 000 °C y con la incorporación de un 20 % de bórax se reduce la temperatura a 850 °C, la cual es cercana a la de experimentación (800 °C).

En la Figura 3.6, se representan las composiciones de cargas fundentes obtenidas con la frita 3. Se observa que estos materiales presentan temperaturas de fusión similares que las obtenidas con la frita 1, mostradas en la Figura 3.4.

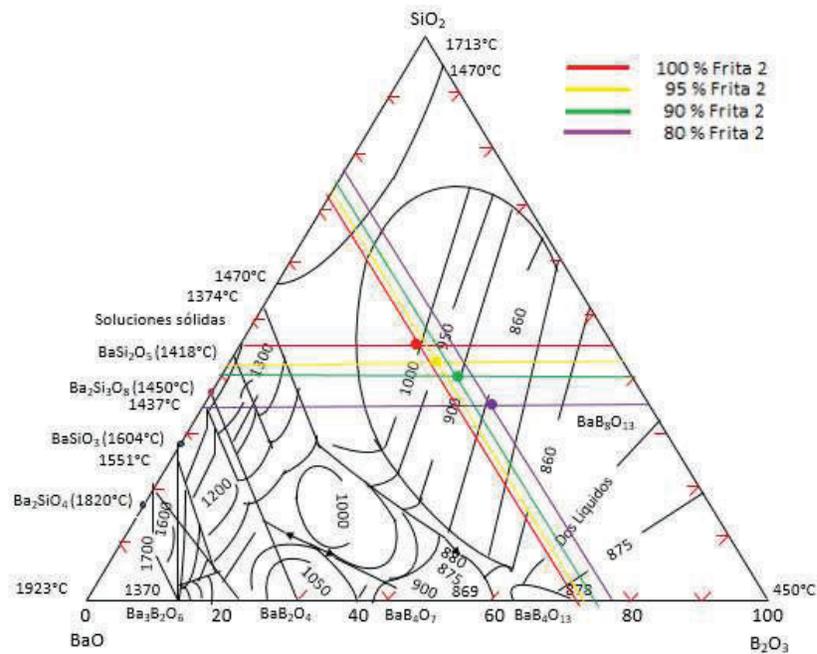


Figura 3.5. Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 2

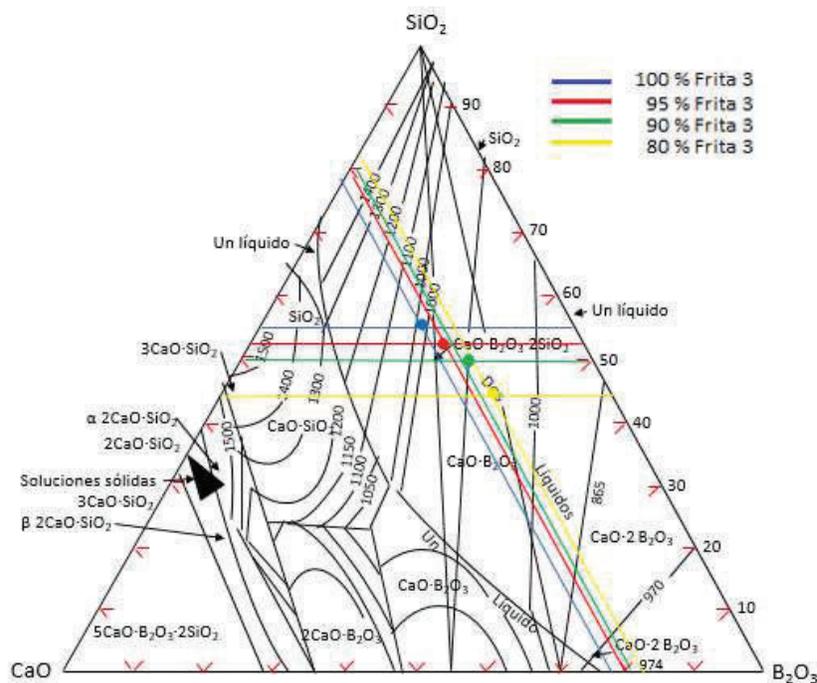


Figura 3.6. Diagrama ternario para la determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes constituidas por la frita 3

En la Tabla 3.9 se reportan los resultados del tratamiento térmico de las composiciones de esmalte a 600°C y 1 hora de meseta.

Tabla 3.9. Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 600 °C y t= 1 h)

Nombre	Frita	Vidrio frita (%)	Bórax (%)	Observación	Resultado
FE1	1	95	5	Porcentaje bajo de fusión. La masa puede ser raspada y generar polvo	 FE2
FE2		90	10	Porcentaje bajo de fusión. La masa puede ser raspada y generar polvo	
FE3		80	20	Porcentaje bajo de fusión. La masa puede ser raspada y generar polvo	
FE4	2	95	5	Porcentaje bajo de fusión. La masa puede ser raspada y generar polvo	 FE4
FE5		90	10	Porcentaje bajo de fusión, pero se presenta una masa compacta de polvo, que puede ser raspada	
FE6		80	20	Porcentaje bajo de fusión, pero se presenta una masa compacta de polvo, que puede ser raspada	
FE7	3	95	5	Porcentaje bajo de fusión. La masa puede ser raspada y generar polvo	 FE9
FE8		90	10	Porcentaje bajo de fusión, pero se presenta una masa compacta de polvo, que puede ser raspada	
FE9		80	20	Porcentaje bajo de fusión, pero se presenta una masa compacta de polvo, que puede ser raspada	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

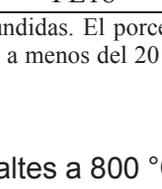
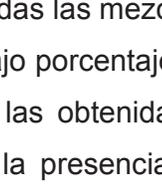
En los casos de las muestras FE1 al FE7, exhiben bajo porcentaje de fusión, se presentan como un polvo compactado en algunos casos y en otros el material pulverizado se aglomera. Las muestras FE8 y FE9, muestran un fundido superficial, pero su interior puede ser raspado y generar polvo. Existe la presencia de materia prima infundida en estas muestras, debido a la baja temperatura de maduración de los esmaltes. La porción vitrificada en las mismas, presenta fisuras, que pueden ser observadas superficialmente.

Los ensayos de fusión de las muestras a 700 °C se presentan en la Tabla 3.10. La composición FE10 no logra fundirse, únicamente se compacta y se fisura. Las mezclas FE16 y FE17, presentaron el mismo comportamiento, pero se observa que sus superficies tienden a pandearse (formar un tipo de costras), fenómenos observados por investigaciones realizadas por (Yáñez, 2014). Los esmaltes FE11, FE12, FE13, FE14 y FE18 presentan porcentajes medio-bajo de fusión y en todos los casos hay presencia de fisuras. Mera et al. (2010) indican que la adición de bórax mejora la vitrificación de las cargas, pero las superficies tienden a agrietarse de manera más profunda y pronunciada (p. 92). El esmalte que presentó un mejor estado vítreo fue el FE15, considerando que hay presencia de agrietamiento pronunciado, fue seleccionado para la impregnación.

Tabla 3.10. Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 700 °C y t= 1 h)

Nombre	Frita	Vidrio frita (%)	Bórax (%)	Observación	Resultado
FE10	1	95	5	Porcentaje bajo de fusión. La masa se encuentra compactada y presenta fisuras	 FE10
FE11		90	10	Porcentaje bajo de fusión. Masa esmáltica agrietada	 FE12
FE12		80	20	Porcentaje medio de fusión. Esmalte agrietado	

Tabla 3.10. Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 700 °C y t= 1 h) (continuación...)

FE13	2	95	5	Porcentaje bajo de fusión. La masa se encuentra compactada y presenta fisuras	
FE14		90	10	Porcentaje medio de fusión. Masa esmáltica agrietada	
FE15		80	20	Porcentaje alto de fusión. Esmalte agrietado	
FE16	3	95	5	Porcentaje bajo de fusión. Masa compactada, presenta costras superficiales	
FE17		90	10	Porcentaje bajo de fusión. Masa compactada, presenta costras superficiales	
FE18		80	20	Porcentaje medio de fusión. Esmalte agrietado	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

En la Tabla 3.11 se presentan los ensayos de maduración de esmaltes a 800 °C. A 800 °C se mejoró el proceso de maduración de los esmaltes en todas las mezclas. En el caso de FE19, FE22 y FE25 los materiales presentan un bajo porcentaje de fusión, pero la consistencia de la masa es más compacta que las obtenidas a 700 °C con las mismas composiciones. Asimismo, se observa la presencia de pequeñas fisuras formadas en el proceso de enfriamiento. Los esmaltes FE20, FE23 y FE26 presentan un estado vítreo más definido que las muestras anteriores, ya que el porcentaje de bórax (10 %) es mayor y las muestran funden más fácilmente. FE21, FE24 y FE27 poseen un alto porcentaje de fusión, pero en todos los casos se tiene agrietamiento de marcada profundidad. Por sus mejores propiedades vítreas, estas 3 últimas composiciones fueron utilizadas en el proceso de impregnación del carbón.

Tabla 3.11. Resultados de la fusión de fritas de esmalte con diferentes composiciones de carga fundente (T= 800 °C y t= 1 h)

Nombre	Frita	Vidrio frita (%)	Bórax (%)	Observación	Resultado
FE19	1	95	5	Porcentaje bajo de fusión. Esmalte compactado	
FE20		90	10	Porcentaje medio de fusión. Esmalte agrietado con costras superficiales	
FE21		80	20	Porcentajes alto de fusión. Esmalte agrietado	
FE22	2	95	5	Porcentaje medio de fusión. Esmalte agrietado	
FE23		90	10	Porcentaje medio de fusión. Esmalte agrietado con brillo superficial	
FE24		80	20	Porcentaje alto de fusión. Esmalte agrietado	
FE25	3	95	5	Porcentaje bajo de fusión. Esmalte compactado	
FE26		90	10	Porcentaje medio de fusión. Esmalte compactado	
FE27		80	20	Porcentaje alto de fusión. Esmalte agrietado	

*El porcentaje alto de fusión de vidrio corresponde a más del 50 % de las materias fundidas. El porcentaje medio a un 20-50 % de las materias fundidas. El porcentaje bajo de fusión corresponde a menos del 20 % de las materias fundidas.

Al igual que el vidrio reciclado, se seleccionaron para la impregnación de vidrio las cargas fundentes que presentaron las mejores características vítreas, obtenidas a la menor temperatura de tratamiento térmico. La impregnación de fritas de esmalte se realizó con la carga de 80 % frita 2 y 20 % bórax a 700 °C. En adición, para evaluar la influencia de la temperatura de tratamiento térmico en la dureza de los compósitos, se probó la impregnación a 800 °C con las tres fritas en la misma concentración frita-bórax (80-20 %).

3.1.3.2. Determinación de la dureza de los carbones impregnados con fritas en función de la carga fundente

Las cantidades de esmalte estudiadas fueron de 50, 100 y 150 g por cada 100 g de carbón CBA; en otras palabras, relaciones de carga/carbón de 0,5:1, 1:1 y 1,5:1. Los resultados de estos ensayos se reportan en la Tabla 3.12. Se observa que las durezas de los compósitos obtenidos a 700 °C no presentan un considerado cambio con respecto a la dureza de carbón sin impregnación. A esta temperatura no hay influencia de la cantidad de cargas fundentes impregnadas en el carbón, por lo que, se decidió realizar el tratamiento térmico a 800 °C. Con el incremento de 100 °C se mejoran las propiedades mecánicas de los compósitos, observándose en todos los casos un incremento de la dureza con el aumento de la masa de material vítreo impregnado.

Tabla 3.12. Influencia de la utilización de diferentes fritas y de la masa de carga fundente en la dureza de los compósitos carbón-frita de esmalte (80 % frita, $t=1$ h)

Nombre	Masa carga fundente (g)	Dureza (%)			
		700	800		
			Frita 2	Frita 1	Frita 2
CBA	0	90,8			
CBAVFE50	50	91,1	91,3	91,8	91,4
CBAVFE100	100	91,7	92,1	94,2	93,2
CBAVFE150	150	91,9	92,6	94,4	93,7

En la Figura 3.7 se observa que, con el aumento de la masa de esmalte, se incrementa la dureza de los compósitos. En el caso de la frita 2, no existe un considerable incremento de la dureza para cargas mayores a los 100 g, considerándose la relación igual a 1:1 como la óptima, debido a que la dureza permanece prácticamente constante.

En el proceso de lavado de los compósitos, se observó que no todo el esmalte se adhiere a la superficie del carbón, este fue separado mediante el tamizado en la fracción de los materiales finos. Este fenómeno puede ser causado por el recogido

y reventado del esmalte, por lo que en algunas áreas del carbón no pudo ser impregnado. En algunos casos, se formaron complejos de fritas del tamaño nominal de los carbones, los cuales son fácilmente identificables por su color (blanco-grisáceos) y morfología (de aspecto rugoso-poroso).

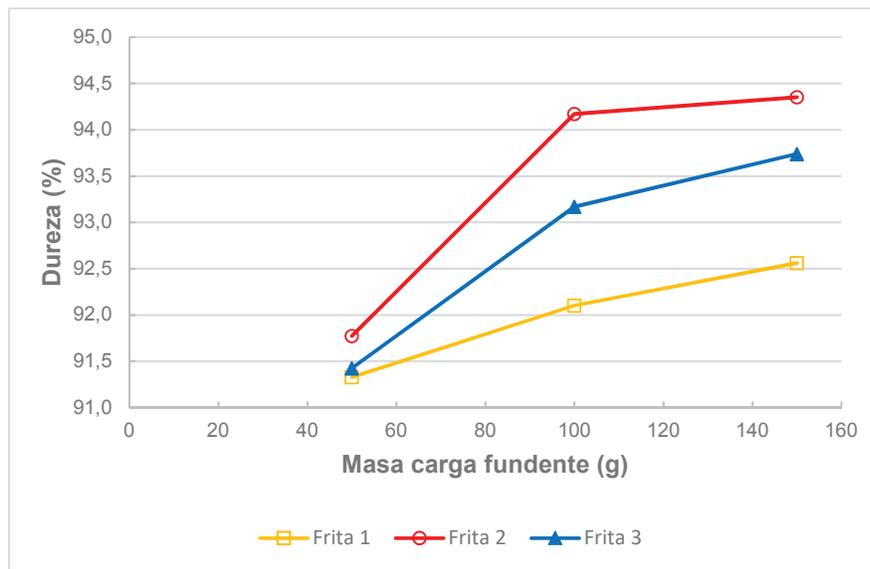


Figura 3.7. Durezas de los compósitos CBA-frita de esmalte fundidos a 800 °C y 1 h con respecto a la masa de carga fundente de diferentes fritas

En este punto, las mejores condiciones de impregnación seleccionadas son: cargas fundentes de 80 % frita 2 y 20 % bórax, relación carga/carbón de 1:1, temperatura y tiempo de maduración de 800 °C y 1 hora, respectivamente. Con estas condiciones se obtiene un incremento en la dureza de 3,4 puntos.

3.1.3.3. Influencia del tiempo de fusión de los compósitos

En la Figura 3.8 se presentan los resultados del tratamiento térmico de los compósitos carbón-vidrio (80 % frita 2 y 20 % bórax, relación carga/carbón de 1:1) con la variación del tiempo de maduración a 800 °C. Yáñez (2015) atribuye que a mayor tiempo las materias constituyentes del esmalte funden con facilidad, se reduce la aparición de fallas y la adherencia es buena en comparación con los tiempos menores. Jerez (2014) indica que las pérdidas importantes de la masa de carbón que se atribuyen a la combustión, debido a la exposición a alta temperatura

(800 °C) y a la atmósfera oxidante de la cámara del horno (p. 101). Así, se prevé que el rendimiento de obtención de los compósitos disminuirá con el incremento del tiempo de exposición a alta temperatura, como se observa en las líneas de tendencia de la Figura 3.8.

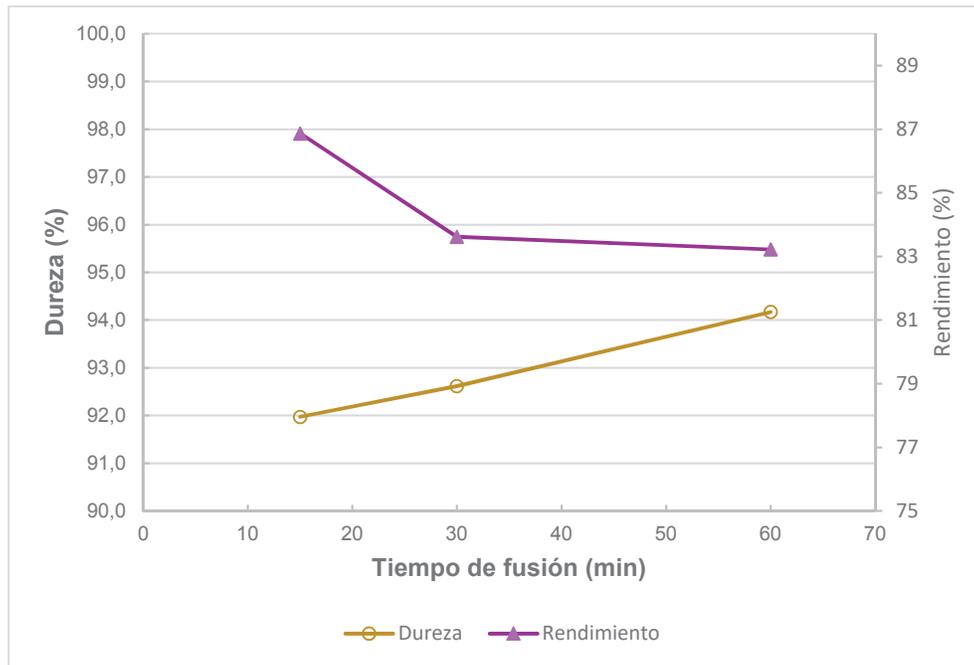


Figura 3.8. Influencia del tiempo de fusión en la dureza de los compósitos carbón-vidrio fritas (T= 800 °C, CO= 80 % frita 2 y CF= 100 g)

3.2. EVALUACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN DE POLISILANO EN CARBÓN ACTIVADO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DUREZA DEL CARBÓN ACTIVADO

Un caso aparte, fue el estudio de la impregnación de un material polimérico derivado del polisilano ($[\text{CH}_3\text{-Si-CH}_3]_n$) como es la silicona comercial. Esta sustancia se forma por una cadena de enlaces -Si-O-Si- y en cada átomo de silicio van unidos dos radicales metilos (-CH_3) (Owen y Dvornic, 2012, p. 1). Las siliconas una vez curadas o polimerizadas, presentan las siguientes ventajas: una buena adhesividad y durabilidad, resistencia al ataque químico y a temperaturas máximas de 250 °C (Madrid, 2002, p. 33).

En la investigación, se utilizaron relaciones de volumen silicona/masa carbón iguales a 0,1/1; 0,2/1; 0,3/1; 0,4/1 y 0,5/1. Como agente reductor de la viscosidad del polímero se ocupó etanol potable en relaciones volumen silicona/volumen etanol correspondientes a 0,1/1; 0,2/1; 0,3/1; 0,4/1 y 0,5/1.

Los resultados de la impregnación de polisilano en carbón se reportan en la Figura 3.9. El incremento de la dureza de los compósitos está influenciado directamente por el volumen de silicona utilizada. Se observa que se alcanza, con un volumen de 40 mL de material polimérico impregnado, un valor de dureza del 98,2 %, el cual se corresponde con el de los carbones utilizados en minería (98 %). Incluso, con los 50 mL de silicona se sobrepasa el valor de dureza (99,1 %) y siguiendo la tendencia de la curva es posible que, con 60 mL de polímero se lograría el máximo de dureza de un carbón activado (100 %).

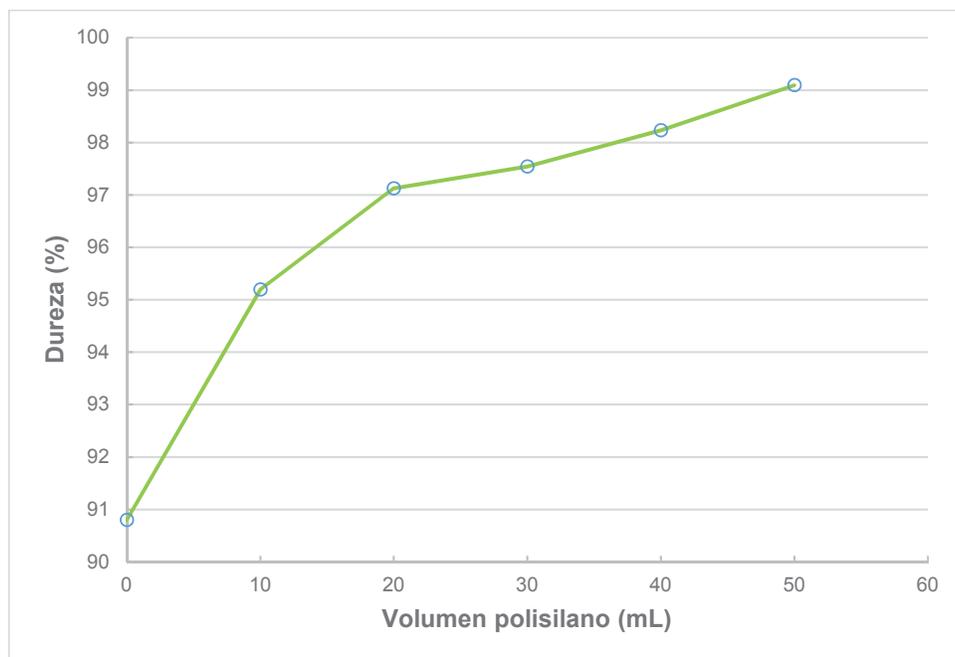


Figura 3.9. Durezas de los compósitos carbón-polisilano respecto al volumen de polisilano impregnado

En la Tabla AV.1 del ANEXO V, se observa que, con la adición de mayor cantidad de silicona, los granos de carbón forman aglomerados entre los mismos; por lo que se obtuvieron materiales compuestos con diámetros de partícula mayores al nominal $\varnothing \geq 4,75$ mm (retenidos en mallas # 3 y # 4).

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS Y LOS COMPÓSITOS OBTENIDOS

3.3.1. PROPIEDADES MECÁNICAS

3.3.1.1. Determinación de la dureza

En la Tabla 3.13 se presentan los porcentajes de durezas (Norma ASTM D-3802) de los carbones de cuesco de palmiste pirolizado, tanto del carbón de baja activación (CBA) como del carbón activado (CAA) y de los compósitos obtenidos. Se observa que CAA posee dos puntos menos en su dureza una vez activado. Según Heschel y Klose (1995) deducen que el descenso en la resistencia mecánica es debido al debilitamiento de la superficie del material carbonáceo por la combustión de los átomos de carbono con el vapor (pp. 1787-1790). Asimismo, Lua y Guo (2000) y Uribe et al. (2013) indican que la presencia del dióxido de carbono en los gases de combustión en la activación, generan la reacción con el carbón (burn-off), afectándose su dureza.

Tabla 3.13. Dureza del carbón de baja activación, carbón activado de cuesco de palmiste y compósitos

Carbón	Dureza (%)
Carbón baja activación (CBA)	90,8 ± 0,3
Carbón activado (CAA)	89,0 ± 0,3
Carbón activado-vidrio sales (CAVS)	98,1 ± 0,1
Carbón activado-vidrio reciclado (CAVR)	93,4 ± 0,3
Carbón activado-vidrio fritas (CAFE)	94,5 ± 0,2
Carbón activado-polisilano (CASIL)	98,8 ± 0,1

$\bar{x} + \sigma$ (n = 2)

A partir del ensayo de dureza se determinó que la densidad aparente del carbón CBA es 0,54 g/cm³, y luego de la activación disminuye a un valor igual a 0,44 g/cm³ (CAA). El incremento del tiempo de activación conlleva a una disminución de la dicha propiedad. Lua y Guo (2000) explican que el motivo ocurrente de la reducción de la densidad aparente es debido a la producción de porosidad, por lo tanto,

existirán mayor cantidad de espacios vacíos entre los granos de carbón (pp. 1 091-1 092). Adicionalmente, González, Molina-Sabio y Rodríguez-Reinoso (1994) encuentran que la densidad aparente decrece con un comportamiento casi lineal con el incremento de la conversión en la activación con tratamiento a 800-850 °C.

El compósito que presenta la mayor dureza es CASIL. En este caso, la silicona logra recubrir la mayor superficie del carbón. Seguido está el material compuesto de carbón activado-vidrio sales fundentes, donde las sales formadoras de vidrio fueron adsorbidas en la microporosidad del carbón. Díaz (2015) indica que parte del vidrio funde en el interior de los granos, otra parte en la superficie exterior y el sobrante se impregna en las paredes del recipiente de reacción.

En cuanto al reforzamiento de la matriz del carbón activado con las fritas de esmalte (CAFE) y el vidrio reciclado (CAVR), la masa fundente logra adherirse a la superficie externa. Existe una impregnación no homogénea en todos los granos de carbón. Parte del esmalte que no logró adherirse a la superficie, fue tamizado y retenido en las mallas de granulometría menor al tamaño nominal.

Se concluye que, en todos los casos de impregnación, se logra un reforzamiento de la superficie del carbón activado, con un aumento en la dureza en el intervalo de 4,4 a 9,8 puntos. Con la silicona, se logra reforzar mayormente la estructura, ya que aquella sustancia se impregna fácilmente en cualquier superficie; seguido están las sales fundentes que se adhieren a la matriz del carbón y logran reforzarla cuando se funden; el vidrio reciclado y las fritas de esmalte se incorporan en las grietas del carbón y no se adhieren en su totalidad debido a efectos de la tensión superficial entre el vidrio y la superficie carbonosa.

3.3.1.2. Determinación de las pérdidas por atrición

En la Tabla 3.14 se presentan los resultados de los ensayos de atrición, cuyas pérdidas se cuantificaron como el porcentaje de material pasante de la malla nominal # 8 y la diferencia corresponde al porcentaje de recuperación de carbón.

Adicionalmente, se presentan los valores de dureza inicial en la Tabla 3.12 y dureza final, obtenidos después del proceso de atrición. La diferencia de los valores anteriores corresponde al porcentaje de incremento de dureza.

Tabla 3.14. Pérdidas por atrición de carbones activados y compósitos

Parámetro	Carbón Calgon (GRC20)	Carbón activado (CAA)	Carbón activado-vidrio sales (CAVS)	Carbón activado-vidrio reciclado (CAVR)	Carbón activado-vidrio fritas (CAFE)	Carbón activado-polisilano (CASIL)
Pérdida (%)	29,4	53,3	36,3	46,1	39,3	31,1
Recuperación (%)	70,6	46,7	63,7	53,9	60,7	68,9
Dureza inicial (%)	99,1	89,0	98,1	93,4	94,5	98,8
Dureza final (%)	99,5	96,4	99,1	99,4	98,0	99,6
Incremento dureza (%)	0,5	8,3	1,0	6,4	3,7	0,9

El carbón Calgon es utilizado comercialmente en minería para la recuperación de oro de pulpas cianuradas, este material presenta una elevada dureza (99,1 %) y un porcentaje de pérdidas por atrición de 29,4 %. En este caso de estudio, el carbón activado de cuesco de palmiste (CAA), sin reforzamiento superficial presenta una menor dureza (89 %) y las pérdidas por atrición alcanzan un valor de 53,3 %.

Se observa que después del proceso de atrición CAA supera el valor referencial máximo admisible de pérdida a la atrición de 46 % señalado por Marsden y House (1992). Las pérdidas de material carbonáceo por atrición representan elevados costos para las empresas mineras, debido a que se pierde material adsorbente en las pulpas cianuradas y metales preciosos adsorbidos en la superficie del carbón fino. De los estudios realizados por los autores anteriores, el 100 % de las pérdidas por atrición, durante el proceso de recuperación de metales preciosos, se distribuye de la siguiente manera: 46 % del carbón se pierde en el proceso de cianuración en pulpa, 7 % en el proceso de elución y 47 % en la regeneración del mismo (p. 333). En el caso del compuesto (CAVS), las pérdidas de material por atrición se reducen en 17 puntos, con respecto a las determinadas en el carbón CAA sin reforzamiento, obteniéndose valores inferiores (36,3 %) al referencial admisible (46 %) señalado por Marsden y House (1992). En los compósitos CAVR, CAFE y CASIL, las

pérdidas se redujeron en 7; 14 y 22 puntos, con respecto a las determinadas con CAA, obteniéndose en todos los casos valores dentro de los límites máximos admisibles indicados por los autores anteriores.

El incremento de la dureza luego del ensayo de atrición del carbón CAA sin reforzamiento es notable (8,3 %). Miño (2004) indica que, durante la abrasión, se pierden las fracciones frágiles, se obtiene un carbón más compacto y resistente a la erosión. Por consiguiente, este incremento de dureza en la etapa de recuperación de metales preciosos resulta perjudicial, debido a las pérdidas de metal que arrastran las fracciones frágiles. Sin embargo, se evidencia que el proceso de atrición es una vía idónea para incrementar la resistencia mecánica de carbones, que podrían ser reutilizados en la industria minera. Asimismo, las fracciones frágiles que se obtienen de la abrasión húmeda, podrían ser recuperadas y utilizadas en áreas, como es el caso del tratamiento de aguas y otras aplicaciones más.

Los compósitos CAVS y CASIL no presentaron incremento considerado de la dureza luego de la atrición, ya que los valores de esta propiedad de los compósitos iniciales están cercanos al máximo (100 %). Por otra parte, los materiales compuestos CAVR y CAFE alcanzan un incremento en la dureza de 6 y 4 puntos, respectivamente. La razón este incremento en estos compuestos puede ser debida a las pérdidas de las fracciones frágiles de granos de carbón sin vidrios adheridos.

3.3.2. ANÁLISIS PRÓXIMO

Los parámetros del análisis próximo mostrados en la Tabla 3.15, correspondientes al carbón activado y compósitos, tales como la humedad ligada, el material volátil, la ceniza y el carbón fijo, presentan valores del orden de magnitud registrados por otros autores. Mejía, Patiño, Álvarez y Abreu (2007), que obtuvieron un carbón activado de cuesco de palma con una humedad del 4 %, materia volátil del 13,5 %; cenizas del 1,5 % y carbón fijo del 81 % (p.2). Se podría decir que el porcentaje de cenizas alcanzado por el carbón CAA es 3,5 veces mayor debido a la variación de

la constitución química de los cuescos analizados y a la ubicación geográfica donde se encuentran este tipo de especies vegetales (Bandosz, 2006, p. 14).

Tabla 3.15. Contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo del carbón activado y compósitos

Carbón	Código	Carbón activado (%)	Sustancia impregnada (%)	Humedad (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Carbón activado	CAA	100	-	6,04	14,45	5,20	80,35
Carbón activado-vidrio sales	CAVS	77	23	4,56	11,22	4,00	84,78
Carbón activado-fritas de esmalte	CAFÉ	57	43	1,23	8,15	2,96	88,89
Carbón activado-vidrio reciclado	CAVR	36	64	2,18	5,12	1,88	93,00
Carbón activado-polisilano	CASIL	74	26	5,29	29,71	3,89	66,40

En la Tabla 3.15 se presentan las proporciones reales de carbón activado-sustancias vítreas impregnadas obtenidas a partir de las relaciones carga fundente-carbón activado y volumen de polímero-carbón activado iniciales. En el ANEXO VII, se indica a detalle los cálculos que permiten hacer la aproximación teórica de estas proporciones, a fin de obtener la estimación de los valores de carbón fijo en porcentaje para cada compósito. En todos los casos se observa que el reforzamiento vítreo permite optimizar la cantidad de carbón fijo disponible para la adsorción de metales preciosos

Si se compara las propiedades químicas de los compósitos se evidencia que el material volátil disminuye en relación directa con la proporción de carbón activado presente en el material compuesto, cuando es sometido a una temperatura de 950 °C, Lua y Guo (2000) aclaran que a esa temperatura se favorece la eliminación de compuestos volatilizables (p. 1092). Asimismo, la determinación del porcentaje de ceniza tiene el mismo comportamiento, la cual es considerada como aquella

materia inorgánica que no puede ser combustionada, y generalmente, se constituye de una mezcla de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos. Si bien CAVR presenta la mayor proporción de carbón fijo disponible para el proceso de adsorción de metales preciosos (93 %), se debe tener en cuenta que este material solo aporta un 36 % de carbón activado al proceso. El ensayo de cinética de adsorción nos permitirá definir cuál de estos compósitos será el más efectivo durante el proceso de recuperación de oro.

Un caso diferente es el comportamiento del compósito CASIL, el cual presenta el doble de volátiles que el CAA, la razón del incremento se debe a la impregnación de la silicona, la cual, por ser un polímero volatiliza a temperaturas superiores a 250 °C (Callister, sf, p. 436). Sin embargo, para el porcentaje de carbón activo disponible en el compósito (74 %), se esperaría obtener aproximadamente un 54 % de carbón fijo disponible, los resultados experimentales evidencian que se consigue un 12 % de carbón fijo adicional, al esperado (66 %), lo que permite corroborar que el polisilano también actúa como mecanismo de reforzamiento sobre la superficie de carbón activado.

3.3.3. PROPIEDADES DE ADSORCIÓN

3.3.3.1. Determinación del índice de yodo y del área superficial BET

En la Tabla 3.16 se muestran los índices de yodo y las áreas superficiales BET del carbón activado y de los compósitos obtenidos. Es notable el aumento del índice de yodo luego del proceso de activación de CBA (191 a 849 mg I₂/g), según Yang y Lua (2003) este valor aumenta debido a la formación de la porosidad en la superficie de la matriz carbonácea, ocurrida por la reacción entre los átomos de carbono y las moléculas de vapor de agua, y a la pérdida de material volátil presente en el mismo (p. 410). El tiempo de activación es un parámetro determinante en la generación de la micro, meso y macroporosidad de carbones activados. Por un lado, se tiene, a medida que el periodo de exposición aumenta se ve favorecida la creación de superficie específica, hasta llegar al instante al cual se desarrolla el

efecto de la sinterización (Rodríguez et al., 1992, p. 111). Este fenómeno consiste en la linealización de la estructura del carbón, por consecuencia, existe un estrechamiento o cierre de algunos poros (Lua y Guo, 2000, p. 411-412).

Tabla 3.16. Valores del índice de yodo del carbón activado y de los compósitos

Carbón	Código	Índice de yodo (mg I ₂ /g)	Superficie BET (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)
Carbón baja activación	CBA	191 ± 2	-	-
Carbón activado	CAA	849 ± 4	788,5	0,30
Carbón activado-vidrio sales	CAVS	470 ± 29	438,4	0,18
Carbón activado-fritas de esmalte	CAFÉ	690 ± 35	541,0	0,23
Carbón activado-vidrio reciclado	CAVR	591 ± 23	307,0	0,14
Carbón activado-polisilano	CASIL	667 ± 24	438,3	0,21

$\bar{x} + \sigma$ (n = 2)

La utilización de sales fundentes en la impregnación de vidrio en la superficie del carbón disminuye el índice de yodo en un 44,7 %. Como lo indica Díaz (2015) en su investigación, la incorporación de vidrio en carbones de baja activación en su estructura cavernosa constituida por una variedad de porosidad, se realiza en forma de gotas, tapando los espacios conformados por los poros. En su investigación produjo compósitos con una disminución del índice de yodo del 63,3 % (pp. 77-84). Es posible, que en el caso de los compósitos estudiados debido a una mayor presencia de microporosidad en carbones activados, se haya propiciado solamente el taponamiento de los microporos.

La impregnación superficial de masa vítrea con la utilización de vidrio reciclado y de fritas de esmalte, disminuyen la pérdida de microporosidad. En ambos

compósitos CAVR y CAFE, la impregnación se da en la superficie externa del carbón, afectando en menor proporción la microporosidad. Se considera que la masa vítrea no logra cerrar la totalidad de los poros, ya que las materias fundentes poseen granulometrías suficientemente mayores (en el intervalo de micras) respecto a los diámetros de los micro, meso y macroporos del carbón.

La relación carga fundente/carbón para CAVR fue de 2:1; en cambio, para CAFE fue de 1:1, por ese motivo, el índice de yodo del primer compósito es menor que el segundo. La microporosidad es medida de los miligramos de yodo adsorbidos por unidad másica. Por lo tanto, si el material compuesto contiene mayor cantidad de masa vítrea, su índice de yodo será inversamente proporcional a la masa añadida.

Los compósitos CASIL presentan una reducción de la capacidad de adsorción en un 21,4 %. Según Miño (2004) la silicona cumple la función de crear una capa protectora de la superficie del carbón, manteniendo intacta la microporosidad del mismo. Realizando el mismo análisis, la reducción del índice de yodo es proporcional a la cantidad de polímero impregnado.

Estupiñan, Vásquez y Pulido (2005) indican que la producción o presencia de material fino en carbones activados es el posible causante del bloqueamiento de la porosidad. Yang y Lua (2003) señalan que la exposición de los materiales carbonáceos a altas temperaturas es la causante de la disminución del área superficial, por las excesivas reacciones carbono-CO₂, las cuales ensanchan el diámetro de los poros. Asimismo, Uribe et al. (2013) concluyen que la permanencia de los carbones a altas temperaturas, hace que la porosidad podría taponarse con la ceniza.

En todos los casos, el área específica es menor a la reportada en la microporosidad, determinada por el índice de yodo. Esto se debe que, para determinar el número de yodo, se entiende que son los mg de la molécula de diyodo (I₂) adsorbidos en la porosidad del carbón; en cambio, la adsorción BET utiliza como adsorbato el nitrógeno (N₂), los cuales tienen diámetros de moléculas diferentes. Vargas et al

(2008) indican que los microporos reaccionan con agentes oxidantes como el oxígeno, reduciendo el volumen de poro e incrementando de tamaño (p. 74). El carbón activado por presentar un volumen de poro y un área superficial mayor, es capaz de adsorber más cantidad de adsorbato.

Al observar las isotermas de adsorción de los carbones presentadas en el anexo IX, se tiene que las curvas se ajustan al tipo I, características de materiales microporosos. Asimismo, se observa el fenómeno de histéresis, donde la curva de desorción no sigue la misma ruta de la adsorción como lo indican Marsh y Rodríguez (2006).

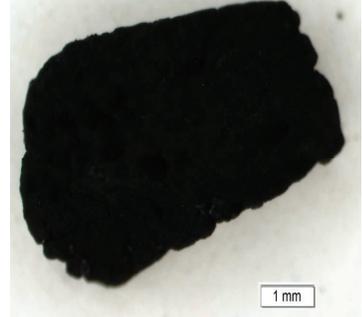
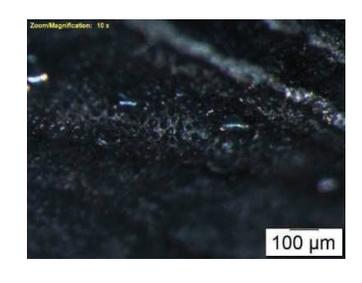
3.3.4. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL CARBÓN ACTIVADO Y COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO

3.3.4.1. Microscopía óptica de los carbones

La técnica de microscopía óptica permitió observar la morfología de cada uno de los carbones estudiados. De todos los granos de carbón observados, los parámetros estudiados fueron: la forma, la rugosidad, la concavidad y otros. Para el caso de la forma se estudia granos que van desde muy redondeados a muy angulares. En la Tabla 3.17 muestra las fotografías tomadas al carbón activado CAA.

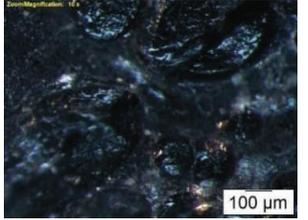
Como se expuso en la Tabla 3.17, el carbón activado se constituye de una variedad de formas y tamaños. Es probable que los granos alargados estén expuestos con mayor facilidad a la abrasión y desgaste. Los materiales con espesores compactos son los que otorgan una mayor resistencia al desgaste mecánico. Por el contrario, los granos con espesores finos y cóncavos, son fáciles de fracturar y de reducir de tamaño.

Tabla 3.17. Fotografías de microscopía óptica del carbón activado CAA con sus diferentes morfologías

		
<p>a) Grano de forma acircular, de apariencia superficial lisa con presencia de grietas.</p>	<p>b) Grano angular y posee unos canales pocos profundos.</p>	<p>c) Grano redondeado, tiene una superficie ahuecada y agrietada.</p>
		
<p>d) Grano irregular de apariencia superficial rugosa</p>	<p>e) Grano anguloso con canales superficiales hendiduras.</p>	<p>f) A 10x aumentos del grano e, se observa una estructura porosa en toda la superficie.</p>

La Tabla 3.18 muestra las fotografías tomadas del compuesto carbón activado-vidrio sales fundentes CAVS. Los granos a, b, c y e por presentar una mayor proporción de material vítreo impregnada, reducen su capacidad de adsorción, debido a que se cierra la vía de transporte hacia la microporosidad del carbón. Por su parte, el grano d al ser reforzado con la masa vítrea en las hendiduras propias del material adsorbente, presenta sitios de carbón libres de vidrio, donde no ha sido afectada la porosidad. De las observaciones realizadas a los compósitos CAVS, se concluye que en los sitios donde se evidencia la presencia de masa vítrea, se da un reforzamiento de la superficie carbonosa, asimismo, asociado a lo expuesto, se tiene una reducción del área superficial debido al taponamiento de la porosidad, causado por la acción de las cargas fundentes impregnadas.

Tabla 3.18. Fotografías de microscopía óptica del compuesto carbón activado-vidrio sales fundentes CAVS

		
<p>a) Grano angular, al cual se ha incorporado vidrio (fracción blanquecina). La impregnación no es uniforme y las sales fundidas presentan opacidad.</p>	<p>b) Carbón subangular recubierto aproximadamente la mitad de su superficie. Asimismo, la masa vítrea presenta brillo y transparencia.</p>	<p>c) Granos alargados unidos por la acción del vidrio fundido entre los mismos.</p>
		
<p>d) Carbón de morfología irregular, con espacios huecos ocupados por la masa vítrea.</p>	<p>e) Grano redondeado que posee una capa superficial de vidrio, que ha sido impregnado en las irregularidades del carbón.</p>	<p>f) A 10x aumentos del grano e, se observa que el vidrio se impregna en la superficie de manera irregular, ocupando las fisuras y concavidades del carbón.</p>

Las fotografías presentadas en la Tabla 3.19 corresponden al compuesto carbón-vidrio reciclado. Los granos del tipo (a) y (d) podrían considerarse aptos para la adsorción, debido a que el vidrio se impregna en las irregularidades del carbón de manera homogénea, sin afectar considerablemente la microporosidad del material adsorbente.

En el tipo (b), donde el vidrio adherido en mayor cantidad, reduciría el área superficial, por lo cual disminuiría la eficiencia de la adsorción. El elemento c) fue

en su totalidad cubierto por la masa vítrea. Este último obviamente sería inservible para la adsorción. Algo similar sucedería con el grano e), ya que el recubrimiento se asemeja a una capa de esmalte, cubriendo la mayoría de la superficie del carbón.

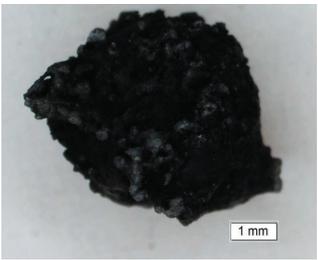
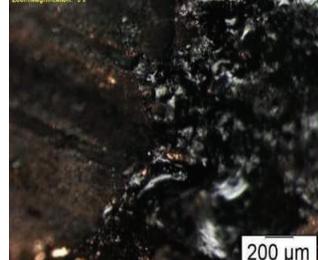
Tabla 3.19. Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio reciclado CAVR

		
<p>a) Grano angular que presenta una distribución homogénea de vidrio.</p>	<p>b) Grano irregular con presencia de masas de vidrio impregnadas sin uniformidad, formando aglomerados.</p>	<p>c) Grano redondeado donde la masa vítrea cubre la totalidad de la superficie.</p>
		
<p>d) Grano subangular, el cual posee gotas de vidrios ocupando las concavidades e irregularidades de la superficie del grano.</p>	<p>e) Grano muy angular donde existe un recubrimiento de vidrio casi en la totalidad de la superficie del mismo.</p>	<p>f) A 5x aumentos del grano a, se observa masa vítrea en las grietas del carbón, caracterizada por el brillo superficial.</p>

Las fotografías tomadas al compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte se presentan en la Tabla 3.20. Los elementos a, b y c, por estar recubiertos en su totalidad no serían capaces de adsorber, con la misma facilidad que lo realiza un carbón activado. El grano e, como se observa en la imagen fue recubierto aproximadamente la mitad. En este caso, la adsorción únicamente se realizaría en

la superficie libre de material vítreo. El grano d, presenta una distribución más homogénea del vidrio en la superficie carbonácea, por lo que se logra reforzar la estructura carbonosa y por consecuencia el número de yodo se afecta, no en gran proporción como en los casos anteriores.

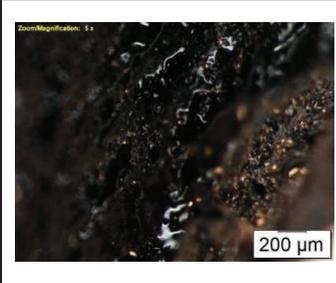
Tabla 3.20. Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte CAFE

		
<p>a) Grano angular recubierto en su totalidad, se nota claramente el brillo reflejado por el vidrio.</p>	<p>b) Grano redondeado que tiene un recubrimiento parcial, formando una capa superficial de esmalte.</p>	<p>c) Grano redondeado que es totalmente recubierto por la masa de esmalte.</p>
		
<p>d) Grano muy angular donde el vidrio se impregnó en forma de aglomerados de esmalte.</p>	<p>e) Grano angular que tiene un recubrimiento parcial, formando una capa superficial de esmalte.</p>	<p>f) A 5x aumentos del grano e, el vidrio impregnado tiene una morfología irregular, se observa una fracción libre de vidrio y la otra fracción ocupada por la masa vítreo.</p>

El último caso de impregnación que se presenta a continuación, corresponde a los compósitos de carbón activado – polisilano. La Tabla 3.21 muestra las fotografías tomadas a estos materiales compuestos. Anteriormente, se presentan los valores del índice de yodo de estos compósitos, y se concluye que esta propiedad no fue afectada en gran proporción, pero la barrera protectora que se forma con la

impregnación de la silicona, cierra la vía de transporte hacia la microporosidad del carbón. La ventaja de la utilización de la silicona es que la misma puede adherirse a cualquier superficie, sea porosa, lisa e irregular.

Tabla 3.21. Fotografías del compuesto carbón activado-polisilano CASIL

		
<p>a) Grano redondeado recubierto en su totalidad con el polímero.</p>	<p>b) Hay recubrimiento total y la unión de los carbones por la acción adhesiva de la silicona.</p>	<p>c) Grano angular donde la impregnación es irregular, ya que en algunas secciones del carbón no hay la presencia del polímero.</p>
		
<p>d) Grano subangular donde la impregnación es homogénea con la cantidad necesaria para no cubrir la superficie del carbón en su totalidad.</p>	<p>e) Grano subredondeado recubierto en su totalidad por el polímero, se observa un brillo superficial.</p>	<p>f) A 5x aumentos del grano e, el polímero se impregna en la totalidad de la superficie carbonosa.</p>

3.3.4.2. Microscopía electrónica de barrido de los carbones

Una vez estudiados los compósitos por microscopía óptica, en las imágenes presentadas a continuación se analiza la morfología de los mismos por microscopía electrónica de barrido. En cada carbón, se estudió la influencia de la impregnación de sustancias en la superficie del carbón activado. Así mismo, en todos los casos

se realizó un mapeo de sus superficies, con el fin de tener una idea de los elementos impregnados.

Primero, se observó la superficie del carbón activado sin impregnación. En la Figura 3.10 (a) se muestra la imagen superficial del carbón activado. Esto evidencia la presencia de las fisuras, hendiduras y concavidades. En la Figura 3.10 (b) se observa la porosidad diversa de la superficie del carbón, el complejo formado es similar a un laberinto, con múltiples y desordenados canales. En la Figura 3.10 (c), se evidencia la presencia de la microporosidad del material activado.

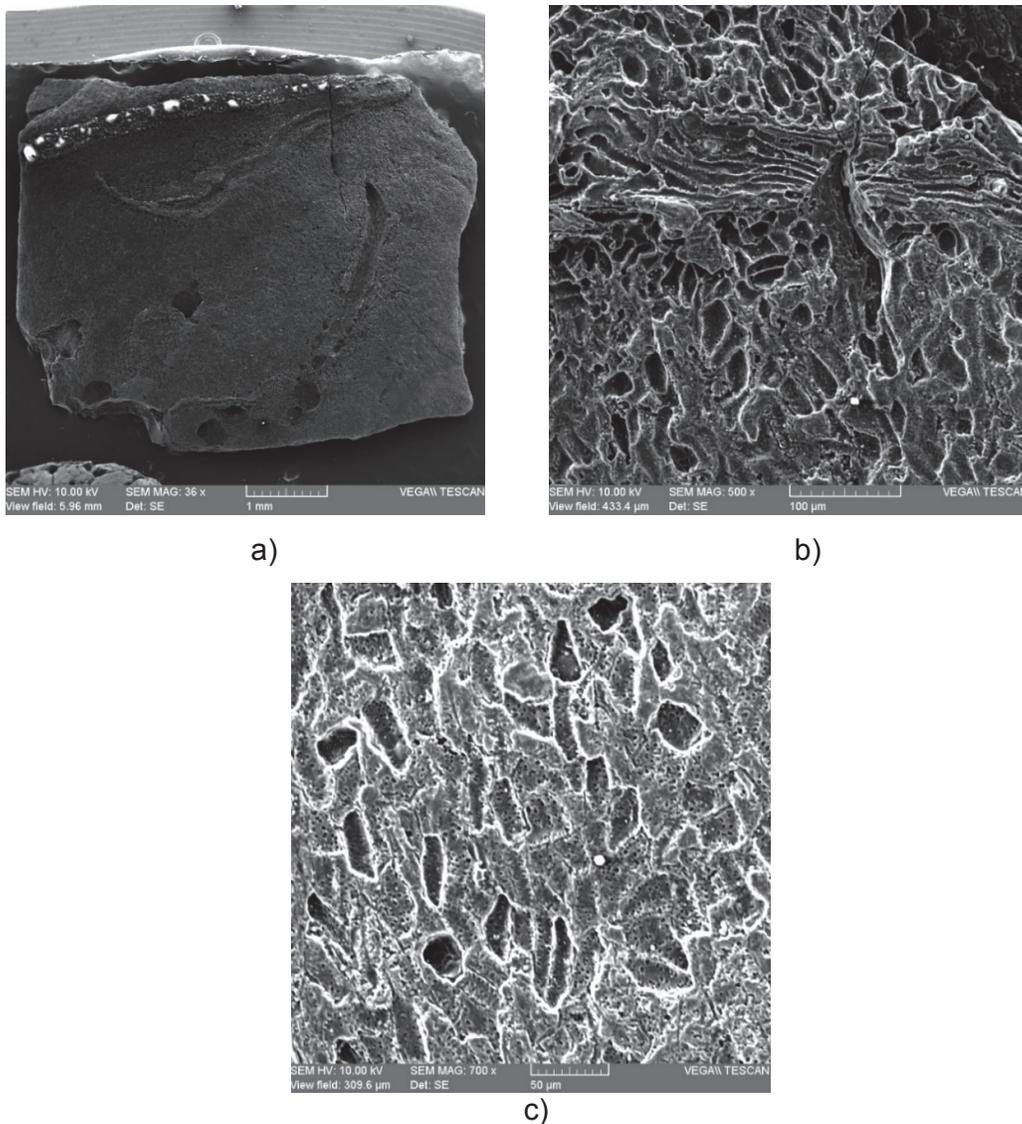


Figura 3.10. Fotografías del carbón activado por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 36x, b) 500x, y c) 700x

La Figura 3.11 muestra las imágenes tomadas del compuesto carbón-vidrio sales fundentes.

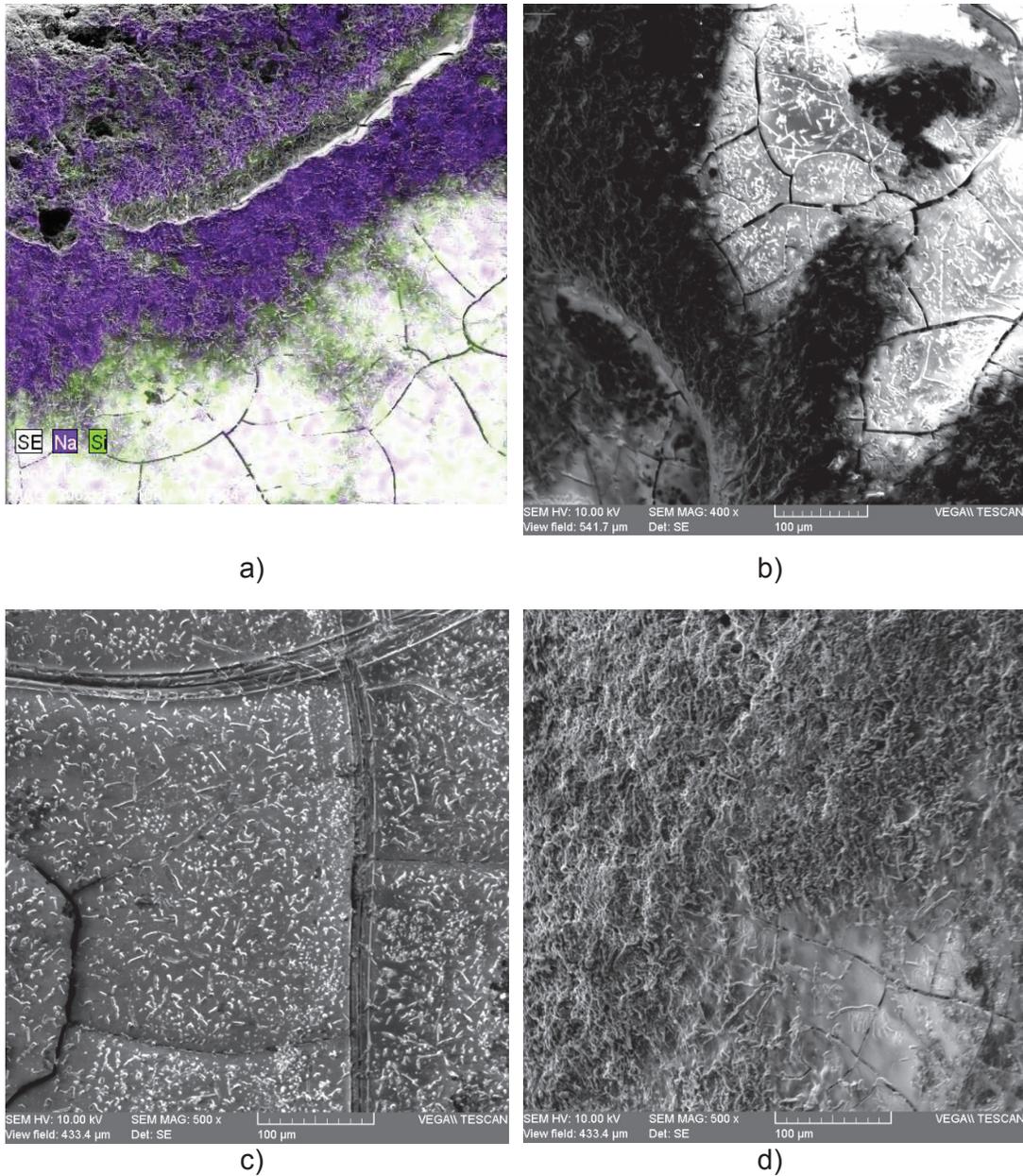


Figura 3.11. Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio sales fundentes por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 200x, b) 400x, c) y d) 500x

En la Figura 3.11 (b) se observan las fisuras del vidrio fundido y adherido. La impregnación se efectuó como capas de esmalte de vidrio con diferentes espesores. La ampliación de una sección de vidrio impregnado, mostrada en la

Figura 3.11, c, presenta un sin número de microburbujas o cristalizaciones, que en la imagen son de color blanco. La capa vítrea refuerza la superficie carbonosa, pero la microporosidad se ve afectada debido al taponamiento de las cargas fundentes incorporadas. En el caso d, una pequeña sección es ocupada por una capa de esmalte plana y fisurada. La fracción restante, las materias vítreas funden heterogéneamente, por lo que la superficie del carbón es irregular y rugosa. La imagen a, muestra el mapeo realizado a la superficie del compuesto. Se observa claramente la presencia de elementos como el sodio y silicio, constituyentes del vidrio impregnando la superficie del carbón.

Las imágenes tomadas al compuesto de carbón activado-vidrio reciclado se muestran en la Figura 3.12.

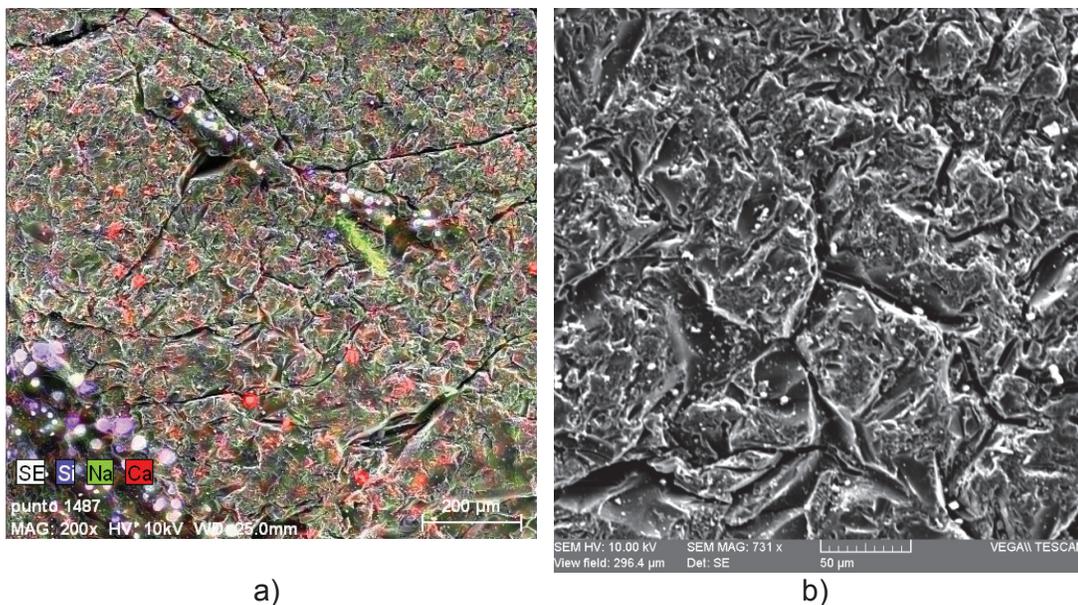


Figura 3.12. Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio reciclado por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) 200x, y b) 731x

El mapeo realizado al compuesto de la Figura 3.12-a, muestra la existencia de elementos constituyentes del vidrio reciclado, como son: silicio, sodio y calcio. se ubican estos elementos en toda la superficie carbonosa. En la imagen b, se observa que la masa vítrea es capaz de ocupar las hendiduras y fisuras del carbón. En este caso, el vidrio fue impregnado de tal manera que se distribuya en toda la superficie,

debido a la presencia de irregularidades en el material adsorbente, existe probablemente un alto porcentaje de la masa vítrea que ocupa estos espacios, lo que se refleja en la disminución de su índice de yodo.

A continuación, en la Figura 3.13 se presenta las micrografías tomadas al compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte.

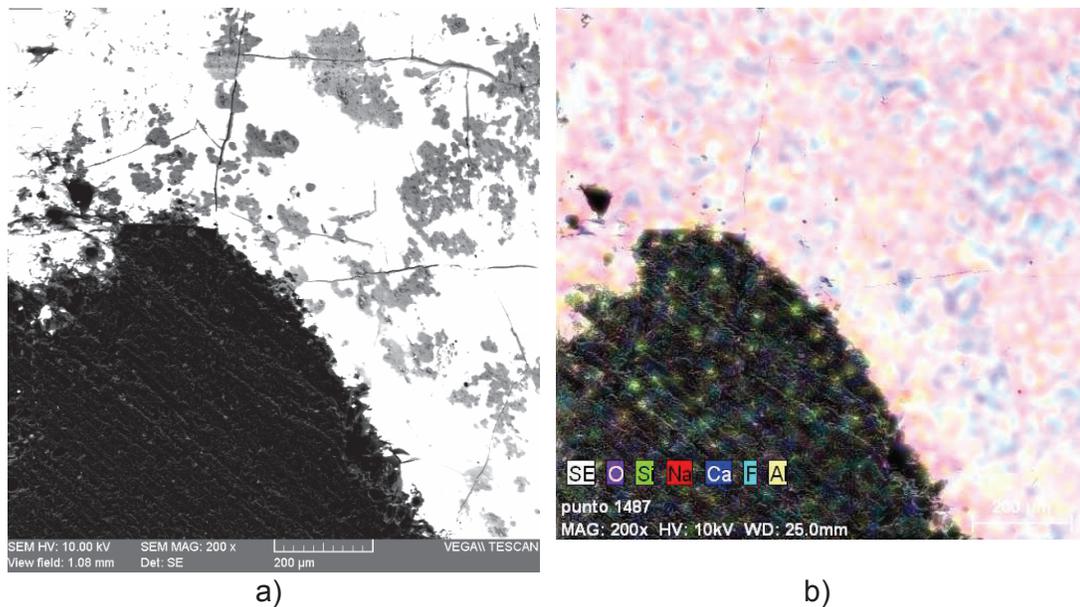


Figura 3.13. Fotografías del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) y b) 200x

En la Figura 3.13 (a), se observa claramente que la sección blanca-grisácea fue ocupada por la masa vítrea fundida en la superficie del carbón. Asimismo, la impregnación se efectúa como una capa de esmalte de vidrio, la cual presenta fisuras causadas por las tensiones generadas en el enfriamiento. El área de color negro, correspondiente al carbón activado que no fue alterada en la impregnación y, por lo tanto, viene a ser el sitio activo por el cual se realiza el fenómeno de la adsorción. En el mapeo realizado a una sección del compuesto (imagen b), se observa como los elementos: silicio, sodio, calcio y aluminio, forman parte de la constitución del esmalte impregnado y se encuentran dispersos en las superficies libres del carbón.

Por último, se encuentran las imágenes del compuesto carbón activado-polisilano presentadas en la Figura 3.14.

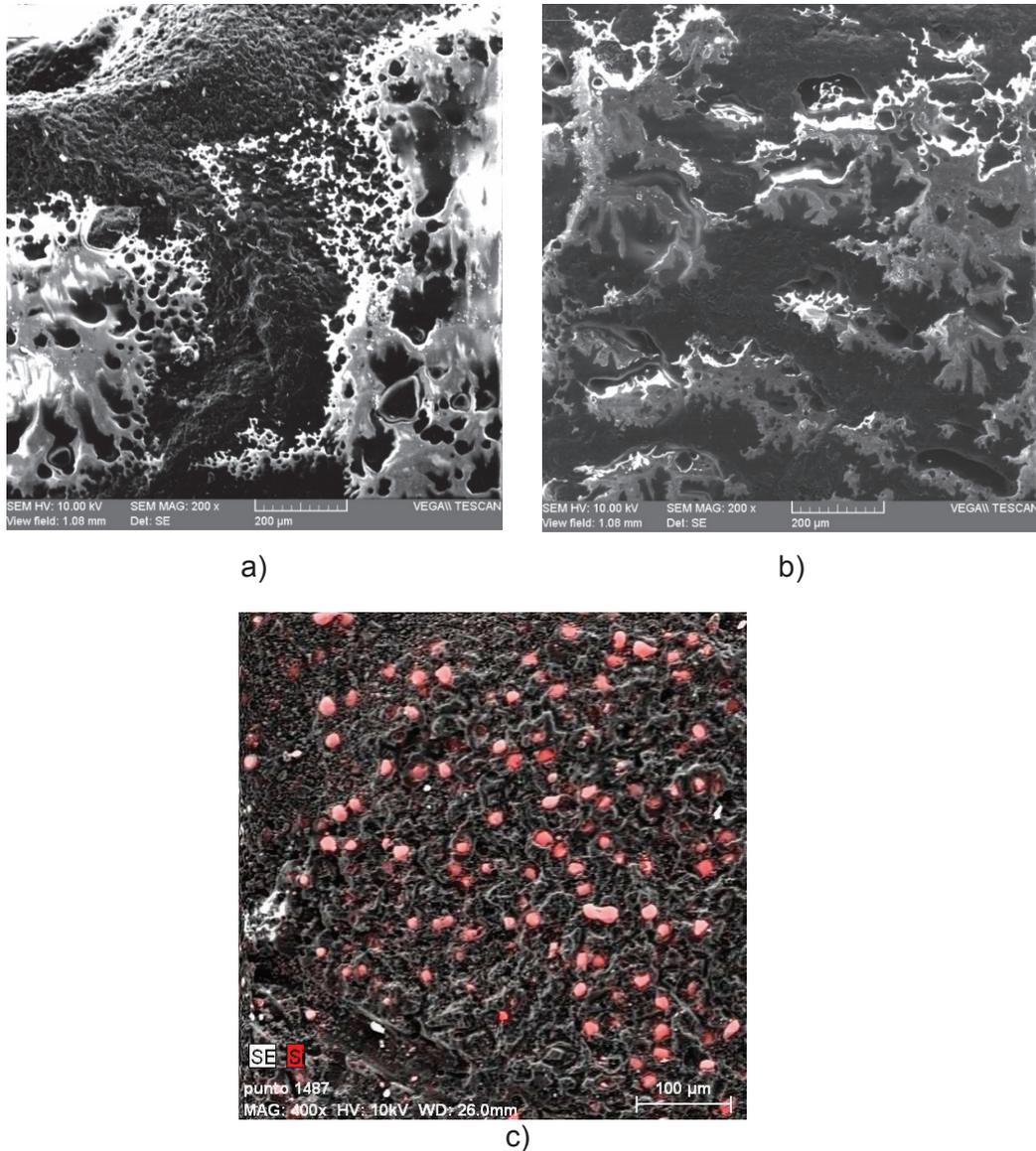


Figura 3.14. Fotografías del compuesto carbón activado-polisilano por microscopía electrónica de barrido, con aumentos de a) y b) 200x, c) 400x

Lo que se puede observar en la Figura 3.14 a y b, son unas manchas de color grisáceas correspondientes al polímero. En cambio, las secciones de carbón activado libres, presentan un aspecto irregular con rugosidad en toda su superficie. En el mapeo realizado a este compuesto, se observa la presencia de silicio distribuido de manera homogénea en toda el área de estudio. Los átomos de

oxígeno que forman parte del polímero no se reportaron, ya que se trabajó en una atmósfera rica en aire sintético, y el oxígeno presente en el gas ocasionaría errores en el mapeo de las muestras.

3.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL COMPLEJO CIANURO-ÁURICO EN EL CARBÓN ACTIVADO Y EN LOS COMPÓSITOS CARBÓN ACTIVADO-VIDRIO Y CARBÓN ACTIVADO-POLISILANO

La capacidad de adsorción de los carbones se efectuó mediante las cinéticas de adsorción de oro. El adsorbato utilizado fue el complejo cianuro-áurico preparado con una solución estándar de oro. Las cinéticas de adsorción se midieron como el porcentaje de oro adsorbido por el carbón en función del tiempo. Los resultados de estos ensayos se ilustran en la Figura 3.15.

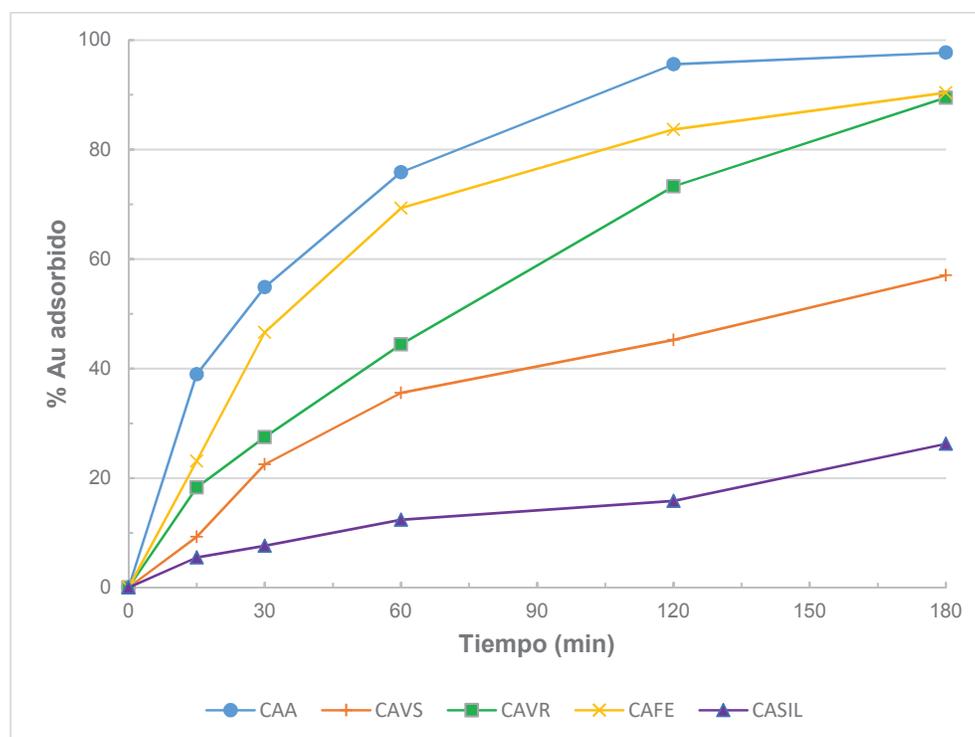


Figura 3.15. Porcentaje de recuperación de oro por el carbón activado y por los compósitos en función del tiempo [Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.

Para el caso de CAA, un incremento del tiempo de exposición del carbón en la solución cianurada, favorece la adsorción del complejo cianuro-áurico en la superficie del material adsorbente. Luego de las 3 horas del proceso, se recupera aproximadamente el 100 % del oro en solución (97,7 %) y se puede establecer que este tiempo es el requerido en el proceso.

La curva que refleja el comportamiento del compósito CASIL, evidencia la pérdida total de la capacidad de adsorción, esto se debe a que el polímero se impregna en la superficie externa del carbón, bloqueando el transporte del adsorbato a la superficie interna. A pesar de que su índice de yodo es elevado, probablemente la causa del bajo rendimiento del proceso cinético es debido al tipo de recubrimiento que produce la silicona sobre la superficie del carbón, obteniéndose una recuperación máxima (3 horas) del 26,3 %.

En el compósito CAVS, la cinética es más lenta en comparación al carbón activado, con recuperaciones menores del oro. Se logra a las 3 horas una adsorción del 57 %. Esto se refleja en la disminución del índice de yodo en aproximadamente un 50 %, que reduce la capacidad adsorptiva y eficiencia del material adsorbente.

Seguido, se tiene la cinética del compósito CAVR. En este caso, la curva comienza a presentar una tendencia lineal y no alcanza el equilibrio (Vargas, Navarro y Aguayo, 2008, p. 6). La recuperación del oro a tiempos menores a 3 horas es menor que el carbón activado, pero al tiempo de 3 horas de agitación, se logra la adsorción del 89,5 % del oro en solución.

El comportamiento de la curva de CAFE es similar a la del carbón activado, pero la recuperación del oro en cada tiempo se ha disminuido. La incorporación de esmalte disminuye la eficiencia de adsorción del carbón, debido al taponamiento de los poros. Toda sustancia inorgánica como la ceniza presente en el carbón, es la causante del cierre y disminución de la porosidad (Sarmiento et al., 2004, p. 55). La recuperación máxima lograda en el tiempo de 3 horas fue de 90,4 %. Con los resultados de las cinéticas de adsorción se revela que el compósito carbón activado-vidrio fritas presenta las mejores propiedades adsorptivas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

El compósito carbón activado-vidrio fue obtenido con la utilización de sales fundentes, el cual presenta una dureza del 98 % e índice de yodo de 470 mg I₂/g CA. El metasilicato de sodio pentahidratado y el tetraborato de sodio decahidratado se impregnan en la superficie interna del carbón activado y reforzar la estructura carbonosa.

El compósito carbón activado-vidrio reciclado obtenido alcanzó una dureza del 93 % e índice de yodo de 591 mg I₂/g CA, donde las cargas fundentes se impregnan y refuerzan la superficie del carbón activado.

El compósito de carbón activado-vidrio de fritas de esmalte producido presenta una dureza del 95 % e índice de yodo del 690 mg I₂/g CA, al igual que el vidrio reciclado, las fritas de esmalte se impregnan en la superficie del carbón incrementando la resistencia mecánica del carbón activado.

El compósito carbón activado-polisilano obtenido presentó una dureza del 99 % e índice de yodo de 667 mg I₂/g, donde el polisilano crea una capa protectora de la superficie del carbón activado.

Las pérdidas por atrición son inversamente proporcionales a la dureza y los valores reportados fueron de 36, 46, 39 y 31 % para los compósitos con vidrio de sales fundentes, vidrio reciclado, vidrio de fritas de esmalte y polisilano; en comparación del carbón activado que presenta un valor del 53 % de pérdidas, observándose en todos los casos, que una adición de sustancias a la superficie del carbón aumenta la resistencia mecánica del mismo.

La fracción de carbón activado constituyente del compósito presenta un elevado porcentaje de carbón fijo, superando al valor del carbón fijo del carbón activado sin impregnación, deduciéndose que la masa vítrea logra reforzar la superficie del carbón; caso aparte es la impregnación de polisilano, donde el porcentaje de

polímero impregnado se incorpora en la fracción de volátiles, lo cual es desfavorable ya que en un posible tratamiento del carbón a temperaturas superiores a 250 °C, se perdería un considerable porcentaje de volátiles.

Las recuperaciones del complejo cianuro-oro en solución obtenidas fueron del 98, 57, 89, 90 y 27 % para el carbón activado, compósitos con vidrio sales, vidrio reciclado, vidrio fritas y polisilano, respectivamente. Estos resultados permiten evidenciar que el compósito CAFE, los mecanismos de reforzamiento superficial del compuesto son los más apropiados para obtener carbones activados con mayor rendimiento de recuperación de metales preciosos. Compuestos que presentan el mayor índice de yodo y un valor de dureza y rendimiento dentro de los estándares requeridos para el uso de carbones activados utilizados en minería.

4.2. RECOMENDACIONES

Realizar una activación de los compósitos carbón-vidrio que presentan las mayores resistencias mecánicas, con el fin de incrementar el área superficial.

Evaluar la impregnación y fusión de los compósitos con fritas de esmalte a temperaturas superiores a 800 °C con el fin de incrementar la impregnación de esmalte sobre la superficie del carbón para lograr un carbón comercial.

Se recomendaría utilizar sustancias formadoras de vidrio como el tetraetilortosilicato (TEOS), el cual a temperaturas mayores a 600 °C se descompone en sílice produciendo un vidrio que presenta porosidad.

Utilizar materias primas formadoras de vidrio con las que se obtengan composiciones similares a los vidrios Vycor, los cuales con un lavado ácido se obtiene una masa vítrea rica en sílice y porosa.

Se recomienda hacer la impregnación de vidrio con un carbón previamente atricionado, con el fin de utilizar menor cantidad de cargas fundentes e incrementar la capacidad de adsorción del carbón.

Se observó que en el compósito carbón activado-polisilano, al poseer un considerado índice de yodo se presenta una baja capacidad de adsorción en la recuperación de metales preciosos por lo cual se recomienda encontrar un método de medición del área superficial de carbones activados impregnados de cualquier tipo de sustancias.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Activated carbon technologies. (2016). *The activated carbon supply specialists*. Obtenido de <http://www.activatedcarbon.com.au/index.htm> (Diciembre, 2016)
2. Adams, M. (2016). *Gold ore processing: Project development and operations*. Singapore: Elsevier.
3. Alavi, S., Thomas, S., Sandeep, K. P., Kalarikkal, N., Varghese, J., & Yaragalla, S. (2015). *Polymers for packaging applications* (Primera ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
4. ASTM D2866-11. (2011). *Standard test method for total ash content of activated carbon*. Obtenido de www.astm.org (Diciembre, 2015)
5. ASTM D2867-09. (2009). *Standard test method for moisture in activated carbon*. Obtenido de www.astm.org (Diciembre, 2015)
6. ASTM D3802-10. (2010). *Standard test method for ball-pan hardness of activated carbon*. Obtenido de www.astm.org (Diciembre, 2015)
7. ASTM D4607-14. (2014). *Standard test method for determination of iodine number of activated carbon*. Obtenido de www.astm.org (Diciembre, 2015)
8. ASTM D5832-98. (2014). *Standard test method for volatile matter content of activated carbon samples*. Obtenido de www.astm.org (Diciembre, 2016)
9. Avgustinik, A. I. (1983). *Cerámica* (Segunda ed.). España: Editorial Reverté S. A.
10. Ayache, J., Beaunier, L., Boumendil, J., Ehret, G., & Laub, D. (2010). *Sample preparation handbook for transmission electron microscopy: Methodology* (Primera ed.). New York, USA: Springer Science Business Media. doi:10.1007/978-0-387-98182-6

11. Azareño. (2001). *Recuperación de oro y plata de minerales por heap leaching*. Obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/recup_oro_plata.htm (Agosto, 2016)
12. Bandosz, T. (2006). *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*. (1era ed.). New York, USA: Elsevier.
13. Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*. Boca Raton: CRC Press.
14. Bartlett, R. W. (1998). *Solution mining: Leaching and fluid recovery of materials* (Segunda ed.). Amsterdam: Overseas publishers association.
15. Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades* (Primera ed.). España: Universidad de Alicante.
16. Beltrán, S. (2012). *Cianuración de minerales auríferos y adsorción de oro y plata con carbón activado inmovilizado (IAC)* . (Proyecto previo para la obtención del título de Ingeniería Química). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
17. Borsella, G. A. (2009). Defectos frecuentes del vidrio: Definición, clasificación y caracterización. *Jornadas del vidrio* (págs. 6-7). Buenos Aires, Argentina: Revista Cerámica y Cristal.
18. Bray, C. (2001). *Dictionary of glass: Materials and techniques* (Segunda ed.). Filadelfia, USA: A & C Black.
19. Callister, W. D. (s.f). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
20. Campbell, F. C. (2012). *Phases diagrams: Understanding the basics* (Primera ed.). USA: The materials information society.
21. Carbon Calgon. (2012). *Product bulletin: GRC 20 and GRC 22. Gold Recovery Granular Activated Carbon*. Obtenido de <http://www.calgoncarbon.com/wp-content/uploads/product-literature/GRC.pdf> (Octubre, 2015)

22. Carraher, C. E. (2013). *Introduction to polymer chemistry* (Tercera ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
23. Caselles, M. J., Gómez, M. R., Molero, M., & Sardá, J. (2015). *Química aplicada a la ingeniería* (Primera ed.). Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
24. Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Díaz de Santos, S. A.
25. Cecen, F., & Aktas, O. (2011). *Activated carbon for water and wastewater treatment: Integration of adsorption and biological treatment*. John Wiley & Sons.
26. Celignis. (2017). *Analysis Package P3: Ash Content*. Obtenido de <http://www.celignis.com/package.php?value=7> (Enero, 2017)
27. Chowdhury, Z., Scott, R., Westerhoff, G., Leto, B., Nowack, K., & Corwin, C. (2013). *Activated Carbon: Solución for improving water quality*. USA: American Water Works Association.
28. CMEMaterials. (sf). *Vidre verd*. Obtenido de <http://www.ub.edu/cmematerials/ca/content/vidre-verd> (Julio, 2016)
29. Crespo, S. (2010). *Materiales de construcción para edificación y obra civil* (Primera ed.). España: Club Universitario.
30. Deiana, A., Petkovic, L., & Noriega, S. (1998). Carbón activado a partir de materias primas regionales. *Información Tecnológica*, 9(5), 90.
31. Desotec. (2015). *Estructura química del carbón: una forma de grafito desorganizado*. Obtenido de <http://www.desotec.com/es/carbon-activo/la-estructura-quimica-del-carbon-activo/> (Diciembre, 2016)
32. Díaz, D. (2015). *Desarrollo y caracterización de compósitos de carbón activado-vidrio para la recuperación de oro*. (Disertación previa a la obtención del

título de Licenciado en Ciencias Químicas con mención en Química Analítica). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

33. Domènech, X., & Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona, España: Reverté.
34. Ellis, B., & Smith, R. (2009). *Polymers: A property database* (Segunda ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
35. El-Meliegy, E., & Van Noort, R. (2012). *Glasses and glass ceramics for medical applications*. New York, USA: Springer.
36. Escribano, P., Carda, J., & Cordoncillo, E. (2001). *Esmaltes y pigmentos cerámicos* (Primera ed., Vol. I). Faenza Editrice Iberica.
37. Escudero, M. J. (2015). *Técnicas de almacén* (Primera ed.). Madrid, España: Paraninfo, SA.
38. Estupiñan, H. A., Vásquez, C., & Pulido, J. E. (2006). Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia. *Facultad de Ingeniería*, 37, 37.
39. Fernández, J. M. (1991). *El vidrio* (Segunda ed.). Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
40. Fernández, J. M. (2003). *El vidrio* (Tercera ed.). Madrid, España: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
41. Ghabari-Ahari, K., & Cameron, A. M. (1993). Phase diagram of Na₂O-B₂O₃-SiO₂ system. *Journal of the American Ceramic Society*, 76(8), 2019. doi:10.1111/j.1151-2916.1993.tb08326.x
42. Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma: Estudio de termogravimetría y estructura*. Bogotá: Kassel University Press.

43. González, J. A., Túnez, F., & Ruiz, M. (2007). Síntesis de vidrios en el laboratorio: Efecto de los diferentes modificadores. *En Congreso de Metalurgia y Materiales* (págs. 1641-1644). Buenos Aires, Argentina: Sociedad Argentina de Materiales.
44. González, M. T., Molina-Sabio, M., & Rodríguez-Reinoso, F. (1994). Steam activation of olive stone chars, development of porosity. *Carbon*. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90133-3](http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223(94)90133-3)
45. Grandjean, A., Malki, M., Simonnet, C., Manara, D., & Penelon, B. (2007). Correlation between electrical conductivity, viscosity, and structure in borosilicate glass-forming melts. *Physical Review B*, 75(054110), 3-4. doi:10.1103/PhysRevB.75.054112
46. Grau, M., & Muñoz, E. (2013). *Ingeniería Química*. Madrid, España: Univesidad Nacional de Educación a Distancia.
47. Hayes, B. S., & Gammon, L. M. (2010). *Optical microscopy of fiber reinforced composites* (Primera ed.). Ohio, USA: ASM International.
48. Hendricks, D. (2006). *Water treatment unit processes: Physical and chemical*. Boca Raton: CRC Press.
49. Hernández, L., & González, C. (2002). *Introducción al análisis instrumental* (Primera ed.). Barcelona, España: Editorial Ariel Ciencia.
50. Heschel, W., & Klose, E. (1995). On the suitability of agricultural by-products for the manufacture of granular activated carbon. *Fuel*, 74(12), 1787-1790. doi:10.1016/0016-2361(95)80009-7
51. Higging, R. A., & Bolton, W. (2010). *Material for engineers and technicians* (Quinta ed.). Oxford, Reino Unido: Newnes Publications.
52. Holbrook, C., Chakraborty, S., Ravidren, S., Boolchand, P., Goldstein, J., & Stutz, C. (2014). Topology and glass structure evolution in $(\text{BaO})_x((\text{B}_2\text{O}_3)_{32}(\text{SiO}_2)_{68})_{100-x}$ ternary—Evidence of rigid, intermediate, and

- flexible phases. *The Journal of Chemical Physics*, 140(144506), 2.
doi:10.1063/1.4869348
53. Holleman, A. F., & Wiberg, E. (1995). *Inorganic Chemistry* (Trigésima cuarta ed.). Berlin, Alemania: Academic Press.
54. Inagaki, M., & Kang, F. (2016). *Material science and engineering of carbon: Characterization*. USA: Butterworth-Heinemann.
55. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995). *NTE INEN 1988:1995 Productos químicos industriales: Carbón activado para uso industrial. Determinación de la dureza*. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1988.1995.pdf> (Diciembre, 2015)
56. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995). *NTE INEN 1989:94 Productos químicos industriales: Carbón activado para uso industrial. Determinación de la dureza*. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1989.1995.pdf> (Diciembre, 2015)
57. Janssens, K. (2013). *Modern methods for analysing archaeological and historical glass* (Primera ed.). John Wiley & Sons.
58. Jerez, C. (2014). *Diseño de una planta para la obtención de carbón activado a partir de cuesco de palmiste (elaeis guinéens) mediante activación química con cloruro de zinc*. (Proyecto previo para la obtención del título de Ingeniería Química). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
59. Koplán, S., Okun, D. T., Hillman, J. A., Lane, C. R., Pearson, D. R., & Aranoff, S. L. (2006). *Certain activated carbon from China*. Washington, USA: United states international trade commission.
60. Lefteri, C. (2002). *Glass*. Suiza: RotoVision.
61. Lenntech. (2016). *Adsorción/Carbón activo*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/adsorcion.htm> (Diciembre, 2016)

62. Lua, A. C., & Guo, J. (2000). Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal. *Carbon*, 38, 1091-1096.
63. Madrid, M. (2002). *Tecnología de la adhesión*. Obtenido de http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (Diciembre, 2016)
64. Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la química ambiental* (Primera ed.). México D. F.: Reverté.
65. Mark, J. E., Allcock, H. R., & West, R. (2005). *Inorganic polymers* (Segunda ed.). New York, USA: Oxford University Press.
66. Marrillet, J., & Rottner, B. (2013). *Patente nº PCT/FR2010/050532*. Obtenido de <https://www.google.com/patents/US8481799> (Julio, 2016)
67. Marsden, J. O., & House, C. L. (2006). *The chemistry of gold extraction*. Littleton, Colorado, USA: Society for mining, metallurgy and exploration, Inc.
68. Marsh, H., & Rodríguez, F. (2006). *Activated carbon*. Great Britain: Elsevier .
69. Mejía, O., Patiño, S., Álvarez, M., & Abreu, L. (2007). Aprovechamiento de los residuos de la industria palmera mediante la obtención de carbón activado a escala de laboratorio. *ION*, 20(1), 2-4.
70. Menéndez, Á. (2012). *El carbón en la vida cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial*.
71. Mera, L., Vásquez, P., Bolaños, S., & Oscullo, L. (2010). Reutilización del vidrio de desecho para preparar esmaltes porcelánicos de primera capa. *Revista Politécnica*, 29(1), 88-92.
72. Miño, R. (2004). *Carbón activado con mayor dureza para el tratamiento de minerales auríferos*. (Proyecto previo para la obtención del título de Ingeniería Química). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

73. Miranda, M., Claramunt, R. M., Cornago, M., Escolástico, C., Esteban, S., Farrán, M., . . . Sanz, D. (2008). *Reciclado y tratamiento de residuos* (Primera ed.). Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
74. Muzafarov, A. M. (2011). *Silicon polymers* (Primera ed.). Berlin, Alemania: Springer-Verlag.
75. Navarro, P., & Vargas, C. (2010). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. *Revista de metalurgia*, 46(3), 231-238. doi:10.3989/revmetalm.0929
76. Newcombe, G., & Dixon, D. (2016). *Interface science drinking water treatment: Theory and applications*. The Netherlands: Academic Press.
77. Nogués, F. S., García, D., & Rezeau, A. (2010). *Energías renovables: Energía de la biomasa* (Primera ed.). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
78. Nudelman, N. (2004). *Química sustentable*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
79. Owen, M. J., & Dvornic, P. R. (2002). *Silicone surfaces science: Advances in silicon science*. doi:10.1007/978-94-007-3876-8
80. Paine, F. A. (1991). *The packaging user's handbook* (Primera ed.). Canada: Blackie Academic & Professional.
81. Panda, H. (2011). *The complete book on sugarcane processing and by-products of molasses (with analysis of sugar, syrup and molasses)*. India: Asia Pacific Business Press.
82. Parkinson, B. G., Holland, D., Smith, M. E., Howes, A. P., & Scales, C. R. (2007). The effect of oxide additions on medium-range order structures in borosilicate glasses. *Journal of Physics*, 19, 4-10. doi:10.1088/0953-8984/19/41/415114

83. Pearson, C. (sf). *Manual del vidrio plano*. Obtenido de http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/manual_vidrio_plano.pdf (Diciembre, 2016)
84. Pfaender, H. G. (1996). *Schott guide to glass* (Segunda ed.). Dordrecht, Holanda: Springer Science Business Media.
85. Plodinec, M. J. (2000). Borosilicate glasses for nuclear waste immobilisation. *Glass Technology*, 41(6), 189.
86. Potwara, R. (2012). *The ABCs of activated carbon*. Obtenido de http://www.wqpmag.com/sites/wqpmag.com/files/14_tu_carbonresources_0312WQP.pdf (Diciembre, 2016)
87. Punmia, B. C., Jain, A. K., & Jain, A. K. (2004). *Basic civil engineering*. Nueva Delhi, India: Laxmi Publications.
88. Rapp, G. R. (2002). *Archaeomineralogy* (Primera ed.). Berlín, Alemania: Springer Science & Business Media.
89. Rincón, J. M. (s. f.). *Materias primas para la industria del vidrio*. Obtenido de http://www.ehu.eus/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_049.pdf (Diciembre, 2016)
90. Rivière, J. C., & Myhra, S. (2009). *Handbook of surface and interface analysis: Methods for problem-solving* (Segunda ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
91. Sánchez, E., García-Ten, J., & Regueiro, M. (2006). Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 45(1), 2-3.
92. Sarmiento, C., Jorge, S., García, C., Rincón, Y., Benítez, A., & Ramírez, J. (2004). Preparación de carbón activado mediante la activación química de carbón mineral. *Scientific Journal*, 12(1), p. 55. Obtenido de <http://www.produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/viewFile/9209/9198> (Enero, 2017)

93. Schaeffer, K. (2013). *Actualización del mercado de carbón activado 2013 o, la convolución del carbón*. Obtenido de http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/June_Schaeffer.pdf (Agosto, 2016)
94. Shalaby, S. W., & Salz, U. (2007). *Polymers for dental and orthopedic applications* (Primera ed.). Boca Raton, USA: CRC Press.
95. Shelby, J. E. (2005). *Introduction to glass science and technology* (Segunda ed.). Cambridge, Reino Unido: Royal Society of Chemistry.
96. Uribe, L. M., López, M. E., & González, A. G. (2013). Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte. *Revista Colombiana de Materiales*, 4, 30-39.
97. Valenzuela, M., Martínez, F., & Montañó, J. (2009). *México Patente nº PCT/MX2008/000138*.
98. Vargas, C., Navarro, P., & Aguayo, C. (2008). Adsorción de Au(CN)₂ en carbón activado. Efecto de variables y análisis mecanístico. *En Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales* (pág. 6). Argentina: Sociedad Argentina de Materiales. Obtenido de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET-SAM2008/pdfs/I2.pdf> (Enero, 2017)
99. Vargas, J. E., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2008). Obtención y caracterización de carbones activados a partir de semillas de mucuna sp. *Revista Colombiana de Química*, 37(1), 74.
100. Vázquez, E. (2005). *Materiales cerámicos: Propiedades, aplicaciones y elaboración* (Primera ed.). México: Colección CIDI.
101. Vázquez, E. C. (2005). *Materiales cerámicos: Propiedades, aplicaciones y elaboración*. México, México D. F.: Centro de Investigación de Diseño Industrial.
102. Vian, Á. (1998). *Introducción a la química industrial*. Barcelona, España: Reverté.

103. Vicentiz, J. L. (sf). *Esmaltes cerámicos: Fichas técnicas*. Obtenido de http://www.vicentiz.com/acrobat/info_parcial/esmaltes/esmaltes.pdf (Enero, 2017)
104. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los esmaltes* (Primera ed.). Barcelona, España: Reverté S.A.
105. Weller, B., Unnewehr, S., Tasche, S., & Härth, K. (2009). *Glass in building: Principles, applications, examples* (Primera ed.). Munich, Alemania: Detail.
106. Woodard, & Curran. (2006). *Industrial waste treatment handbook* (Segunda ed.). USA: Butterworth-Heinemann.
107. Yáñez, E. V. (2014). *Estudio de la dosificación de los óxidos de litio y de boro en función de la temperatura de maduración de un esmalte porcelánico elaborado para recubrir piezas de aluminio*. (Proyecto previo para la obtención del título de Ingeniería Química). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
108. Yang, T., & Lua, A. C. (2003). Characteristics of activated carbon prepared from pistachio-nut shells by physical activation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 267, 409-416. doi:10.1016/S0021-9797(03)00689-1
109. Yun, Y. H., & Bray, P. J. (1978). Nuclear magnetic resonance studies of the glasses in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 27, 372-376.
110. Zakery, A., & Elliott, S. R. (2007). *Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications* (Primera ed.). New York, USA: Springer.

ANEXOS

ANEXO I

FICHAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES UTILIZADOS

Ficha técnica # I.1

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de baja activación (CBA) y carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff (CAA)

Tipo de análisis: Dureza de carbones activados

Objetivo: Determinar la dureza de carbones activados de cuesco de palmiste

El carbón utilizado en las pruebas es un material de cuesco de palmiste pirolizado de bajo grado de activación ($< 200 \text{ m}^2/\text{g}$) y granulometría $-4,75 \text{ mm} +2,36 \text{ mm}$ (-malla #4 + malla #8). En cambio, el carbón activado de alta activación se utilizó con las mejores condiciones de impregnación.

Materiales y reactivos:

- Serie de tamices de diferentes aberturas (mallas #3, #4, #6, #8, #10, #14 y base receptora), marca USA Standard Sieve
- Agitador de tamices, marca ATM Arrow
- Balanza analítica de una cifra decimal, marca Mettler
- 15 bolas de acero de 1/2 pulg. y 15 bolas de acero de 3/8 pulg.
- Probeta graduada de 1 L, 10 mL

Procedimiento:

El procedimiento realizado se rige según la norma ASTM D-3802: *Standard test method for ball-pan hardness of activated carbon*, y la norma ecuatoriana NTE INEN 1989:1994: *Productos químicos industriales. Carbón activado para uso industrial. Determinación de la dureza*.

- Se pesó una muestra representativa de carbón activado de al menos 125 mL.

- Se tamizó la muestra por un periodo de 15 minutos en el agitador de tamices, utilizando las mallas indicadas anteriormente.
- Se descartó las fracciones de carbones que fueron mayores y menores de la granulometría utilizada. En este caso, se descartó carbón retenido en la malla #4 y el pasado de la malla #8.
- Se pesó 100 mL de carbón tamizado, utilizándose la fracción que tuvo el mayor porcentaje de muestra.
- Se colocó los 100 mL de carbón en la base receptora de tamices.
- Se adicionaron las 15 bolas de acero de 1/2 pulg. y 15 bolas de acero de 3/8 pulg. en la base receptora, junto con el carbón.
- Se tamizó el carbón con las bolas de acero en el agitador de tamices por un periodo de $30 \pm 0,5$ min. Para esto, se colocó los tamices libres de carbón encima de la base receptora.
- Terminado el tiempo de agitación, se retiraron las bolas de acero y se colocó el carbón en la malla de dureza. Se entiende por malla de dureza a la malla a la cual la abertura de la misma es la mitad de la granulometría del carbón inicial.
- Se tamizó el carbón en la malla de dureza por un periodo de 15 minutos.
- Se pesó el carbón retenido en la malla de dureza con la ayuda de una balanza analítica de mínimo una cifra decimal.
- Con el peso reportado, se realizó el cálculo de la dureza del carbón activado. Este cálculo se determinó mediante la utilización de la Ecuación Al.1:

$$H = \frac{B}{A} 100 \quad [\text{Al.1}]$$

Donde:

H: número de dureza (%)

B: peso retenido en la malla de dureza (g)

A: peso inicial del carbón utilizado (100 mL) (g)

Los ensayos de dureza para los carbones activados estudiados se reportan en las Tablas Al.1 y Al.2.

Tabla AI.1. Ensayo de dureza de carbón de bajo grado de activación

Malla/Masa (g)	CBA (1)	CBA (2)	CBA (PROM)
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	2,1	3,9	3,0
# 6	37,4	45,9	41,7
# 8	31,3	36,3	33,8
# 10	9,2	1,6	5,4
# 14	0,0	2,3	1,2
Fondo	0,0	1,1	0,6
Peso 100 cm ³	54,3	54,0	54,2
Malla dureza	14	14	14/16
Peso Retenido	49,1	49,2	49,2
Dureza (%)	90,4	91,1	90,8
		Desviación (±)	0,3

Tabla AI.2. Ensayo de dureza del carbón activado

Malla/Masa (g)	CAA (1)	CAA (2)	CAA (PROM)
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	0,0	0,0	0,0
# 6	39,9	30,4	35,2
# 8	34,2	23	28,6
# 10	3,4	1,7	2,6
# 14	0,0	0,0	0,0
Fondo	0,4	0,4	0,4
Peso 100 cm ³	43,6	44,3	44,0
Malla dureza	14	14	14
Peso Retenido	38,9	39,3	39,1
Dureza (%)	89,2	88,7	89,0
		Desviación (±)	0,3

Ejemplo de cálculo de la dureza de carbones activados

En este caso, se tomó como referencia los valores obtenidos en el ensayo de dureza del carbón de baja activación de la Tabla Al.I, con la utilización de la Ecuación Al.1:

$$H = \frac{B}{A} 100 = \frac{49,2}{54,2} 100 = 90,8 \%$$

Ficha técnica # I.2

Tipos de muestras: Carbón pirolizado de baja activación y carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff

Tipo de análisis: Índice de yodo de carbones activados

Objetivo: Determinar el índice de yodo de los carbones activados

La determinación del índice de yodo del carbón activado se realizó con el uso de la norma ASTM D4607: *Determination of iodine number of activated carbon*, y la norma ecuatoriana NTE INEN 1988:2013: *Productos químicos industriales. Carbón activado para uso industrial. Determinación del número de yodo*.

Materiales y reactivos:

- Solución de ácido clorhídrico al 5%
- Solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0,1 N, marca JT Baker, GR
- Solución estandarizada de yodo 0,1 N, marca Merck, GR
- Solución de almidón al 0,1 % en peso, marca Merck, GR
- Desecador
- Pulverizador de discos, marca Siebtechnik, modelo RE 1651
- Estufa, marca Memmert Instrumente, modelo UL 80

Procedimiento:

- Se pulverizó una muestra representativa de carbón activado hasta obtener una granulometría que represente al 95 % de la malla #325 ($d_p = 45\mu\text{m}$).
- Se secó el carbón pulverizado en una estufa a 110 °C por 2 horas y se dejó enfriar dentro de un desecador a temperatura ambiente. Todos los ensayos de índice de yodo fueron realizados con la mitad de cantidad de reactivos, con el fin de reducir el consumo de reactivos.
- Se colocó 0,5 g de carbón pulverizado en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, y se adicionó 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 0,5%.

- Se colocó el matraz en una plancha de calentamiento hasta que la mezcla presentó burbujas de ebullición. En ese momento, se calentó la muestra por 30 segundos, adicionalmente.
- Se retiró el matraz de la plancha de calentamiento y se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- Se adicionó 50 mL de solución de yodo 0,1 N y se agitó vigorosamente por 30 segundos.
- Se filtró el contenido del matraz en un papel filtro cuantitativo, se descartó los primeros 10 a 15 mL y se recolectó los restantes.
- Se tomó una alícuota de 25 mL del filtrado y se tituló con una solución de tiosulfato de sodio 0,1 N. La titulación se realizó hasta el instante que la solución tomó una coloración amarilla clara.
- Se adicionó 1 mL de solución de almidón (indicador), se agitó el contenido y se tituló con la misma solución de tiosulfato de sodio. La titulación llega a su fin cuando la solución torna de una coloración obscura a transparente.
- Se reportó el volumen gastado de tiosulfato de sodio. A ese volumen se multiplicó por dos para reportar el valor real de tiosulfato gastado.

La determinación del número o índice de yodo se realizó mediante el uso de las Ecuaciones Al.2, Al.3 y Al.4:

$$I_n = \frac{X}{M} A \quad [Al.2]$$

Donde:

I_n : número de yodo (mg/g)

X: los miligramos de yodo adsorbidos por el carbón activado (mg)

M: masa de carbón utilizado (g)

A: factor de corrección que depende de la normalidad del filtrado (N_r):

$$N_r = \frac{N_2}{50} V \quad [Al.3]$$

$$X = 12\,693N_1 - 279,246N_2V \quad [Al.4]$$

Donde:

N_r : normalidad del filtrado (N)

N_1 : normalidad de la solución de yodo (N)

N_2 : normalidad de la solución de tiosulfato de sodio (N)

V: volumen de la solución de tiosulfato de sodio (mL)

El valor de la normalidad del residuo debe estar entre 0,008 y 0,0334 para aplicar el factor de corrección (A); caso contrario, se debe utilizar otro peso de carbón activado. La Tabla AI.3 presenta los valores del factor de corrección de la ecuación de determinación del número de yodo. Este factor se determina con el ingreso del valor de la normalidad del residuo (N_r) en la tabla presentada a continuación:

Tabla AI.3. Factor de corrección para la determinación del índice de yodo

NORMALIDAD DEL FILTRADO RESIDUAL, C	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009
0,0080	1,1625	1,1613	1,1600	1,1575	1,1550	1,1538	1,1513	1,1500	1,1475	1,1463
0,0090	1,1438	1,1425	1,1400	1,1375	1,1363	1,1350	1,1325	1,1300	1,1268	1,1275
0,0100	1,1250	1,1238	1,1225	1,1213	1,1200	1,1175	1,1163	1,1150	1,1138	1,1113
0,0110	1,1100	1,1088	1,1075	1,1063	1,1038	1,1025	1,1000	1,0988	1,0975	1,0963
0,0120	1,0950	1,0938	1,0925	1,0900	1,0888	1,0875	1,0863	1,0850	1,0838	1,0825
0,0130	1,0800	1,0788	1,0775	1,0763	1,0750	1,0738	1,0725	1,0713	1,0700	1,0688
0,0140	1,0675	1,0663	1,0650	1,0625	1,0613	1,0600	1,0588	1,0575	1,0563	1,0550
0,0150	1,0538	1,0525	1,0513	1,0500	1,0488	1,0475	1,0463	1,0450	1,0438	1,0425
0,0160	1,0413	1,0400	1,0388	1,0375	1,0375	1,0363	1,0350	1,0333	1,0325	1,0313
0,0170	1,0300	1,0288	1,0275	1,0263	1,0250	1,0245	1,0238	1,0225	1,0208	1,0200
0,0180	1,0200	1,0188	1,0175	1,0163	1,0150	1,0144	1,0138	1,0125	1,0125	1,0113
0,0190	1,0100	1,0088	1,0075	1,0075	1,0063	1,0050	1,0050	1,0038	1,0025	1,0025
0,0200	1,0013	1,0000	1,0000	0,9988	0,9975	0,9975	0,9963	0,9950	0,9950	0,9938
0,0210	0,9938	0,9925	0,9925	0,9913	0,9900	0,9900	0,9888	0,9875	0,9875	0,9863
0,0220	0,9863	0,9850	0,9850	0,9838	0,9825	0,9825	0,9813	0,9813	0,9800	0,9788
0,0230	0,9788	0,9775	0,9775	0,9763	0,9763	0,9750	0,9750	0,9738	0,9738	0,9725
0,0240	0,9725	0,9708	0,9700	0,9700	0,9688	0,9688	0,9675	0,9675	0,9663	0,9663
0,0250	0,9650	0,9650	0,9638	0,9638	0,9625	0,9625	0,9613	0,9613	0,9606	0,9600
0,0260	0,9600	0,9588	0,9588	0,9575	0,9575	0,9563	0,9563	0,9550	0,9550	0,9538
0,0270	0,9538	0,9525	0,9525	0,9519	0,9513	0,9513	0,9506	0,9500	0,9500	0,9488
0,0280	0,9488	0,9475	0,9475	0,9463	0,9463	0,9463	0,9450	0,9450	0,9438	0,9438
0,0290	0,9425	0,9425	0,9425	0,9413	0,9413	0,9400	0,9400	0,9394	0,9388	0,9388
0,0300	0,9375	0,9375	0,9375	0,9363	0,9363	0,9363	0,9363	0,9350	0,9350	0,9346
0,0310	0,9333	0,9333	0,9325	0,9325	0,9325	0,9319	0,9313	0,9213	0,9300	0,9300
0,0320	0,9300	0,9294	0,9288	0,9288	0,9280	0,9275	0,9275	0,9275	0,9270	0,9270
0,0330	0,9263	0,9263	0,9257	0,9250	0,9250					

(NTE INEN 1988:94, 1995, p. 6)

Ejemplo de cálculo del índice de yodo de carbones activados

Con los datos de la Tabla AI.5 y el uso de las ecuaciones AI.2, AI.3 y AI.4 y la Tabla AI.3, se determinó el índice de yodo del carbón activado.

$$N_r = \frac{N_2}{50} V = \frac{0,1}{50} 13,4 = 0,0268$$

Con el valor de $N_r = 0,0268$; se encontró el valor del factor de corrección (A) en la Tabla AI.3. El valor correspondiente de A es igual a 0,9550.

$$X = 12\,693N_1 - 279,246N_2V = 12\,693(0,1) - 279,246(0,1)(13,4) = 895,11$$

$$I_n = \frac{X}{M} A = \frac{895,11}{1} 0,955 = 852 \frac{mg\ I_2}{g}$$

Tabla AI.4. Ensayos de índice de yodo del carbón de baja activación

Parámetro	CBA (1)	CBA (2)	CBA (PROM)
Masa carbón experimental (g)	2	2	2
Masa carbón real (g)	4	4	4
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	7,9	8,1	8
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ real (mL)	15,8	16,2	16
Índice de yodo (mg I₂/g)	192,8	189,5	191,2
		Desviación (±)	1,7

Tabla AI.5. Ensayos del índice de yodo del carbón activado

Parámetro	CAA (1)	CAA (2)	CAA (PROM)
Masa carbón experimental (g)	0,5	0,5	0,5
Masa carbón real (g)	1	1	1
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	6,7	6,8	6,75
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ real (mL)	13,4	13,6	13,5
Índice de yodo (mg I₂/g)	852	845	848,5
		Desviación (±)	3,5

Ficha técnica # I.3

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff

Tipo de análisis: Humedad de carbones activados

Objetivo: Determinar la humedad del carbón activado

Tabla AI.6. Ensayo de determinación de humedad del carbón activado

Carbón	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol+muestra (g)	Peso muestra seca (g)	Humedad (%)
CAA (1)	26,0318	0,9942	27,0260	26,9658	6,06
CAA (2)	24,0408	0,9926	25,0334	24,9735	6,03
CAA (PROM)	25,0363	0,9934	26,0297	25,9697	6,04
				Desviación (±)	0,01

Ejemplo de cálculo de la humedad del carbón activado

La humedad se determinó con los datos presentados en la Tabla AI.6 con el uso de la Ecuación 2.3:

$$M = \frac{C - D}{C - B} 100 = \frac{27,0260 - 26,9658}{27,0260 - 26,0318} 100 = 6,06 \%$$

Ficha técnica # I.4

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff

Tipo de análisis: Material volátil de carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de material volátil del carbón activado

Tabla AI.7. Ensayo de determinación de materia volátil del carbón activado

Carbón	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol+muestra (g)	Peso muestra seca (g)	Peso muestra sin volátiles (g)	Volátiles (%)
CAA (1)	26,0318	0,9942	27,0260	26,9658	26,8831	14,37
CAA (2)	24,0408	0,9926	25,0334	24,9735	24,8893	14,52
CAA (PROM)	25,0363	0,9934	26,0297	25,9697	25,8862	14,45
Desviación (±)						0,07

Ejemplo de cálculo de la materia volátil del carbón activado

La materia volátil se determinó con los datos de la Tabla AI.7 con el uso de la Ecuación 2.4:

$$V = \frac{C - D}{C - B} 100 = \frac{27,0260 - 26,8831}{27,0260 - 19,6402} 100 = 14,37 \%$$

Ficha técnica # I.5

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff

Tipo de análisis: Contenido total de cenizas y carbón fijo en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje total de cenizas y carbón fijo del carbón activado

Tabla AI.8. Ensayo de determinación de contenido de total de cenizas y carbón fijo del carbón activado

Carbón	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol + muestra (g)	Peso muestra seca (g)	Peso muestra sin volátiles (g)	Peso muestra cenizas (g)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
CAA (1)	26,0318	0,9942	27,026	26,9658	26,8831	26,0834	5,19	80,44
CAA (2)	24,0408	0,9926	25,0334	24,9735	24,8893	24,0926	5,22	80,26
CAA (PROM)	25,0363	0,9934	26,0297	25,9697	25,8862	25,0880	5,20	80,35
Desviación (±)							0,01	0,09

Ejemplo de cálculo del contenido de cenizas y carbón fijo del carbón activado

El contenido total de cenizas se determinó con la Ecuación 2.5 con el uso de los datos de la Tabla AI.8:

$$A = \frac{D - B}{C - B} 100 = \frac{26,0834 - 26,0318}{27,0260 - 19,6402} 100 = 24,58 \%$$

El porcentaje de carbón fijo se determinó con la ecuación 2.6 con el uso de los datos de la Tabla AI.8:

$$CF = 100 - A - V = 100 - 5,19 - 14,37 = 80,44 \%$$

Ficha técnica # I.6

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herrshoff

Tipo de ensayo: Cinética de adsorción de oro en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de recuperación de oro con la utilización del carbón activado

CONDICIONES

Volumen solución cianuro-oro:	100 mL
Concentración solución cianuro-oro:	10 mg/L
pH trabajo:	10,5
Masa de carbón:	0,5 g

El porcentaje de recuperación de oro se cuantifica por diferencia de concentración del metal presente en la solución sintética. Este valor representa el porcentaje de oro adsorbido por el carbón activado. Las Ecuaciones asociadas a este proceso son Al.5 y Al.6:

$$\% Au sol. = \frac{mg Au (t)}{mg Au (t_0)} * 100 \quad [Al.5]$$

$$\% Au CA = 100 - \% Au sol. \quad [Al.6]$$

Donde:

% Au sol.: porcentaje de oro en solución

% Au CA: porcentaje de oro en carbón activado

mg Au (t): miligramos de oro en solución al tiempo t

mg Au (t₀): miligramos de oro en solución al tiempo inicial (0 min)

Tabla AI.9. Ensayos de cinética de adsorción de oro en el carbón activado ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)

Tiempo (min)	Masa carbón (g)	Concentración Au (mg/L)	Porcentaje Au en solución (%)	Porcentaje Au en carbón (%)
0	-	11,25	100,00	0,00
15	0,50	6,87	61,07	38,93
30	0,51	5,08	45,16	54,84
60	0,52	2,72	24,18	75,82
120	0,52	0,5	4,44	95,56
180	0,51	0,26	2,31	97,69

Ejemplo de cálculo del porcentaje de recuperación de oro en el carbón activado

Los porcentajes de oro en solución y de oro adsorbido se calcularon con las Ecuaciones AI.5 y AI.6.

$$\% Au sol. = \frac{6,87 \text{ mg Au}}{11,25 \text{ mg Au}} * 100 = 61,07 \%$$

$$\% Au CA = 100 - 61,07 = 38,93 \%$$

ANEXO II
FICHAS TÉCNICAS DE IMPREGNACIÓN DE VIDRIO EN
CARBONES UTILIZANDO COMO FUENTE DE SÍLICE
METASILICATO DE SODIO PENTAHIDRATADO

Ficha técnica # II.1

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de la impregnación de la cantidad de carga fundente en el carbón para mejorar sus propiedades mecánicas

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato: 100 mL

Volumen solución tetraborato: 200 mL

Velocidad de agitación: 600 rpm

Temperatura de impregnación: 90 °C

Tiempo de impregnación: 1 h

Secado

Temperatura de secado: 110 °C

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión: 950 °C

Tiempo de fusión: 3 h

Lavado

Velocidad de lavado: 600 rpm

Tiempo de lavado: 15 min

Tabla AII.1. Ensayos de determinación de la cantidad de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C y t= 3 h)

Carga fundente	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3	CBAVS4	CBAVS5
Masa Metasilicato (g)	7,51	15,03	22,53	30,00	37,50
Masa Bórax (g)	2,50	5,03	7,53	10,03	12,52
Masa total carga (g)	10,01	20,06	30,06	40,03	50,02
Masa Carbón (g)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ensayos de dureza					
Malla/Masa (g)	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3	CBAVS4	CBAVS5
Masa compósito (g)	71,3	73,4	76,6	81,5	90,2
# 3	0,0	0,0	0,0	0,8	2,0
# 4	0,9	1,5	2,8	8,2	16,9
# 6	24,8	25,6	28,9	30,6	38,7
# 8	37,7	37,3	34,8	31,1	22,0
# 10	6,4	6,8	6,4	7,3	5,3
# 14	0,3	0,3	0,9	1,9	2,3
Fondo	1,5	1,8	2,3	1,7	3,3
Peso 100 cm ³ (g)	53,6	52,9	53,6	54,3	51,8
Malla dureza (#)	16	16	16	16	14
Peso Retenido (g)	50,4	50,2	51,1	52,4	50,8
Dureza (%)	94,0	94,9	95,3	96,5	98,1

CBAVS: Compósito carbón de baja activación-vidrio sales fundentes

Ejemplo de cálculo de la humedad ligada a las sales hidratadas

Con la composición de la carga fundente se determina el agua de hidratación de las sales fundentes. En la Tabla II.2 se presentan los valores de los porcentajes de

los compuestos constituyentes de las sales fundentes. Adicionalmente se presenta la humedad total de la carga fundente.

Tabla AII.2. Composición química de la carga fundente constituida de 75 % $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y 25 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Compuesto	Composición (%)	Óxido	Factor gravimétrico	% Peso
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	75	SiO_2	2,73	27,47
		Na_2O	2,65	28,30
		H_2O	-	19,23
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	25	B_2O_3	2,74	9,12
		Na_2O	6,14	4,07
		H_2O	-	11,80
			Total	100,00
			H_2O total	31,03

$$\% \text{SiO}_2 \text{ en } \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{\% \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}{\text{Factor gravimétrico } \text{SiO}_2} = \frac{75 \%}{2,73} = 27,47 \%$$

$$\begin{aligned} \% \text{H}_2\text{O} \text{ en } \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} &= \% \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - \% \text{SiO}_2 - \% \text{Na}_2\text{O} = 75 - 27,47 - 28,30 \\ &= 19,23 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{H}_2\text{O} \text{ total} &= \% \text{H}_2\text{O} \text{ en } \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \% \text{H}_2\text{O} \text{ en } \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = 19,23 + 11,80 \\ &= 31,03 \% \end{aligned}$$

Ejemplo de cálculo del porcentaje de agua ligada a las sales fundentes y de las pérdidas totales

Con el porcentaje del agua total presente en la carga fundente, se determina el porcentaje de agua en cada masa de cargas fundentes utilizadas en la impregnación. Las pérdidas totales se determinaron con la masa final de cada compósito con respecto a la masa inicial de las materias primas utilizadas. En la Tabla II.3, se muestran los porcentajes de humedad de cada carga fundente y las pérdidas totales obtenidas para cada compósito.

Tabla AII.3. Porcentaje de humedad de las cargas fundentes y pérdidas totales en la producción de compósitos carbón-vidrio sales fundentes

Compósito	Carga fundente (%)	Humedad (%)	Pérdida total (%)
CBAVS1	9,1	2,8	35,2
CBAVS2	16,7	5,2	38,9
CBAVS3	23,1	7,2	41,1
CBAVS4	28,6	8,9	41,8
CBAVS5	33,3	10,3	39,9

$$\begin{aligned} \% \text{ Carga fundente en CBAVS1} &= \frac{\text{Masa carga fundente} * 100}{\text{Masa carbón} + \text{carga fundente}} = \frac{10 \text{ g} * 100}{100 \text{ g} + 10 \text{ g}} \\ &= 9,1 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ humedad en CBAVS1} &= \frac{\% \text{ Carga fundente} * \% \text{ Humedad carga fundente}}{100} \\ &= 9,1 \% * \frac{31,03 \%}{100} = 2,8 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Pérdida total en CBAVS1} &= \frac{\text{masa carbón} + \text{masa carga fundente} - \text{masa compósito}}{\text{masa carbón} + \text{masa carga fundente}} * 100 \\ &= \frac{100 + 10 - 71,3}{100 + 10} * 100 = 35,2 \% \end{aligned}$$

Ficha técnica # II.2

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de la temperatura de fusión y de la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato:	100 mL
Volumen solución tetraborato:	200 mL
Masa carga fundente:	50 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Temperatura de impregnación:	90 °C
Tiempo de impregnación:	1 h

Secado

Temperatura de secado:	110 °C
------------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión:	900 °C
Tiempo de fusión:	3 h

Lavado

Velocidad de lavado:	600 rpm
Tiempo de lavado:	15 min

Tabla AII.4. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 900 °C, t= 3 h y CF= 50 g)

Carga fundente	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3
Masa Metasilicato (g)	37,50	25,03	12,51
Masa Bórax (g)	12,51	25,03	37,50
% Metasilicato	75,00	50,00	25,00
Masa carbón (g)	100,0	100,0	100,0
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3
Masa compuesto (g)	89,5	92,1	85,8
# 3	0,9	2,6	0,0
# 4	20,7	22,7	1,3
# 6	39,1	37,3	37,5
# 8	21,2	19,3	37,3
# 10	4,1	4,8	7,3
# 14	1,4	2,5	0,7
Fondo	2,7	3,4	2,2
Peso 100 cm ³	54	51,4	55,4
Malla dureza (#)	14	14	16
Peso Retenido	52,1	49,5	53,3
Dureza (%)	96,5	96,3	96,2

CF: cantidad de carga fundente

Ficha técnica # II.3

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de la temperatura de fusión y de la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato:	100 mL
Volumen solución tetraborato:	200 mL
Masa carga fundente:	50 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Temperatura de impregnación:	90 °C
Tiempo de impregnación:	1 h

Secado

Temperatura de secado:	110 °C
------------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión:	950 °C
Tiempo de fusión:	3 h

Lavado

Velocidad de lavado:	600 rpm
Tiempo de lavado:	15 min

Tabla AII.5. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C, t= 3 h y CF= 50 g)

Carga fundente	CBAVS4	CBAVS5	CBAVS6
Masa Metasilicato (g)	37,52	25,00	12,50
Masa Bórax (g)	12,50	25,03	37,50
% Metasilicato	75	50	25
Masa carbón (g)	100,0	100,0	100,0
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAVS4	CBAVS5	CBAVS6
Masa compuesto (g)	90,2	85,1	86,6
# 3	2,0	1,1	0,0
# 4	16,9	15,6	2,7
# 6	38,7	34,6	36,1
# 8	22,0	22,9	34,0
# 10	5,3	5,8	7,8
# 14	2,3	2,9	3,4
Fondo	3,3	2,8	2,9
Peso 100 cm ³	51,8	53,8	56,5
Malla dureza (#)	14	14	14
Peso Retenido	50,8	52,4	54,6
Dureza (%)	98,1	97,4	96,6

Ficha técnica # II.4

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de la temperatura de fusión y de la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato:	100	mL
Volumen solución tetraborato:	200	mL
Masa carga fundente:	50	g
Velocidad de agitación:	600	rpm
Temperatura de impregnación:	90	°C
Tiempo de impregnación:	1	h

Secado

Temperatura de secado:	110	°C
------------------------	-----	----

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión:	1 000	°C
Tiempo de fusión:	3	h

Lavado

Velocidad de lavado:	600	rpm
Tiempo de lavado:	15	min

Tabla AII.6. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión y de la composición de carga fundente impregnada en carbón activado ($T= 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, $t= 3\ \text{h}$ y $\text{CF}= 50\ \text{g}$)

Carga fundente	CBAVS7	CBAVS8	CBAVS9
Masa Metasilicato (g)	37,53	25,01	12,52
Masa Bórax (g)	12,52	25,00	37,51
% Metasilicato	75,00	50,00	25,00
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAVS7	CBAVS8	CBAVS9
Masa compósito (g)	91,4	91,8	88,2
# 3	0,3	0,2	0,0
# 4	15,8	11,8	3,1
# 6	40,9	41	39,5
# 8	24,0	28,7	34,3
# 10	4,9	5,7	7,2
# 14	3,0	23,0	1,6
Fondo	3,1	2,1	2,4
Peso 100 cm ³	54,9	54,6	58
Malla dureza (#)	14	14	14
Peso Retenido	53,7	52,7	54,8
Dureza (%)	97,8	96,5	94,5

Ficha técnica # II.5

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia del tiempo de fusión de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato:	100 mL
Volumen solución tetraborato:	200 mL
Masa carga fundente:	50 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Temperatura de impregnación:	90 °C
Tiempo de impregnación:	1 h

Secado

Temperatura de secado:	110 °C
------------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión:	950 °C
------------------------	--------

Lavado

Velocidad de lavado:	600 rpm
Tiempo de lavado:	15 min

Tabla AII.7. Ensayos de determinación del tiempo de fusión de la carga fundente impregnada en carbón activado (T= 950 °C, CF= 50 g y 75% Na₂SiO₃·5H₂O)

Carga fundente	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3
Masa Metasilicato (g)	37,52	37,50	37,50
Masa Bórax (g)	12,51	12,50	12,50
Masa carbón (g)	100,00	100,00	100,00
Tiempo de fusión (h)	1	2	3
Masa carbón + carga fund. (g)	150,03	150,00	150,00
Masa impregnado seco (g)	128,4	126,8	126,5
Masa fundida sin lavar (g)	108,7	105,9	99,6
Masa fundida lavado (g)	100,0	94,3	90,2
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAVS1	CBAVS2	CBAVS3
# 3	0,0	1,2	2,0
# 4	0,0	7,4	16,9
# 6	66,8	42,7	38,7
# 8	19,1	30,5	22,0
# 10	4,9	5,2	5,3
# 14	4,1	4,2	2,3
Fondo	5,9	3,1	3,3
Peso 100 cm ³	54,1	52,9	51,8
Malla dureza (#)	14	14	14
Peso Retenido	53,4	52,0	50,8
Dureza (%)	98,7	98,3	98,1

Ficha técnica # II.6

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herreshoff

Tipo de ensayo: Impregnación de sales fundentes en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de los parámetros estudiados en la impregnación de la carga fundente en el carbón activado

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución metasilicato:	100 mL
Volumen solución tetraborato:	200 mL
Masa carga fundente:	50 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Temperatura de impregnación:	90 °C
Tiempo de impregnación:	1 h

Secado

Temperatura de secado:	110 °C
------------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión:	950 °C
Tiempo de fusión:	1 h

Lavado

Velocidad de lavado:	600 rpm
Tiempo de lavado:	15 min

Tabla AII.8. Impregnación de sales fundentes en carbón activado con las mejores condiciones (T= 950 °C, CF= 50 g, 75% Na₂SiO₃·5H₂O y t= 1 h)

Carga fundente	CAVS (1)*	CAVS (2)*	CAVS (PROM)
Masa Metasilicato (g)	100,0	100,0	100,0
Masa Bórax (g)	37,5	37,5	37,5
Masa carbón (g)	12,5	12,5	12,5
Tiempo impregnación (h)	1	1	1
Masa carbón + carga fund. (g)	150,0	150,0	150,0
Masa impregnado seco (g)	124,9	134,2	129,6
Masa fundida sin lavar (g)	116,5	119,8	118,2
Masa fundida lavado (g)	113,8	110,9	112,4
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CAVS (1)	CAVS (2)	CAVS(PROM)
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	0,0	0,0	0,0
# 6	52,2	51,5	51,9
# 8	52,2	50,7	51,5
# 10	5,2	5,2	5,2
# 14	1,4	0,0	0,7
Fondo	3,4	4,5	4,0
Peso 100 cm ³	60,2	56,0	58,1
Malla dureza (#)	16	14	14/16
Peso Retenido	59,1	54,9	57,0
Dureza (%)	98,2	98,0	98,1
		Desviación (±)	0,07
Ensayos de índice de yodo			
Parámetro	CAV (1)	CAV (2)	CAV (PROM)
Masa carbón experimental (g)	1,0	1,0	1,0
Masa carbón real (g)	2,0	2,0	2,0
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	6,3	6,7	6,5
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ real (mL)	12,6	13,4	13,0
Índice de yodo (mg I₂/g)	441,0	498,0	469,5
		Desviación (±)	28,5

* (1)y (2) representan los ensayos realizados por duplicados.

Ejemplo de cálculo de la determinación de la fracción de coordinaciones tetraédricas de boro (BO_4^+)

En los reportes presentados a continuación se expresan: los porcentajes en peso de las cargas fundentes utilizando las sales de silicio y boro, porcentajes en peso húmedo y seco, porcentaje molar húmedo y seco.

El cálculo de moles se efectuó con 100 g de cada composición de carga.

Composición 1

Tabla AII.9. Composición química de la carga fundente constituida por 75 % metasilicato y 25 % bórax

Compuesto	Composición (%)						
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	75						
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	25						
Compuesto	Factor gravimétrico	% Peso húmedo	No. moles húmedo	% Molar húmedo	No. moles vidrio	% Molar seco	% Peso seco
SiO_2	2,73	27,47	0,46	16,15	0,46	41,21	39,83
B_2O_3	2,74	9,12	0,13	4,62	0,13	11,80	13,23
Na_2O (metasilicato)	2,65	28,30	0,46	16,10	0,46	41,08	41,03
Na_2O (bórax)	6,14	4,07	0,07	2,32	0,07	5,91	5,90
H_2O	-	31,03	1,72	60,81	-	-	-
	Total	100,00	2,83	100,00	1,11	100	100
					$\text{R}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ (R)	4,0	
					$\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ (K)	3,5	
					$\text{R}_{\text{máx}}$	0,71	
					N_4	0,53	

$$\% \text{ peso húmedo óxido} = \frac{\% \text{ compuesto}}{\text{factor gravimétrico óxido}}$$

[AII.1]

$$\% \text{ peso húmedo } SiO_2 = \frac{75 \% Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O}{2,73} = 27,47 \% SiO_2$$

$$\text{No. moles húmedo óxido} = \frac{\text{masa compuesto} \cdot \% \text{ peso húmedo óxido}}{\text{Peso molecular óxido}} \quad [AII.2]$$

$$\text{No. moles húmedo } SiO_2 = \frac{100 \text{ g} \cdot 0,2747}{60 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,46 \text{ moles } SiO_2$$

$$\% \text{ molar húmedo óxido} = \frac{\text{moles óxido}}{\text{moles totales}} \cdot 100 \quad [AII.3]$$

$$\% \text{ molar húmedo } SiO_2 = \frac{0,46}{2,83} \cdot 100 = 16,15 \% SiO_2$$

$$R = \frac{R_2O}{B_2O_3} = \frac{41,08 + 5,91}{11,80} = 4,0$$

$$K = \frac{SiO_2}{B_2O_3} = \frac{41,21}{11,80} = 3,5$$

Para el cálculo de $R_{\text{máx}}$, se tomó de referencia valores experimentales de $R_{\text{máx}}$ vs K .

Tabla AII.10. Datos bibliográficos de relaciones de $R_{\text{máx}}$ y de SiO_2/B_2O_3

K	$R_{\text{máx}}$
0	0,50
0,5	0,55
1	0,60
2	0,65
3	0,70

(Yun y Bray, 1978, pp. 372-376)

Se graficaron los datos de la tabla anterior para determinar la ecuación que vincula estas dos variables. Los resultados se presentan en la Figura AII.1.

Para $K=3,5$

$$R_{\text{máx}} = -0,0125 \cdot 3,5^2 + 0,1025 \cdot 3,5 + 0,5023 = 0,71$$

$$N_4 = R_{\text{máx}} - \frac{0,25}{1+K} (R - R_{\text{máx}}) \quad [AII.4]$$

$$N_4 = 0,71 - \frac{0,25}{1 + 3,5} (4 - 0,71) = 0,53$$

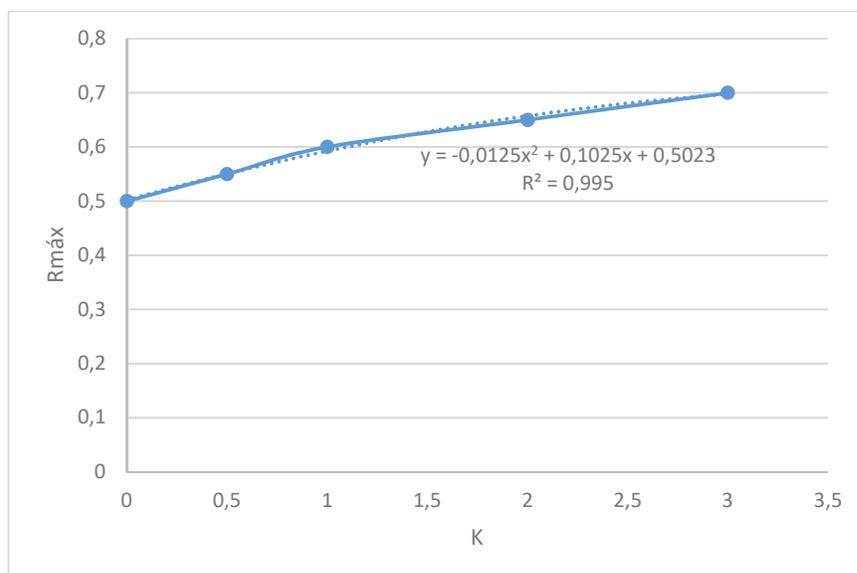


Figura AII.1. Representación de valores de Rmáx vs K

Composición 2

Tabla AII.11. Composición química de la carga fundente constituida por 50 % metasilicato y 50 % bórax

Compuesto	Composición (%)						
Na ₂ SiO ₃ *5H ₂ O	50						
Na ₂ B ₄ O ₇ *10H ₂ O	50						
Compuesto	Factor gravimétrico	% Peso húmedo	No. moles húmedo	% Molar húmedo	No. moles vidrio	% Molar seco	% Peso seco
SiO ₂	2,73	18,32	0,31	10,09	0,31	30,43	28,81
B ₂ O ₃	2,74	18,25	0,26	8,66	0,26	26,13	28,70
Na ₂ O (metasilicato)	2,65	18,87	0,30	10,05	0,30	30,34	29,68
Na ₂ O (bórax)	6,14	8,14	0,13	4,34	0,13	13,09	12,81
H ₂ O	-	36,43	2,02	66,86	-	-	-
	Total	100,00	3,03	100,00	1,00	100	100
					R₂O/B₂O₃ (R)	1,7	
					SiO₂/B₂O₃ (K)	1,2	
					Rmáx	0,60	
					N₄	0,48	

Composición 3

Tabla AII.12. Composición química de la carga fundente constituida por 25 % metasilicato y 75 % bórax

Compuesto	Composición (%)						
Na ₂ SiO ₃ *5H ₂ O	25						
Na ₂ B ₄ O ₇ *10H ₂ O	75						
Compuesto	Factor gravimétrico	% Peso húmedo	No. moles húmedo	% Molar húmedo	No. moles vidrio	% Molar seco	% Peso seco
SiO ₂	2,73	9,16	0,15	4,74	0,15	17,05	15,74
B ₂ O ₃	2,74	27,37	0,39	12,22	0,39	43,93	47,05
Na ₂ O (metasilicato)	2,65	9,43	0,15	4,73	0,15	17,00	16,22
Na ₂ O (bórax)	6,14	12,21	0,20	6,12	0,20	22,01	21,00
H ₂ O	-	41,82	2,32	72,19	-	-	-
	Total	100,00	3,22	100,00	0,89	100	100
					R₂O/B₂O₃ (R)	0,9	
					SiO₂/B₂O₃ (K)	0,4	
					R_{máx}	0,54	
					N₄	0,48	

Determinación de la temperatura de fusión de las cargas fundentes utilizadas en la impregnación de sales fundentes

Con los porcentajes en peso de los óxidos constituyentes del vidrio, se ingresaron estos valores en el diagrama ternario SiO₂-B₂O₃-Na₂O y se determinó la temperatura aproximada de fusión de las cargas fundentes. La Figura AII.1 muestra las composiciones de cargas fundentes ingresadas en el diagrama ternario para vidrio borosilicatos de sodio.

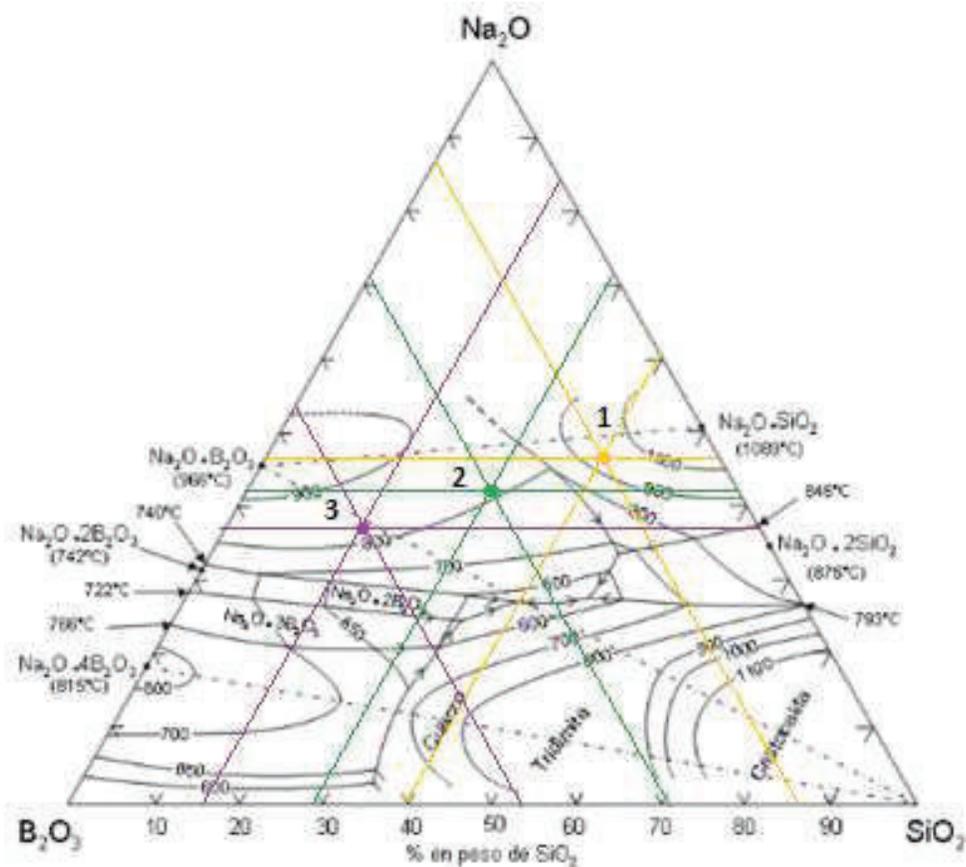


Figura AII.2. Diagrama ternario del sistema $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ con las composiciones de las cargas fundentes para la impregnación de sales

Los puntos 1, 2 y 3 representan las composiciones de carga fundentes que conforman los vidrios obtenidos a partir de las sales de metasilicato y tetraborato. En la Tabla AII.13, se presentan las temperaturas de fusión de las cargas fundentes de las composiciones de vidrio estudiadas.

Tabla AII.13. Temperatura de fusión de los vidrios obtenidos con las composiciones de las sales fundentes

Punto	% $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Temperatura fusión (°C)
1	75	25	930
2	50	50	810
3	25	75	830

ANEXO III
FICHAS TÉCNICAS DE IMPREGNACIÓN DE VIDRIO EN
CARBONES UTILIZANDO COMO FUENTE DE SÍLICE VIDRIO DE
BOTELLAS RECICLADAS

Ficha técnica # III.1

Tipo de muestra: Vidrio de botellas recicladas

Tipo de ensayo: Fluorescencia de rayos X

Objetivo: Determinar la composición elemental y química del vidrio reciclado

Análisis químico por fluorescencia de rayos X S8 Tiger y el programa Spectra Pluss. Se preparó la perla con 0,5 g de muestra con 7 g del fundente. Se realizó un barrido de la muestra para determinar sus composiciones. Los resultados del equipo se reportaron elementalmente, y el programa realiza el cálculo para expresarse las composiciones en forma de óxidos.

Tabla AIII.1. Resultados del análisis de fluorescencia de rayos X del vidrio reciclado

Elemento	Composición (% p/p)	Componente	Composición (% p/p)
Si	31,29	SiO ₂	66,94
Na	3,17	Na ₂ O	4,28
Al	1,27	Al ₂ O ₃	2,41
K	0,64	K ₂ O	0,77
Ca	0,56	CaO	0,79
P	0,03	P ₂ O ₅	0,06
		Pérdidas por calcinación	0,01
Total	36,96	-	75,26

Determinación de la composición de las cargas fundentes utilizadas en la impregnación de vidrio reciclado

La determinación de las composiciones de cada una de las cargas fundentes se efectuó con el mismo procedimiento realizado con las sales fundentes. En las Tablas AIII.2, AIII.3 y AIII.4, presentan los resultados de las composiciones de las cargas fundentes con los diferentes porcentajes de bórax.

Tabla AIII.2. Composición química de la carga fundente constituida por 95 % vidrio reciclado y 5 % bórax

Componente	Composición (%)						
Vidrio	95						
Bórax	5						
Componente	Factor gravimétrico	% peso	Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
B ₂ O ₃	2,74	1,82	SiO ₂	63,59	60,00	1,060	87,68
Na ₂ O	6,14	0,81	Al ₂ O ₃	2,29	101,96	0,022	1,86
H ₂ O	-	2,36	B ₂ O ₃	1,82	69,62	0,026	2,17
			Na ₂ O (vidrio)	4,07	62,00	0,066	5,43
			Na ₂ O (bórax)	0,81	62,00	0,013	1,09
			CaO	0,75	56,00	0,013	1,11
			K ₂ O	0,73	94,20	0,008	0,64
			P ₂ O ₅	0,06	141,94	0,000	0,03
			Total	74,13	-	1,209	100,00

Tabla AIII.3. Composición química de la carga fundente constituida por 90 % vidrio reciclado y 10 % bórax

Componente	Composición (%)						
Vidrio	90						
Bórax	10						
Componente	Factor gravimétrico	% peso	Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
B ₂ O ₃	2,74	3,65	SiO ₂	60,25	60,00	1,004	84,62
Na ₂ O	6,14	1,63	Al ₂ O ₃	2,17	101,96	0,021	1,79
H ₂ O	-	4,72	B ₂ O ₃	3,65	69,62	0,052	4,42
			Na ₂ O (vidrio)	3,85	62,00	0,062	5,24
			Na ₂ O (bórax)	1,63	62,00	0,026	2,21
			CaO	0,71	56,00	0,013	1,07
			K ₂ O	0,69	94,20	0,007	0,62
			P ₂ O ₅	0,05	141,94	0,000	0,03
			Total	73,00	-	1,187	100,00

Tabla AIII.4. Composición química de la carga fundente constituida por 80 % vidrio reciclado y 20 % bórax

Componente	Composición (%)						
Vidrio	80						
Bórax	20						
Componente	Factor gravimétrico	% peso	Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
Vidrio	-	-	SiO ₂	53,55	60,00	0,893	78,14
Bórax	-	-	Al ₂ O ₃	1,93	101,96	0,019	1,66
B ₂ O ₃	2,74	7,30	B ₂ O ₃	7,30	69,62	0,105	9,18
Na ₂ O	6,14	3,26	Na ₂ O (vidrio)	3,42	62,00	0,055	4,83
H ₂ O	-	9,44	Na ₂ O (bórax)	3,26	62,00	0,053	4,60
			CaO	0,63	56,00	0,011	0,99
			K ₂ O	0,62	94,20	0,007	0,57
			P ₂ O ₅	0,05	141,94	0,000	0,03
			Total	70,76	-	1,142	100,00

Ficha técnica # III.2

Tipo de muestra: vidrio de botellas recicladas

Tipo de ensayo: pulverización de botellas de vidrio

Objetivo: Determinar las fracciones de vidrio obtenidas en el proceso de pulverización de botellas de vidrio

CONDICIONES

Tipo de vidrio:	Botellas de bebidas energizantes
Trituración:	Reducción manual con martillo
Pulverización:	Pulverizador de anillos
Tiempo de pulverización:	2 min
Tamizado seco:	Tamizado en seco utilizando como malla referencial no. 100 (150 μ m)
Tamizado húmedo:	Tamizado en húmedo utilizando como malla referencial no. 400 (38 μ m)

Tabla AIII.5. Ensayo de pulverización y tamizado de vidrio de botellas recicladas

Parámetro	Masa (g)
Masa inicial	688,4
Retenido malla # 100	167,1
Pasado malla # 100	521,3
Retenido malla # 400	207,7
Pasado malla # 400	313,6

Ficha técnica # III.3

Tipo de muestra: vidrio de botellas recicladas (VR)

Tipo de ensayo: fusión de fracciones de vidrio de botellas

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de la carga fundente

CONDICIONES

Peso de la muestra: 1 g

Temperatura de fusión: 900 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIII.6. Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones
(T= 900 °C y t= 1 h)

Nombre	Malla (#)	Granulometría (um)	% Vidrio reciclado	% Bórax	Resultado
VR1	100	150	100	0	Funde parcialmente
VR2	100	150	95	5	Funde parcialmente
VR3	100	150	90	10	Funde parcialmente
VR4	100	150	80	20	Si funde
VR5	-100+400	-150+38	100	0	Funde parcialmente
VR6	-100+400	-150+38	95	5	Funde parcialmente
VR7	-100+400	-150+38	90	10	Funde parcialmente
VR8	-100+400	-150+38	80	20	Funde parcialmente
VR9	-400	-38	100	0	Funde parcialmente
VR10	-400	-38	95	5	Funde parcialmente
VR11	-400	-38	90	10	Funde parcialmente
VR12	-400	-38	80	20	Funde parcialmente

Ficha técnica # III.4

Tipo de muestra: vidrio de botellas recicladas

Tipo de ensayo: fusión de fracciones de vidrio de botellas

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de la carga fundente

CONDICIONES

Peso de la muestra: 1 g

Temperatura de fusión: 950 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIII.7. Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones
(T= 950 °C y t= 1 h)

Nombre	Malla (#)	Granulometría (um)	% Vidrio reciclado	% Bórax	Resultado
VR13	100	150	100	0	Funde parcialmente y se recoge
VR14	100	150	95	5	Si funde
VR15	100	150	90	10	Si funde
VR16	100	150	80	20	Si funde
VR17	-100+400	-150+38	100	0	Funde parcialmente y se recoge
VR18	-100+400	-150+38	95	5	Funde parcialmente y se recoge
VR19	-100+400	-150+38	90	10	Si funde
VR20	-100+400	-150+38	80	20	Si funde
VR21	-400	-38	100	0	Funde parcialmente y se recoge
VR22	-400	-38	95	5	Funde y se recoge
VR23	-400	-38	90	10	Si funde
VR24	-400	-38	80	20	Si funde

Ficha técnica # III.5

Tipo de muestra: vidrio de botellas recicladas

Tipo de ensayo: fusión de fracciones de vidrio de botellas

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de la carga fundente

CONDICIONES

Peso de la muestra: 1 g

Temperatura de fusión: 1 000 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIII.8. Ensayo de fusión de fracciones de vidrio con sus respectivas composiciones (T= 1 000 °C y t= 1 h)

Nombre	Malla (#)	Granulometría (um)	% Vidrio reciclado	% Bórax	Resultado
VR25	100	150	100	0	Si funde
VR26	100	150	95	5	Si funde
VR27	100	150	90	10	Si funde
VR28	100	150	80	20	Si funde
VR29	-100+400	-150+38	100	0	Si funde
VR30	-100+400	-150+38	95	5	Si funde
VR31	-100+400	-150+38	90	10	Si funde
VR32	-100+400	-150+38	80	20	Si funde
VR33	-400	-38	100	0	Si funde
VR34	-400	-38	95	5	Si funde
VR35	-400	-38	90	10	Si funde
VR36	-400	-38	80	20	Si funde

Ficha técnica # III.6

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón activado

Objetivo: Determinar la granulometría y la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %)	300 ml
Masa carga fundente	200 g
Velocidad de agitación	600 rpm
Temperatura de impregnación	90 °C
Tiempo de impregnación	1 h
Masa carbón	100 g

Secado

Temperatura de secado	110 °C
-----------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	900 °C
Tiempo de fusión	1 h

Lavado

Velocidad de lavado	600 rpm
Tiempo de lavado	15 min

Tabla AIII.9. Ensayo de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 900 °C, 90% vidrio y dp= +150 µm)

Carga fundente	CBAVR4
Masa vidrio (g)	160,0
Masa bórax (g)	40,0
Masa carbón + carga fund. (g)	300,0
Masa impregnado seco (g)	267,7
Masa impregnado seco utilizado(g)	134,5
Masa fundida sin lavar (g)	116,7
Masa fundida lavado (g)	113,7
Ensayo de dureza	
Malla/Masa (g)	CBAVR4
# 3	10,7
# 4	13,0
# 6	34,9
# 8	27,3
# 10	7,1
# 14	6,2
Fondo	14,3
Peso 100 cm ³	55,0
Malla dureza (#)	14
Peso Retenido	50,5
Dureza (%)	91,8

Ficha técnica # III.7

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón activado

Objetivo: Determinar la granulometría y la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	300	mL
Masa carga fundente:	200	g
Velocidad de agitación:	600	rpm
Temperatura de impregnación:	90	°C
Tiempo de impregnación:	1	h
Masa carbón:	100	g
Granulometría del vidrio:	+150	um

Secado

Temperatura de secado	110	°C
-----------------------	-----	----

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	950	°C
Tiempo de fusión	1	h

Lavado

Velocidad de lavado	600	rpm
Tiempo de lavado	15	min

Tabla AIII.10. Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp= +150 µm)

Carga fundente	CBAVR14	CBAVR15	CBAVR16
Masa vidrio (g)	10,0	20,0	40,0
Masa bórax (g)	190,0	180,0	160,0
Masa carbón + carga fund. (g)	300,0	300,0	300,0
Masa impregnado seco (g)	282,0	279,4	273,0
Masa impregnado seco utilizado(g)	141,0	139,7	136,2
Masa fundida sin lavar (g)	128,1	125,0	122,7
Masa fundida lavado (g)	126,7	121,9	117,4
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAVR14	CBAVR15	CBAVR16
# 3	2,9	11,1	3,8
# 4	7,6	17,8	7,3
# 6	23,1	23,2	24,6
# 8	29,1	22,6	26,1
# 10	11,1	9,1	12,8
# 14	11,7	10,2	16,0
Fondo	40,8	27,7	26,7
Peso 100 cm ³	62,7	68,7	70,5
Malla dureza (#)	16	14	16
Peso Retenido	57,9	64,2	65,0
Dureza (%)	92,3	93,5	92,2

Ficha técnica # III.8

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón activado

Objetivo: Determinar la granulometría y la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	300	ml
Masa carga fundente:	200	g
Velocidad de agitación:	600	rpm
Temperatura de impregnación:	90	°C
Tiempo de impregnación:	1	h
Masa carbón:	100	g
Granulometría del vidrio:	-150+38	um

Secado

Temperatura de secado	110	°C
-----------------------	-----	----

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	950	°C
Tiempo de fusión	1	h

Lavado

Velocidad de lavado	600	rpm
Tiempo de lavado	15	min

Tabla AIII.11. Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp= -150+38 µm)

Carga fundente	CBAVR20	CBAVR19
Masa vidrio (g)	40	20,0
Masa bórax (g)	160,0	180,0
Masa carbón + carga fund. (g)	300,0	300,0
Masa impregnado seco (g)	274,1	276,1
Masa impregnado seco utilizado(g)	148,9	130,7
Masa fundida sin lavar (g)	142,5	119,7
Masa fundida lavado (g)	142,7	118,0
Ensayos de dureza		
Malla/Masa (g)	CBAVR20	CBAVR19
# 3	0,8	7,5
# 4	4,6	25,0
# 6	33,2	23,8
# 8	36,0	20,9
# 10	15,5	9,3
# 14	18,1	12,0
Fondo	34,5	19,3
Peso 100 cm ³	60,2	65,4
Malla dureza	16	14
Peso Retenido	55,3	60,5
Dureza (%)	91,9	92,5

Ficha técnica # III.9

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón activado

Objetivo: Determinar la granulometría y la composición de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	300	mL
Masa carga fundente:	200	g
Velocidad de agitación:	600	rpm
Temperatura de impregnación:	90	°C
Tiempo de impregnación:	1	h
Masa carbón:	100	g
Granulometría del vidrio:	-38	um

Secado

Temperatura de secado	110	°C
-----------------------	-----	----

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	950	°C
Tiempo de fusión	1	h

Lavado

Velocidad de lavado	600	rpm
Tiempo de lavado	15	min

Tabla AIII.12. Ensayos de determinación de la composición y granulometría del vidrio reciclado pulverizado impregnado en carbón (T= 950 °C y dp=-38 μm)

Carga fundente	CBAVR24	CBAVR23
Masa vidrio (g)	40,0	20,0
Masa bórax (g)	160,0	180,0
Masa carbón + carga fund. (g)	300,0	300,0
Masa impregnado seco (g)	280,5	279,3
Masa impregnado seco utilizado(g)	131,0	128,4
Masa fundida sin lavar (g)	121,4	122,6
Masa fundida lavado (g)	114,2	113,1
Ensayos de dureza		
Malla/Masa (g)	M CBAVR24	M CBAVR23
# 3	0,0	0,7
# 4	1,9	9,4
# 6	19,1	23,2
# 8	25,0	24,4
# 10	12,3	10,9
# 14	15,9	15,5
Fondo	40,1	29,1
Peso 100 cm ³	53,1	63,3
Malla dureza (#)	16	16
Peso Retenido	47,9	57,8
Dureza (%)	90,2	91,3

Ficha técnica # III.10

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herreshoff

Tipo de ensayo: Impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón activado

Objetivo: Determinar los parámetros estudiados para la impregnación de la carga fundente en carbón activado

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	300	mL
Masa carga fundente:	200	g
Velocidad de agitación:	600	rpm
Temperatura de impregnación:	90	°C
Tiempo de impregnación:	1	h
Masa carbón:	100	g
Granulometría del vidrio:	+150	um

Secado

Temperatura de secado	110	°C
-----------------------	-----	----

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	950	°C
Tiempo de fusión	1	h

Lavado

Velocidad de lavado	600	rpm
Tiempo de lavado	15	min

Tabla AIII.13. Ensayos de determinación de los parámetros estudiados para la impregnación de vidrio reciclado pulverizado en carbón (T= 950 °C, dp= +150 µm, 10% vidrio y t= 1 h)

Carga fundente	CAVR (1)	CAVR (2)	CAVR(PROM)
Masa vidrio (g)	20,0	20,0	20,0
Masa bórax (g)	180,0	180,0	180,0
Masa carbón + carga fund. (g)	300,0	300,0	300,0
Masa impregnado seco (g)	275,0	279,0	277,0
Masa impregnado seco utilizado (g)	121,9	121,1	121,5
Masa fundida sin lavar (g)	113,4	110,9	112,2
Masa fundida lavado (g)	111,0	108,3	109,7
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CAVR (1)	CAVR (2)	CAVR(PROM)
# 3	1,1	1,0	1,1
# 4	13,3	6,0	9,7
# 6	29,0	20,3	24,7
# 8	30,4	26,4	28,4
# 10	8,1	11,5	9,8
# 14	7,2	14,6	10,9
Fondo	21,9	28,5	25,2
Peso 100 cm ³	59,5	62	60,8
Malla dureza (#)	16	16	16
Peso Retenido	55,4	58,1	56,8
Dureza (%)	93,1	93,7	93,4
			Desviación (±)
			0,3
Ensayos de índice de yodo			
Parámetro	CAVR (1)	CAVR (2)	CAVR (PROM)
Masa carbón experimental (g)	0,75	0,75	0,75
Masa carbón real (g)	1,5	1,5	1,5
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	5,8	6,7	6,25
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	11,6	13,4	12,5
Índice de yodo (mg I₂/g)	613	568	590,5
			Desviación (±)
			22,50

ANEXO IV
FICHAS TÉCNICAS DE IMPREGNACIÓN DE VIDRIO EN
CARBONES UTILIZANDO COMO FUENTE DE SÍLICE FRITAS DE
ESMALTE

Ficha técnica # IV.1

Tipo de muestra: Fritas de esmalte

Tipo de ensayo: Fluorescencia de rayos X

Objetivo: Determinar la composición elemental y química de las fritas de esmalte de estudio

Análisis químico por fluorescencia de rayos X S8 Tiger y el programa Spectra Pluss

Se preparó las perlas con 0,5 g de las muestras con 7 g del fundente. Se realizó un barrido de las muestras para determinar sus composiciones. Los resultados del equipo se reportaron elementalmente, y el programa realiza el cálculo para expresarse las composiciones en forma de óxidos.

Tabla AIV.1. Resultados del análisis de fluorescencia de rayos X de las fritas de esmalte

Elemento	Frita 1	Frita 2	Frita 3	Óxido	Frita 1	Frita 2	Frita 3
Si	21,32	15,36	23,67	SiO ₂	58,04	44,77	55,34
Ca	12,34	4,43	14,23	Al ₂ O ₃	20,79	12,14	4,85
Al	8,82	5,31	2,28	CaO	19,13	7,15	21,54
K	2,25	1,35	2,39	K ₂ O	3,26	1,92	3,20
Na	1,27	2,66	1,23	Na ₂ O	2,19	4,49	1,96
Mg	0,31	0,00	6,33	MgO	0,66	0,11	11,16
P	0,03	0,03	0,04	BaO	0,16	10,14	0,05
Ti	0,02	0,03	0,03	ZnO	0,10	18,04	0,10
S	0,04	0,04	0,03	P ₂ O ₅	0,05	0,02	0,04
Zn	0,08	12,94	0,09	Fe ₂ O ₃	0,21	0,14	0,21
Fe	0,11	0,05	0,12	TiO ₂	0,04	0,04	0,04
O	38,40	33,09	39,99	Total	104,63	98,96	98,49
Total	84,99	75,29	90,43				

Determinación de la composición de las cargas fundentes utilizadas en la impregnación de fritas de esmalte

La determinación de las composiciones de cada una de las cargas fundentes se efectuó con el mismo procedimiento realizado con las sales fundentes. En las Tablas AIV.2 a la AIV.10, presentan los resultados de las composiciones de las cargas fundentes con los diferentes porcentajes de bórax.

Tabla AIV.2. Composición química de la carga fundente constituida por 95 % fritas 1 de esmalte y 5 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	55,14	60,00	0,9190	58,80
Al ₂ O ₃	19,75	101,96	0,1937	12,40
B ₂ O ₃	1,82	69,62	0,0262	1,68
Na ₂ O (vidrio)	2,08	62,00	0,0336	2,15
Na ₂ O (bórax)	0,81	62,00	0,0131	0,84
CaO	18,17	56,00	0,3245	20,77
MgO	0,63	40,31	0,0156	1,00
K ₂ O	3,10	94,20	0,0329	2,10
BaO	0,15	153,34	0,0010	0,06
ZnO	0,10	81,37	0,0012	0,07
P ₂ O ₅	0,05	141,94	0,0003	0,02
Fe ₂ O ₃	0,20	159,7	0,0012	0,08
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,03
Total	102,04	-	1,5628	100,00

Tabla AIV.3. Composición química de la carga fundente constituida por 90 % fritas 1 de esmalte y 10 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	52,24	60,00	0,8706	57,20
Al ₂ O ₃	18,71	101,96	0,1835	12,06
B ₂ O ₃	3,65	69,62	0,0524	3,44
Na ₂ O (vidrio)	1,97	62,00	0,0318	2,09
Na ₂ O (bórax)	1,63	62,00	0,0263	1,73
CaO	17,22	56,00	0,3074	20,20
MgO	0,59	40,31	0,0147	0,97
K ₂ O	2,93	94,20	0,0311	2,05
BaO	0,14	153,34	0,0009	0,06
ZnO	0,09	81,37	0,0011	0,07
P ₂ O ₅	0,05	141,94	0,0003	0,02
Fe ₂ O ₃	0,19	159,7	0,0012	0,08
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,03
Total	99,45	-	1,5219	100,00

Tabla AIV.4. Composición química de la carga fundente constituida por 80 % fritas 1 de esmalte y 20 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	46,43	60,00	0,7739	53,73
Al ₂ O ₃	16,63	101,96	0,1631	11,33
B ₂ O ₃	7,30	69,62	0,1048	7,28
Na ₂ O (vidrio)	1,75	62,00	0,0283	1,96
Na ₂ O (bórax)	3,26	62,00	0,0525	3,65
CaO	15,30	56,00	0,2733	18,97
MgO	0,53	40,31	0,0131	0,91
K ₂ O	2,61	94,20	0,0277	1,92
BaO	0,13	153,34	0,0008	0,06
ZnO	0,08	81,37	0,0010	0,07
P ₂ O ₅	0,04	141,94	0,0003	0,02
Fe ₂ O ₃	0,17	159,7	0,0011	0,07
TiO ₂	0,03	79,9	0,0004	0,03
Total	94,26	-	1,4403	100,00

Tabla AIV.5. Composición química de la carga fundente constituida por 95 % fritas 2 de esmalte y 5 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	42,53	60,00	0,7089	52,58
Al ₂ O ₃	11,53	101,96	0,1131	8,39
B ₂ O ₃	1,82	69,62	0,0262	1,94
Na ₂ O (vidrio)	4,27	62,00	0,0688	5,10
Na ₂ O (bórax)	0,81	62,00	0,0131	0,97
CaO	6,79	56,00	0,1213	9,00
MgO	0,10	40,31	0,0026	0,19
K ₂ O	1,82	94,20	0,0194	1,44
BaO	9,63	153,34	0,0628	4,66
ZnO	17,14	81,37	0,2106	15,62
P ₂ O ₅	0,02	141,94	0,0001	0,01
Fe ₂ O ₃	0,13	159,7	0,0008	0,06
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,04
Total	96,65	-	1,3482	100,00

Tabla AIV.6. Composición química de la carga fundente constituida por 90 % fritas 2 de esmalte y 10 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	40,29	60,00	0,6716	50,93
Al ₂ O ₃	10,93	101,96	0,1072	8,13
B ₂ O ₃	3,65	69,62	0,0524	3,98
Na ₂ O (vidrio)	4,04	62,00	0,0652	4,94
Na ₂ O (bórax)	1,63	62,00	0,0263	1,99
CaO	6,44	56,00	0,1149	8,71
MgO	0,10	40,31	0,0025	0,19
K ₂ O	1,73	94,20	0,0183	1,39
BaO	9,13	153,34	0,0595	4,51
ZnO	16,24	81,37	0,1995	15,13
P ₂ O ₅	0,02	141,94	0,0001	0,01
Fe ₂ O ₃	0,13	159,7	0,0008	0,06
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,03
Total	94,34	-	1,3187	100,00

Tabla AIV.7. Composición química de la carga fundente constituida por 80 % fritas 2 de esmalte y 10 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	35,82	60,00	0,5969	47,39
Al ₂ O ₃	9,71	101,96	0,0953	7,56
B ₂ O ₃	7,30	69,62	0,1048	8,32
Na ₂ O (vidrio)	3,59	62,00	0,0579	4,60
Na ₂ O (bórax)	3,26	62,00	0,0525	4,17
CaO	5,72	56,00	0,1021	8,11
MgO	0,09	40,31	0,0022	0,17
K ₂ O	1,54	94,20	0,0163	1,29
BaO	8,11	153,34	0,0529	4,20
ZnO	14,43	81,37	0,1774	14,08
P ₂ O ₅	0,02	141,94	0,0001	0,01
Fe ₂ O ₃	0,11	159,7	0,0007	0,06
TiO ₂	0,03	79,9	0,0004	0,03
Total	89,72	-	1,2596	100,00

Tabla AIV.8. Composición química de la carga fundente constituida por 95 % fritas 3 de esmalte y 5 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	52,57	60,00	0,8762	53,92
Al ₂ O ₃	4,61	101,96	0,0452	2,78
B ₂ O ₃	1,82	69,62	0,0262	1,61
Na ₂ O (vidrio)	0,00	62,00	0,0000	0,00
Na ₂ O (bórax)	0,81	62,00	0,0131	0,81
CaO	20,46	56,00	0,3654	22,49
MgO	10,60	40,31	0,2630	16,19
K ₂ O	3,04	94,20	0,0323	1,99
BaO	0,05	153,34	0,0003	0,02
ZnO	0,10	81,37	0,0012	0,07
P ₂ O ₅	0,04	141,94	0,0003	0,02
Fe ₂ O ₃	0,20	159,7	0,0012	0,08
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,03
Total	94,34	-	1,6249	100,00

Tabla AIV.9. Composición química de la carga fundente constituida por 90 % fritas 3 de esmalte y 10 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	49,81	60,00	0,8301	50,03
Al ₂ O ₃	4,37	101,96	0,0428	2,58
B ₂ O ₃	3,65	69,62	0,0524	3,16
Na ₂ O (vidrio)	1,76	62,00	0,0285	1,71
Na ₂ O (bórax)	4,72	62,00	0,0762	4,59
CaO	19,39	56,00	0,3462	20,86
MgO	10,04	40,31	0,2492	15,02
K ₂ O	2,88	94,20	0,0306	1,84
BaO	0,05	153,34	0,0003	0,02
ZnO	0,09	81,37	0,0011	0,07
P ₂ O ₅	0,04	141,94	0,0003	0,02
Fe ₂ O ₃	0,19	159,7	0,0012	0,07
TiO ₂	0,04	79,9	0,0005	0,03
Total	97,01	-	1,6591	100,00

Tabla AIV.10. Composición química de la carga fundente constituida por 80 % fritas 3 de esmalte y 10 % bórax

Componente	% p/p	Peso molecular (g/mol)	# moles	% molar
SiO ₂	44,27	60,00	0,7379	48,61
Al ₂ O ₃	3,88	101,96	0,0381	2,51
B ₂ O ₃	7,30	69,62	0,1048	6,91
Na ₂ O (vidrio)	1,57	62,00	0,0253	1,67
Na ₂ O (bórax)	3,26	62,00	0,0525	3,46
CaO	17,23	56,00	0,3077	20,27
MgO	8,93	40,31	0,2215	14,59
K ₂ O	2,56	94,20	0,0272	1,79
BaO	0,04	153,34	0,0003	0,02
ZnO	0,08	81,37	0,0010	0,06
P ₂ O ₅	0,03	141,94	0,0002	0,01
Fe ₂ O ₃	0,17	159,7	0,0011	0,07
TiO ₂	0,03	79,9	0,0004	0,03
Total	89,35	-	1,5179	100,00

Ficha técnica # IV.2

Tipo de muestra: fritas de esmalte (FE)

Tipo de ensayo: fusión de fritas de esmalte

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de fritas de esmalte

CONDICIONES

Peso muestra: 1 G

Temperatura de fusión: 600 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIV.11. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte
(T= 600 °C y t= 1h)

Nombre	Frita	% Vidrio frita	% Bórax	Resultado
FE1	1	95	5	No funde
FE2	1	90	10	No funde
FE3	1	80	20	No funde
FE4	2	95	5	No funde
FE5	2	90	10	No funde
FE6	2	80	20	No funde
FE7	3	95	5	No funde
FE8	3	90	10	No funde
FE9	3	80	20	No funde

Ficha técnica # IV.3

Tipo de muestra: fritas de esmalte

Tipo de ensayo: fusión de fritas de esmalte

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de fritas de esmalte

CONDICIONES

Peso muestra: 1 g

Temperatura de fusión: 700 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIV.12. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte
(T= 700 °C y t= 1 h)

Nombre	Frita	% Vidrio frita	% Bórax	Resultado
FE10	1	95	5	No funde
FE11	1	90	10	No funde
FE12	1	80	20	Fundido parcialmente
FE13	2	95	5	No funde
FE14	2	90	10	No funde
FE15	2	80	20	Si funde
FE16	3	95	5	No funde
FE17	3	90	10	No funde
FE18	3	80	20	Fundido parcialmente

Ficha técnica # IV.4

Tipo de muestra: fritas de esmalte

Tipo de ensayo: fusión de fritas de esmalte

Objetivo: Determinar la temperatura de fusión de fritas de esmalte

CONDICIONES

Peso muestra: 1 g

Temperatura de fusión: 800 °C

Tiempo de fusión: 1 h

Tabla AIV.13. Ensayos de determinación de la temperatura de fusión de fritas de esmalte
(T= 800 °C y t= 1h)

Nombre	Frita	% Vidrio frita	% Bórax	Resultado
FE19	1	95	5	No funde
FE20	1	90	10	Funde parcialmente
FE21	1	80	20	Si funde
FE22	2	95	5	No funde
FE23	2	90	10	Funde parcialmente
FE24	2	80	20	Si funde
FE25	3	95	5	No funde
FE26	3	90	10	No funde
FE27	3	80	20	Si funde

Ficha técnica # IV.5

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar la composición y la cantidad de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Velocidad de agitación: 600 rpm

Tiempo de agitación: 30 min

Etapa de vacío: 15 min

Masa carbón: 100 g

Secado

Temperatura de secado 110 °C

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión 700 °C

Tiempo de fusión 1 h

Lavado

Velocidad de lavado 600 rpm

Tiempo de lavado 15 min

Tabla AIV.14. Ensayos de determinación de la composición y cantidad de fritas de esmalte impregnada en carbón (T= 700 °C y 80% FE2)

Carga fundente	CBAFE15.1	CBAFE15.2	CBAFE15.3
Volumen solución CMC (0,5%) (mL)	33,3	66,6	100,0
Masa vidrio (g)	40,0	80,0	120,0
Masa bórax (g)	10,0	20,0	30,0
Masa carbón + carga fund. (g)	150,0	200,0	250,0
Masa impregnado seco (g)	124,3	185,6	220,7
Masa impregnado seco utilizado (g)	109,4	107,1	108,5
Masa fundida sin lavar (g)	104,8	100,2	101,6
Masa fundida lavada (g)	104,3	98,7	100,4
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAFE15.1	CBAFE15.2	CBAFE15.3
# 3	0,0	1,8	0,6
# 4	15,3	29,4	30,1
# 6	31,1	32,8	36,9
# 8	22,0	11,2	19,8
# 10	10,6	6,5	3,9
# 14	9,1	2,3	2,1
Fondo	15,5	14,6	6,1
Peso 100 cm ³	59,3	59,2	59,5
Malla dureza (#)	14	14	14
Peso Retenido	54,0	54,3	54,7
Dureza (%)	91,1	91,7	91,9

Ficha técnica # IV.6

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar la composición y la cantidad de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	33,3 mL
Masa carga fundente:	50 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Tiempo de agitación:	30 min
Etapas de vacío:	15 min
Masa carbón:	100 g

Secado

Temperatura de secado	110 °C
-----------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	800 °C
Tiempo de fusión	1 h

Lavado

Velocidad de lavado	600 rpm
Tiempo de lavado	15 min

Tabla AIV.15. Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de fritada de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 50 g)

Carga fundente	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
Masa vidrio (g)	40,0	40,0	40,0
Masa bórax (g)	10,0	10,0	10,0
Masa carbón + carga fund. (g)	150,0	150,0	150,0
Masa impregnado seco (g)	142,5	142,1	142,8
Masa impregnado seco utilizado(g)	94,1	98,5	106,7
Masa fundida sin lavar (g)	87,6	93,5	98,8
Masa fundida lavado (g)	86,3	92,7	94,1
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	6,9	6,0	2,1
# 6	37,3	41,8	31,8
# 8	24,4	29,2	33,0
# 10	4,1	3,6	5,4
# 14	1,9	1,1	3,2
Fondo	13,6	11,1	18,6
Peso 100 cm ³	54,2	54,7	54,8
Malla dureza (#)	14	14	16
Peso Retenido	49,5	50,2	50,1
Dureza (%)	91,3	91,8	91,4

Ficha técnica # IV.7

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar la composición, cantidad y la temperatura de fusión de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	66,6 mL
Masa carga fundente:	100 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Tiempo de agitación:	30 min
Etapas de vacío:	15 min
Masa carbón:	100 g

Secado

Temperatura de secado	110 °C
-----------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	800 °C
Tiempo de fusión	1 h

Lavado

Velocidad de lavado	600 rpm
Tiempo de lavado	15 min

Tabla AIV.16. Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de fritada de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 100 g)

Carga fundente	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
Masa vidrio (g)	80,0	80,0	80,0
Masa bórax (g)	20,0	20,0	20,0
Masa carbón + carga fund. (g)	200,0	200,0	200,0
Masa impregnado seco (g)	183,6	187,0	174,8
Masa impregnado seco utilizado(g)	124,9	118,1	121,3
Masa fundida sin lavar (g)	115,40	107,6	107,6
Masa fundida lavado (g)	114,2	106,1	106,4
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	4,9	6,0	2,5
# 6	33,7	26,9	30,1
# 8	37,6	26,2	31,3
# 10	10,1	8,6	10,2
# 14	8,7	9,5	9,9
Fondo	19,1	29,3	22,4
Peso 100 cm ³	55,7	56,6	57,1
Malla dureza (#)	16	14	16
Peso Retenido	51,3	53,3	53,2
Dureza (%)	92,1	94,2	93,2

Ficha técnica # IV.8

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar la composición, cantidad y la temperatura de fusión de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %): 100 mL

Masa carga fundente: 150 g

Velocidad de agitación: 600 rpm

Tiempo de agitación: 30 min

Etapa de vacío: 15 min

Masa carbón: 100 g

Secado

Temperatura de secado 110 °C

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión 800 °C

Tiempo de fusión 1 h

Lavado

Velocidad de lavado 600 rpm

Tiempo de lavado 15 min

Tabla AIV.17. Ensayos de determinación de la composición y la cantidad de fritada de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C y CF= 150 g)

Carga fundente	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
Masa vidrio (g)	120,0	120,0	120,0
Masa bórax (g)	30,0	30,0	30,0
Masa carbón + carga fund. (g)	250,0	250,0	250,0
Masa impregnado seco (g)	219,3	205,2	208,6
Masa impregnado seco utilizado(g)	119,5	133,0	123,6
Masa fundida sin lavar (g)	111,3	124,9	114,6
Masa fundida lavada (g)	109,5	113,1	110,9
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAFE21	CBAFE24	CBAFE27
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	15,1	4,1	5,5
# 6	31,0	34,8	36,9
# 8	26,8	38,1	33,0
# 10	8,1	9,7	8,5
# 14	9,7	6,6	9,4
Fondo	18,5	18,8	17,5
Peso 100 cm ³	57,8	60,2	57,5
Malla dureza (#)	14	16	14
Peso Retenido	53,5	56,8	53,9
Dureza (%)	92,6	94,4	93,7

Ficha técnica # IV.9

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar el tiempo de fusión de la carga fundente impregnada en el carbón

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %): 66,6 mL

Masa carga fundente: 100 g

Velocidad de agitación: 600 rpm

Tiempo de agitación: 30 min

Etapas de vacío: 15 min

Masa carbón: 100 g

Secado

Temperatura de secado 110 °C

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión 800 °C

Lavado

Velocidad de lavado 600 rpm

Tiempo de lavado 15 min

Tabla AIV.18. Ensayos de determinación del tiempo de fusión de la frita de esmalte impregnada en carbón (T= 800 °C, 80% FE2 y CF= 100 g)

Carga fundente	CBAFE24.1	CBAFE24.2	CBAFE24.3
Masa vidrio (g)	80,0	80,0	80,0
Masa bórax (g)	20,0	20,0	20,0
Masa carbón + carga fund. (g)	200,0	200,0	200,0
Masa impregnado seco (g)	187,0	182,6	183,5
Masa impregnado seco utilizado(g)	118,1	99,2	95,3
Masa fundida sin lavar (g)	107,6	93,6	91,9
Masa fundida lavada (g)	106,1	91,7	90,7
Tiempo de fusión (min)	60	30	15
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CBAFE24.1	CBAFE24.2	CBAFE24.3
# 3	0,0	0,5	2,7
# 4	6,0	6,2	11,5
# 6	26,9	18,9	24,0
# 8	26,2	21,1	19,8
# 10	8,6	12,8	8,9
# 14	9,5	12,3	8,0
Fondo	29,3	19,9	15,8
Peso 100 cm ³	56,6	56,9	57,3
Malla dureza (#)	14	16	14
Peso Retenido	53,3	52,7	52,7
Dureza (%)	94,2	92,6	92,0

Ficha técnica # IV.10

Tipo de muestra: Carbón activado con vapor de agua en Horno Nichols Herreshoff

Tipo de ensayo: Impregnación de fritas de esmalte en carbón activado

Objetivo: Determinar los parámetros estudiados para la impregnación de la carga fundente en carbón activado

CONDICIONES

Impregnación

Volumen solución CMC (0,5 %):	66,6 mL
Masa carga fundente:	100 g
Velocidad de agitación:	600 rpm
Tiempo de agitación:	30 min
Etapas de vacío:	15 min
Masa carbón:	100 g

Secado

Temperatura de secado	110 °C
-----------------------	--------

Tratamiento térmico

Temperatura de fusión	800 °C
-----------------------	--------

Lavado

Velocidad de lavado	600 rpm
Tiempo de lavado	15 min

Tabla AIV.19. Ensayos de determinación de los parámetros estudiados para la impregnación de frita de esmalte en carbón (T= 800 °C, 80% FE2, 100 g CF y t= 1 h)

Carga fundente	CAFE (1)	CAFE (2)	CAFE(PROM)
Masa vidrio (g)	80,0	80,0	80,00
Masa bórax (g)	20,0	20,0	20,0
Masa carbón + carga fund. (g)	200,0	200,0	200,0
Masa impregnado seco (g)	176,1	174,5	175,3
Masa impregnado seco utilizado(g)	112,0	109,8	110,9
Masa fundida sin lavar (g)	104,5	100,5	102,5
Masa fundida lavada (g)	103,4	98,6	101,0
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CAFE (1)	CAFE (2)	CAFE(PROM)
# 3	0,0	0,0	0,0
# 4	1,5	3,8	2,7
# 6	24,6	32,8	28,7
# 8	33,4	31,4	32,4
# 10	11,2	7,2	9,2
# 14	10,5	6,5	8,5
Fondo	22,2	16,9	19,6
Peso 100 cm ³	58,1	59,2	58,7
Malla dureza (#)	16	14	14/16
Peso Retenido	54,8	56,1	55,5
Dureza (%)	94,3	94,8	94,5
		Desviación (±)	0,22
Ensayos de índice de yodo			
Parámetro	CAFE (1)	CAFE (2)	CAFE (PROM)
Masa carbón experimental (g)	0,75	0,75	0,75
Masa carbón real (g)	1,5	1,5	1,5
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	5,1	4,0	4,55
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ real (mL)	10,2	8,0	9,1
Índice de yodo (mg I₂/g)	655,0	724	689,5
		Desviación (±)	34,5

ANEXO V
FICHAS TÉCNICAS DE IMPREGNACIÓN DE POLISILANO EN
CARBONES

Ficha técnica # V.1

Tipo de muestra: Carbón pirolizado de bajo grado de activación

Tipo de ensayo: Impregnación de polisilano en carbón activado

Objetivo: Determinar el volumen necesario de polisilano a impregnarse en carbón activado

CONDICIONES

Impregnación

Volumen alcohol potable: 100 mL

Velocidad de agitación: 600 rpm

Temperatura de impregnación: 80 °C

Masa carbón: 100 g

Secado

Temperatura de secado: 110 °C

Tabla AV.1. Ensayos de determinación del volumen de polisilano a impregnarse en carbón activado

Parámetro	CBASIL1	CBASIL2	CBASIL3	CBASIL4	CBASIL5
Volumen polisilano (mL)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0
Masa impregnado seco (g)	103,0	111,4	114,9	119,8	123,6
Ensayos de dureza					
Malla/Masa (g)	CBASIL1	CBASIL2	CBASIL3	CBASIL4	CBASIL5
# 3	0	8,9	4,5	7,6	6,8
# 4	21	37,2	40,5	59,3	74,4
# 6	38	27,4	35,8	36,8	33,4
# 8	26	15	20,4	9,3	6,2
# 10	4,5	4,5	6,5	1,5	0,7
Fondo	8,7	15	7,2	4,8	1,9
Peso 100 cm ³	43,7	45,2	40,7	45,2	44,1
Malla dureza (#)	14	8	8	8	8
Peso Retenido	41,6	43,9	39,7	44,4	43,7
Dureza (%)	95,2	97,1	97,5	98,2	99,1

Ficha técnica # V.2

Tipo de muestra: Carbón activado

Tipo de ensayo: Impregnación de polisilano en carbón activado

Objetivo: Determinar la influencia de la impregnación de polisilano en carbón activado en sus propiedades mecánicas y de adsorción

CONDICIONES

Impregnación

Volumen alcohol potable: 100 mL
 Velocidad de agitación: 600 rpm
 Temperatura de impregnación: 80 °C
 Masa carbón: 100 g

Secado

Temperatura de secado: 110 °C

Tabla AV.2. Ensayos de impregnación de polisilano en carbón activado (50 mL polisilano)

Parámetro	CASIL (1)	CASIL (2)	CASIL(PROM)
Volumen polisilano (mL)	50,0	50,0	50,0
Masa impregnado seco (g)	136,8	130,2	133,5
Ensayos de dureza			
Malla/Masa (g)	CASIL (1)	CASIL (2)	CASIL(PROM)
# 3	20,2	9,2	14,7
# 4	65,8	72,6	69,2
# 6	39,4	37,2	38,3
# 8	7,4	6,6	7,0
# 10	0,8	1,2	1,0
# 14	0,2	1,2	0,7
Fondo	0,2	2,2	1,2

Tabla AV.2. Ensayos de impregnación de polisilano en carbón activado (50 mL polisilano) (continuación)

Peso 100 cm ³	45,7	42,9	44,3
Malla dureza (#)	8	8	8
Peso Retenido	45,1	42,2	43,65
Dureza (%)	98,7	98,4	98,5
		Desviación (±)	0,2
Ensayos de índice de yodo			
Parámetro	CASIL (1)	CASIL (2)	CASIL(PROM)
Masa carbón experimental (g)	0,75	0,75	0,75
Masa carbón real (g)	1,5	1,5	1,5
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ experimental (mL)	4,5	5,3	4,9
Volumen Na ₂ S ₂ O ₃ real (mL)	9	10,6	9,8
Índice de yodo (mg I₂/g)	691,0	643,0	667,0
		Desviación (±)	24,00

ANEXO VI FICHAS TÉCNICAS DE ATRICIÓN DE CARBONES ACTIVADOS

Ficha técnica # VI.1

Tipo de muestra: Carbón activado, compósitos de carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano

Tipo de ensayo: Atrición de carbones activados

Objetivo: Determinar las pérdidas por atrición de carbones activados

CONDICIONES

Velocidad de agitación: 900 rpm

Tiempo de agitación: 24 h

Masa de carbón: 300 g

Porcentaje de sólidos: 50 %

Determinación del porcentaje de recuperación y de pérdidas por atrición

El porcentaje de recuperación de carbón en el proceso de atrición se determinó como la masa de material retenido en la malla de granulometría de trabajo (malla #8). Además, se cuantificó el incremento de dureza luego de la atrición.

$$\% \text{Recup. CA} = \frac{140,1 \text{ g}}{300,0 \text{ g}} 100 = 46,70 \%$$

$$\% \text{Pérd. CA} = 100,00 - 46,70 = 53,30 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Incremento dureza} &= \frac{\text{dureza final} - \text{dureza inicial}}{\text{dureza inicial}} 100 = \frac{96,4 - 89,0}{89,0} * 100 \\ &= 8,28 \% \end{aligned}$$

Tabla AVI.1. Ensayos de atrición de carbones activados y de compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano

Parámetro	CA CALGON	CAA	CAVS	CAVR	CAFE	CASIL
Masa final (g)	211,9	140,1	191,1	161,8	182,2	206,8
% Recuperación	70,63	46,70	63,70	53,93	60,73	68,93
% Pérdida	29,37	53,30	36,30	46,07	39,27	31,07
Ensayos de dureza						
Malla/Masa (g)	CA CALGON	CAA	CAVS	CAVR	CAFE	CASIL
# 6	0,4	25,6	37,4	43,1	39,8	86,8
# 8	41,7	74,5	62,6	56,8	60,2	10,6
# 10	37,9	15,6	0,0	0,0	0,0	1,6
# 14	21,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
Fondo	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Peso 100 cm ³	65,5	60,6	73,8	84,0	70,5	55,9
Peso retenido	65,2	58,4	73,1	83,5	69,1	55,7
Malla (#)	16	16	16	16	16	14
Dureza final (%)	99,5	96,4	99,1	99,4	98,0	99,6
Dureza inicial (%)	99,07	89,0	98,1	93,4	94,5	98,5
Incremento dureza (%)	0,48	8,28	0,97	6,43	3,72	1,16

ANEXO VII

FICHAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CARBONES ACTIVADOS

Ficha técnica # VII.1

Tipo de muestra: Compósitos de carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano

Tipo de ensayo: Porcentaje de humedad, materia volátil, contenido total de cenizas y carbón fijo en carbones activados

Objetivo: Caracterización de compósitos de carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano

CONDICIONES

Masa aproximada de carbón utilizada: 1 g

Temperatura de la estufa (humedad): 100 °C

Temperatura de la mufla: 950 °C

En la Tabla AVII.1, se presentan los resultados del análisis próximo del carbón activado y de los compósitos obtenidos.

Determinación del carbón fijo real presente en los compósitos carbón activado-vidrio y carbón activado-polisilano

Carbón fijo en compósitos carbón activado-vidrio

Para el caso de los compósitos carbón activado-vidrio, la fracción de masa vítrea se incorpora en la fracción de las cenizas, ya que el vidrio a la temperatura de 950 °C no puede volatilizarse, por lo que, las cenizas del compósito se constituyen de las cenizas propias del carbón activado y de la masa de vidrio impregnada. En la Tabla AVII.2, se presentan los resultados necesarios para el cálculo del carbón fijo real del compósito carbón activado-vidrio sales.

Tabla AVII.1. Ensayos de determinación de porcentajes de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo de carbones activados

Carbón	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol+muestra (g)	Peso humedad (g)	Peso volátil (g)	Peso cenizas (g)	% Humedad	% Volátiles	% Cenizas	% Carbón fijo
CAA (1)	26,0318	0,9942	27,026	26,9658	26,8831	26,0834	6,06	14,37	5,19	80,44
CAA (2)	24,0408	0,9926	25,0334	24,9735	24,8893	24,0926	6,03	14,52	5,22	80,26
CAA PROM	25,0363	0,9934	26,0297	25,9697	25,8862	25,0880	6,04	14,45	5,20	80,35
					Desviación (±)	Desviación (±)	0,13	0,27	0,46	0,73
CAVS (1)	23,1831	1,0050	24,1881	24,1410	24,0756	23,3920	4,69	11,19	20,79	68,02
CAVS (2)	22,1546	1,0021	23,1567	23,1123	23,0441	22,3540	4,43	11,24	19,90	68,87
CAVS PROM	22,6689	1,0036	23,6724	23,6267	23,5599	22,8730	4,56	11,22	20,34	68,44
					Desviación (±)	Desviación (±)	0,02	0,18	0,43	0,24
CAVR (1)	31,0077	1,0017	32,0094	31,9876	31,9574	31,2091	2,18	5,19	20,11	74,70
CAVR (2)	22,0373	1,0000	23,0373	23,0154	22,9868	22,2539	2,19	5,05	21,66	73,29
CAVR PROM	26,5225	1,00085	27,5234	27,5015	27,4721	26,7315	2,18	5,12	20,88	74,00
					Desviación (±)	Desviación (±)	0,01	0,07	0,78	0,71
CAFE (1)	27,6809	1,0010	28,6819	28,6709	28,6157	27,8349	1,10	6,61	15,38	78,00
CAFE (2)	24,0468	1,0043	25,0477	25,0341	24,9504	24,2001	1,35	9,69	15,26	75,05
CAFE PROM	25,86385	1,0027	26,8648	26,8525	26,78305	26,0175	1,23	8,15	15,32	76,52
					Desviación (±)	Desviación (±)	0,13	1,54	0,06	1,48
CASIL (1)	25,0192	1,0456	26,0648	26,0119	25,7564	25,0607	5,06	29,50	3,97	66,54
CASIL (2)	26,0170	1,0501	27,0671	27,0092	26,7531	26,0570	5,51	29,90	3,81	66,29
CASIL PROM	25,5181	1,0479	26,5660	26,5106	26,2548	25,5589	5,29	29,70	3,89	66,41
					Desviación (±)	Desviación (±)	0,23	0,20	0,08	0,12

Tabla AVII.2. Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio sales

Carbón	Componente	Masa (g)	Composición (%)	Parámetro	Humedad	Volátiles	Cenizas
CAA	-	-	-	Porcentaje (%)	6,04	14,45	5,20
CAVS	Carbón	100	77,19	Porcentaje en carbón (%)	4,67	11,15	4,02
	Vidrio	29,5	22,81	Masa en carbón (g)	0,0467	0,1115	0,0402
	Total	129,5	100,00	Porcentaje real (%)	4,56	11,22	20,34
				Masa ensayo (g)	0,0457	0,1125	0,2041
	Masa vidrio ceniza (g)	% Ceniza	% Vidrio	% Ceniza real	% Vidrio impregnado	% Carbón fijo	
	0,1640	19,68	80,32	4,00	16,34	84,78	
	Total	100,00		20,34			

La masa de compuesto CAVS (129,5 g) corresponde a la suma de los 100 g de carbón activado más los 29,5 g de sales fundentes secas. Con esas masas se determina el porcentaje de cada constituyente del compuesto. Los porcentajes de humedad, volátiles y cenizas se determinaron en base a la fracción de carbón activado presente en el compuesto y los cálculos se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \% \text{ Humedad en CA} &= \% \text{ Humedad del CA} * \frac{\% \text{ CA en compuesto}}{100} = 6,04 * \frac{77,19}{100} \\ &= 4,67 \% \end{aligned}$$

La masa de humedad, volátiles y cenizas se determinan con base a 1 g de muestra:

$$\begin{aligned} \text{Masa humedad en CA} &= \% \text{ Humedad en CA} * \text{masa muestra} = 0,0467 * 100 \\ &= 0,467 \text{ g humedad} \end{aligned}$$

El porcentaje real es el porcentaje obtenido del análisis próximo. Las masas del ensayo corresponden a las masas de humedad, volátiles y cenizas obtenidas del ensayo de análisis próximo.

$$\begin{aligned} \text{Masa vidrio en ceniza} &= \text{Masa volátiles del ensayo} - \text{masa cenizas en CA} \\ &= 0,2041 - 0,0402 = 0,1640 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{\text{masa ceniza en CA} * 100}{\text{masa ceniza del ensayo}} = \frac{0,0402 * 100}{0,2041} = 19,68 \%$$

$$\% \text{ Vidrio} = \frac{\text{masa vidrio en ceniza} * 100}{\text{masa ceniza del ensayo}} = \frac{0,1640 * 100}{0,2041} = 80,32 \%$$

El porcentaje de ceniza real presente en la fracción de carbón activado y el porcentaje de vidrio impregnado se determinan con el porcentaje de cenizas encontrado con el ensayo.

$$\% \text{ Ceniza real en CA} = \% \text{ ceniza} * \frac{\% \text{ Cenizas del ensayo}}{100} = 19,86 * \frac{20,34}{100} = 4 \%$$

$$\% \text{ Vidrio impregnado} = \% \text{ vidrio} * \frac{\% \text{ Cenizas del ensayo}}{100} = 80,32 * \frac{20,34}{100} = 16,34 \%$$

Para el cálculo del carbón fijo en la fracción del carbón activado, se consideró el porcentaje de volátiles y el porcentaje de ceniza presente en la fracción del carbón activado.

$$\begin{aligned} \% \text{ Carbón fijo} &= 100 - \% \text{ Ceniza real en CA} - \% \text{ Volátiles} = 100 - 4,00 - 11,22 \\ &= 84,78 \% \end{aligned}$$

En las Tablas AVII.3., AVII.4 y AVII.5, se presentan los resultados del cálculo del carbón fijo en el compuesto carbón activado-vidrio reciclado, carbón activado-vidrio fritas y carbón activado-polisilano. El ejemplo de cálculo para el polisilano es el mismo indicado anteriormente, la diferencia es que el porcentaje de polisilano se encuentra en la fracción de los volátiles.

Tabla AVII.3. Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio reciclado

Carbón	Componente	Masa (g)	Composición (%)	Parámetro	Humedad	Volátiles	Cenizas
CAA	-	-	-	Porcentaje (%)	6,04	14,45	5,20
CAVR	Carbón	100	36,10	Porcentaje en carbón (%)	2,18	5,21	1,88
	Vidrio	177,00	63,90	Masa en carbón (g)	0,0218	0,0521	0,0188
	Total	277,00	100,00	Porcentaje real (%)	2,18	5,12	20,88
				Masa ensayo (g)	0,0219	0,0513	0,2090
	Masa vidrio ceniza (g)	% Ceniza	% Vidrio	% Ceniza real	% Vidrio impregnado	% Carbón fijo	
	0,1902	8,99	91,01	1,88	19,01	93,00	
	Total	100,00		20,88			

Tabla AVII.4. Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-vidrio fritas

Carbón	Componente	Masa (g)	Composición (%)	Parámetro	Humedad	Volátiles	Cenizas
CAA	-	-	-	Porcentaje (%)	6,04	14,45	5,20
CAFÉ	Carbón	100	57,05	Porcentaje en carbón (%)	3,45	8,24	2,97
	Vidrio	75,30	42,95	Masa en carbón (g)	0,0345	0,0824	0,0297
	Total	175,30	100,00	Porcentaje real (%)	1,23	8,15	15,32
				Masa ensayo (g)	0,0123	0,0817	0,1536
	Masa vidrio ceniza (g)	% Ceniza	% Vidrio	% Ceniza real	% Vidrio impregnado	% Carbón fijo	
	0,1240	19,32	80,68	2,96	12,36	88,89	
	Total	100,00		15,32			

Tabla AVII.5. Resultados para la determinación del carbón fijo real en el compósitos carbón activado-polisilano

Carbón	Componente	Masa (g)	Composición (%)	Parámetro	Humedad	Volátiles	Cenizas
CAA	-	-	-	Porcentaje (%)	6,04	14,45	5,20
CASIL	Carbón	100	74,91	Porcentaje en carbón (%)	4,53	10,82	3,90
	Silicona	33,50	25,09	Masa en carbón (g)	0,0453	0,1082	0,0390
	Total	133,50	100,00	Porcentaje real (%)	5,29	29,70	3,89
				Masa ensayo (g)	0,0554	0,3112	0,0407
	Masa silicona volátiles (g)	% Volátiles	% Silicona	% Volátiles reales	% Silicona impregnada	% Carbón fijo	
	0,2030	34,77	65,23	10,33	19,37	85,78	
	Total	100,00		29,70			

ANEXO VIII

FICHAS TÉCNICAS DE CINÉTICAS DE ADSORCIÓN DE ORO EN CARBONES ACTIVADOS

Ficha técnica # VIII.1

Tipo de muestra: Compósito de carbón activado-vidrio (metasilicato de sodio pentahidratado)

Tipo de ensayo: Cinética de adsorción de oro en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de recuperación de oro con la utilización del compósito de carbón activado-vidrio sales fundentes

CONDICIONES

Volumen solución cianuro-oro: 100 mL
 Concentración solución cianuro-oro: 10 mg/L
 pH trabajo: 10,5
 Masa de carbón: 0,5 g

Tabla AVIII.1. Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compósito carbón activado-vidrio sales fundentes ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)

Tiempo (min)	Masa carbón (g)	Concentración Au (mg/L)	Porcentaje Au en solución (%)	Porcentaje Au en carbón (%)
0	-	11,03	100,00	0,00
15	0,50	10,01	90,75	9,25
30	0,51	8,55	77,52	22,48
60	0,52	7,11	64,46	35,54
120	0,52	6,04	54,76	45,24
180	0,51	4,74	42,97	57,03

Ficha técnica # VIII.2

Tipo de muestra: Compósito de carbón activado-vidrio (vidrio reciclado)

Tipo de ensayo: Cinética de adsorción de oro en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de recuperación de oro con la utilización del compósito de carbón activado-vidrio reciclado

CONDICIONES

Volumen solución cianuro-oro: 100 mL
 Concentración solución cianuro-oro: 10 mg/L
 pH trabajo: 10,5
 Masa de carbón: 0,5 g

Tabla AVIII.2. Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compósito carbón activado-vidrio reciclado ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)

Tiempo (min)	Masa carbón (g)	Concentración Au (mg/L)	Porcentaje Au en solución (%)	Porcentaje Au en carbón (%)
0	-	11,28	100,00	0,00
15	0,50	9,22	81,74	18,26
30	0,51	8,18	72,52	27,48
60	0,52	6,27	55,59	44,41
120	0,52	2,92	26,72	73,28
180	0,51	1,15	10,52	89,48

Ficha técnica # VIII.3

Tipo de muestra: Compósito de carbón activado-vidrio (frita de esmalte)

Tipo de ensayo: Cinética de adsorción de oro en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de recuperación de oro con la utilización del compósito de carbón activado-vidrio fritas de esmalte

CONDICIONES

Volumen solución cianuro-oro: 100 mL
 Concentración solución cianuro-oro: 10 mg/L
 pH trabajo: 10,5
 Masa de carbón: 0,5 g

Tabla AVIII.3. Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compósito carbón activado-vidrio frita de esmalte ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)

Tiempo (min)	Masa carbón (g)	Concentración Au (mg/L)	Porcentaje Au en solución (%)	Porcentaje Au en carbón (%)
0	-	11,03	100,00	0,00
15	0,50	8,48	76,88	23,12
30	0,51	5,89	53,40	46,60
60	0,52	3,39	30,73	69,27
120	0,52	1,8	16,32	83,68
180	0,51	1,06	9,61	90,39

Ficha técnica # VIII.4

Tipo de muestra: Compósito de carbón activado-polisilano

Tipo de ensayo: Cinética de adsorción de oro en carbones activados

Objetivo: Determinar el porcentaje de recuperación de oro con la utilización del compósito carbón activado-polisilano

CONDICIONES

Volumen solución cianuro-oro: 100 mL
 Concentración solución cianuro-oro: 10 mg/L
 pH trabajo: 10,5
 Masa de carbón: 0,5 g

Tabla AVIII.4. Ensayos de cinética de adsorción de oro en el compósito carbón activado-polisilano ([Au]= 10 mg/L, pH> 10,5 y 0,5 g carbón/100 mL sol.)

Tiempo (min)	Masa carbón (g)	Concentración Au (mg/L)	Porcentaje Au en solución (%)	Porcentaje Au en carbón (%)
0	-	11,25	100,00	0,00
15	0,50	10,63	94,49	5,51
30	0,51	10,39	92,36	7,64
60	0,52	9,86	87,64	12,36
120	0,52	9,20	84,17	15,83
180	0,51	8,06	73,74	26,26

ANEXO IX FICHAS TÉCNICAS DEL ANÁLISIS BET

Ficha técnica # IX.1

Tipo de muestra: Carbón activado

Tipo de ensayo: Análisis BET

Objetivo: Determinar el área superficial, volumen de poro y la isoterma de adsorción del carbón activado

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0		 <small>Quantachrome INSTRUMENTS</small> <small>Aplicaciones y servicios</small>	
Analysis		Report	
Operator:IM	Date:2016/06/25	Operator:DEMEX	Date:1/18/2017
Sample ID: RM-8369	Filename:	C:\QCdata\Physisorb\CAH1LM.qps	
Sample Desc: Carbon Activado en Horno Nichols LM	Comment:	SAMPLE CELL 11	
Sample weight: 0.4799 g	Sample Volume:	0 cc	
Outgas Time: 3.0 hrs	OutgasTemp:	300.0 C	
Analysis gas: Nitrogen	Bath Temp:	77.3 K	
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	90/90 sec (ads/des)	Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)
Analysis Time: 812.0 min	End of run:	2016/06/25 21:22:18	Instrument: Nova Station A
Cell ID: 11			F/W version: 0.00

Analysis Data

Administrative information

Analysis performed on:.....2016/06/25
 Analysis performed by:.....IM
 Comments:.....SAMPLE CELL 11
 Instrument:.....NOVA Station: A
 Instrument version:.....0.00
 Software version:.....11.0

Sample information

Id:.....RM-8369
 Description:.....Carbon Activado en Horno Nichols LM
 Weight:.....0.4799 g
 Volume:.....0 cc

Sample preparation information

Outgas time:.....3.0 hrs
 Outgas temperature:.....300.0 C

Analysis information

Ambient temperature:.....296 C
 Thermal delay:.....168640800 sec
 Pressure tolerance:.....0.100/0.100 (ads/des)
 Equilibration time:.....90/90 sec (ads/des)
 Equilibration timeout:.....240/240 sec (ads/des)

Figura IX.1. Condiciones de operación del ensayo BET para el carbón activado

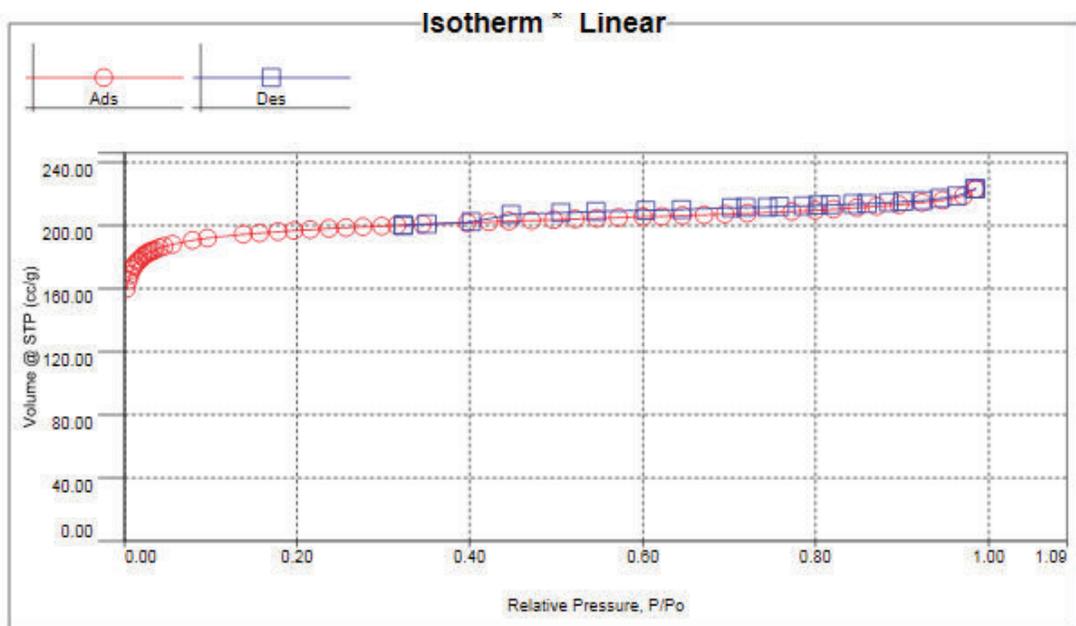


Figura IX.2. Isothermas de adsorción-desorción del carbón activado

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX
Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0



Analysis

Operator:IM
Sample ID: RM-8369

Date:2016/06/25
Filename:

Report

Operator:DEMEX
C:\QCdata\Physisorb\CAH1LM.qps

Date:1/18/2017

Volume/Area summary

Surface Area Data

MultiPoint BET.....	7.885e+02 m ² /g
NLDFT cumulative surface area.....	6.486e+02 m ² /g

Pore Volume Data

NLDFT method cumulative pore volume.....	3.026e-01 cc/g
--	----------------

Pore Size Data

NLDFT pore Radius (Mode).....	5.629e+00 Å
-------------------------------	-------------

Figura IX.3. Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del carbón activado

Ficha técnica # IX.2

Tipo de muestra: Compósito carbón activado-vidrio sales fundentes

Tipo de ensayo: Análisis BET

Objetivo: Determinar el área superficial, volumen de poro y la isoterma de adsorción del compósito carbón activado-vidrio sales fundentes

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX
Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0



Analysis		Report	
Operator:IM	Date:2016/06/25	Operator:DEMEX	Date:1/18/2017
Sample ID: RM-8357	Filename:	C:\QCdata\Physisorb\CAVH2LM.qps	
Sample Desc: Carbon Activado-vidrio composito	Comment:SAMPLE CELL 12		
Sample weight: 0.1893 g	Sample Volume: 0 cc		
Outgas Time: 3.0 hrs	Outgas Temp: 300.0 C		
Analysis gas: Nitrogen	Bath Temp: 77.3 K		
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 90/90 sec (ads/des)	Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)	
Analysis Time: 816.1 min	End of run: 2016/06/25 21:26:22	Instrument: Nova Station B	
Cell ID: 12		FW version: 0.00	

Analysis Data	
Administrative information	
Analysis performed on:.....	2016/06/25
Analysis performed by:.....	IM
Comments:.....	SAMPLE CELL 12
Instrument:.....	NOVA Station: B
Instrument version:.....	0.00
Software version:.....	11.0
Sample information	
Id:.....	RM-8357
Description:.....	Carbon Activado-vidrio composito
Weight:.....	0.1893 g
Volume:.....	0 cc
Sample preparation information	
Outgas time:.....	3.0 hrs
Outgas temperature:.....	300.0 C
Analysis information	
Ambient temperature:.....	296 C
Thermal delay:.....	0 sec
Pressure tolerance:.....	0.100/0.100 (ads/des)
Equilibration time:.....	90/90 sec (ads/des)
Equilibration timeout:.....	240/240 sec (ads/des)

Figura IX.4. Condiciones de operación del ensayo BET para el compósito carbón activado-vidrio sales

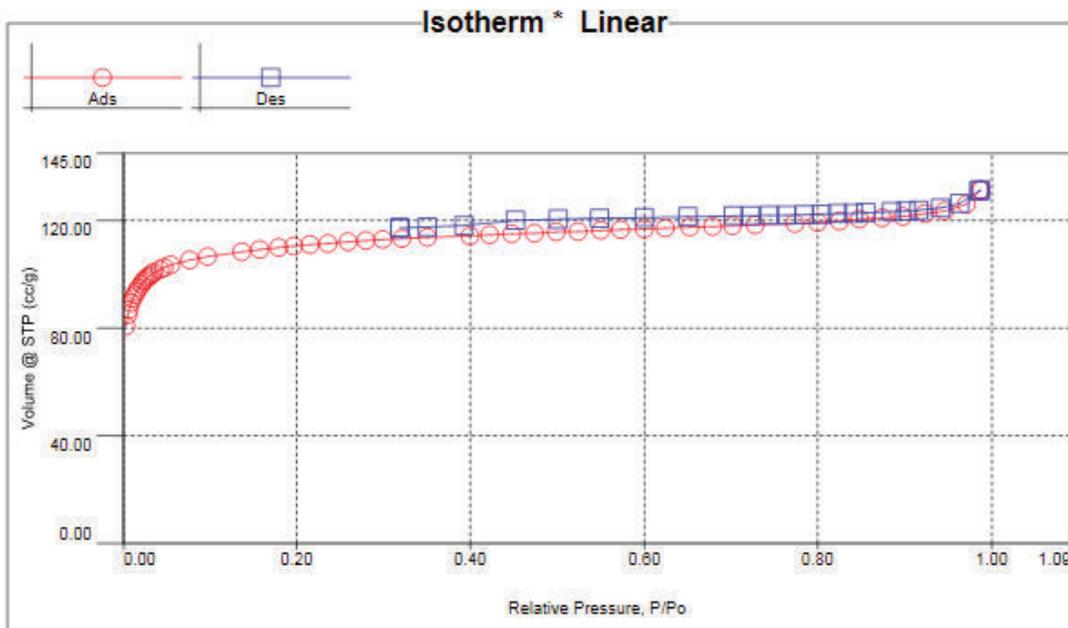


Figura IX.5. Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio sales

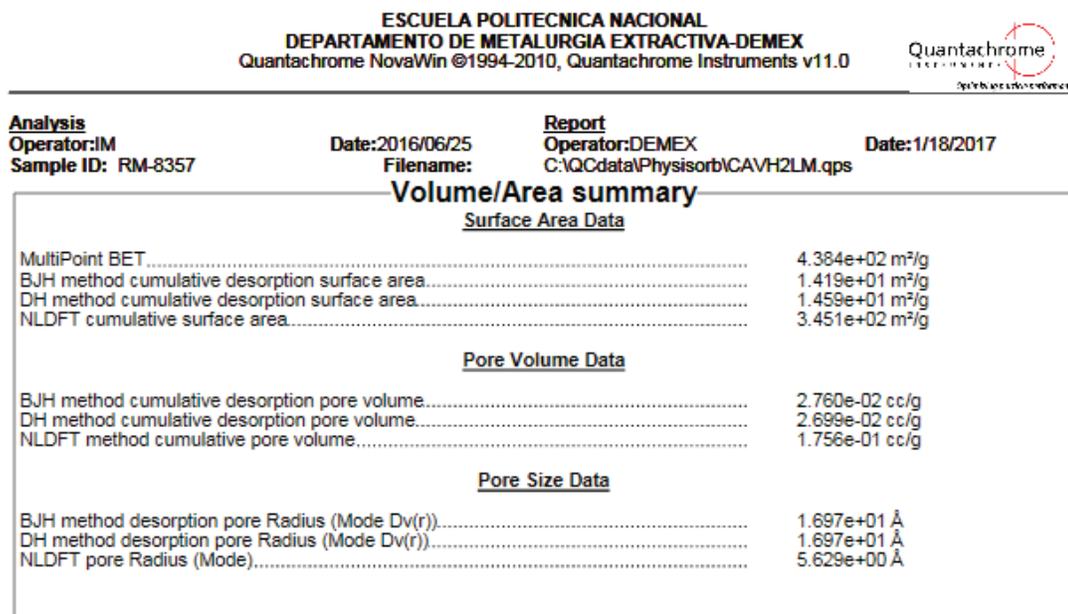


Figura IX.6. Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio sales

Ficha técnica # IX.3

Tipo de muestra: Compósito carbón activado-vidrio reciclado

Tipo de ensayo: Análisis BET

Objetivo: Determinar el área superficial, volumen de poro y la isoterma de adsorción del compósito carbón activado-vidrio reciclado

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0		 <small>Quantachrome Instruments</small>
--	--	--

Analysis	Report	
Operator: DEMEX-EC	Date: 2017/01/13	Operator: DEMEX
Sample ID: RM-8369	Filename: C:\QCdata\Physisorb\CAVR.qps	Date: 1/18/2017
Sample Desc: CA vidrio reciclado	Comment: SAMPLE CELL 12	
Sample weight: 1.0147 g	Sample Volume: 0 cc	
Outgas Time: 3.0 hrs	Outgas Temp: 300.0 C	
Analysis gas: Nitrogen	Bath Temp: 77.3 K	
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 90/90 sec (ads/des)	Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)
Analysis Time: 198.8 min	End of run: 2017/01/13 21:39:02	Instrument: Nova Station A
Cell ID: 12		FW version: 0.00

Analysis Data

Administrative information

Analysis performed on:.....2017/01/13
 Analysis performed by:.....DEMEX-EC
 Comments:.....SAMPLE CELL 12
 Instrument:.....NOVA Station: A
 Instrument version:.....0.00
 Software version:.....11.0

Sample information

Id:.....RM-8369
 Description:.....CA vidrio reciclado
 Weight:.....1.0147 g
 Volume:.....0 cc

Sample preparation information

Outgas time:.....3.0 hrs
 Outgas temperature:.....300.0 C

Analysis information

Ambient temperature:.....296 C
 Thermal delay:.....32362836 sec
 Pressure tolerance:.....0.100/0.100 (ads/des)
 Equilibration time:.....90/90 sec (ads/des)
 Equilibration timeout:.....240/240 sec (ads/des)

Figura IX.7. Condiciones de operación del ensayo BET para el compósito carbón activado-vidrio reciclado

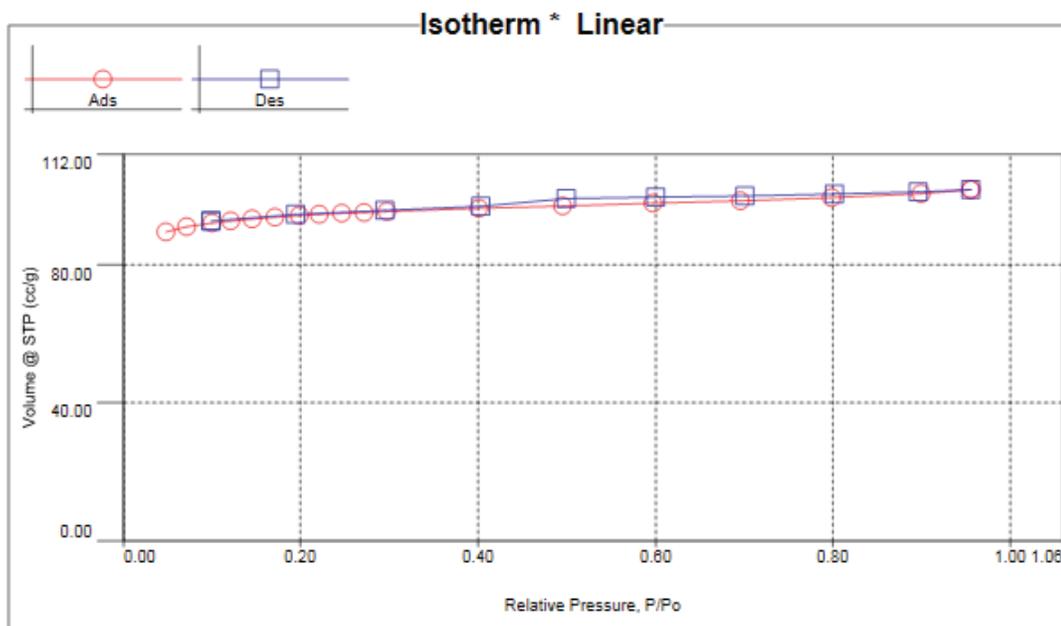


Figura IX.8. Isotermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio reciclado

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX
Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0



Analysis

Operator: DEMEX-EC
Sample ID: RM-8369

Date: 2017/01/13

Filename:

Report

Operator: DEMEX
C:\QCdata\Physisorb\CAVR.qps

Date: 1/18/2017

Volume/Area summary

Surface Area Data

MultiPoint BET.....	2.887e+02 m ² /g
NLDFT cumulative surface area.....	3.070e+02 m ² /g

Pore Volume Data

NLDFT method cumulative pore volume.....	1.402e-01 cc/g
--	----------------

Pore Size Data

NLDFT pore Radius (Mode).....	9.234e+00 Å
-------------------------------	-------------

Figura IX.9. Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio reciclado

Ficha técnica # IX.4

Tipo de muestra: Compósito carbón activado-vidrio fritas de esmalte

Tipo de ensayo: Análisis BET

Objetivo: Determinar el área superficial, volumen de poro y la isoterma de adsorción del compósito carbón activado-vidrio fritas de esmalte

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0		 <small>Quantachrome INSTRUMENTS</small>
--	--	--

Analysis Operator: DEMEX-EC Sample ID: RM-8369 Sample Desc: CA vidrio fritas Sample weight: 0.0913 g Outgas Time: 3.0 hrs Analysis gas: Nitrogen Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des) Analysis Time: 103.5 min Cell ID: 14	Date: 2017/01/16 Filename: C:\QCdata\Physisorb\CAFE.qps Comment: SAMPLE CELL 14 Sample Volume: 0 cc Outgas Temp: 300.0 C Bath Temp: 77.3 K Equil time: 90/90 sec (ads/des) End of run: 2017/01/16 18:52:00	Report Operator: DEMEX Date: 1/18/2017 Equil timeout: 240/240 sec (ads/des) Instrument: Nova Station A FW version: 0.00
---	---	---

Analysis Data

Administrative information

Analysis performed on:.....2017/01/16
 Analysis performed by:.....DEMEX-EC
 Comments:.....SAMPLE CELL 14
 Instrument:.....NOVA Station: A
 Instrument version:.....0.00
 Software version:.....11.0

Sample information

Id:.....RM-8369
 Description:.....CA vidrio fritas
 Weight:.....0.0913 g
 Volume:.....0 cc

Sample preparation information

Outgas time:.....3.0 hrs
 Outgas temperature:.....300.0 C

Analysis information

Ambient temperature:.....296 C
 Thermal delay:.....0 sec
 Pressure tolerance:.....0.100/0.100 (ads/des)
 Equilibration time:.....90/90 sec (ads/des)
 Equilibration timeout:.....240/240 sec (ads/des)

Figura IX.10. Condiciones de operación del ensayo BET para el compósito carbón activado-vidrio fritas de esmalte

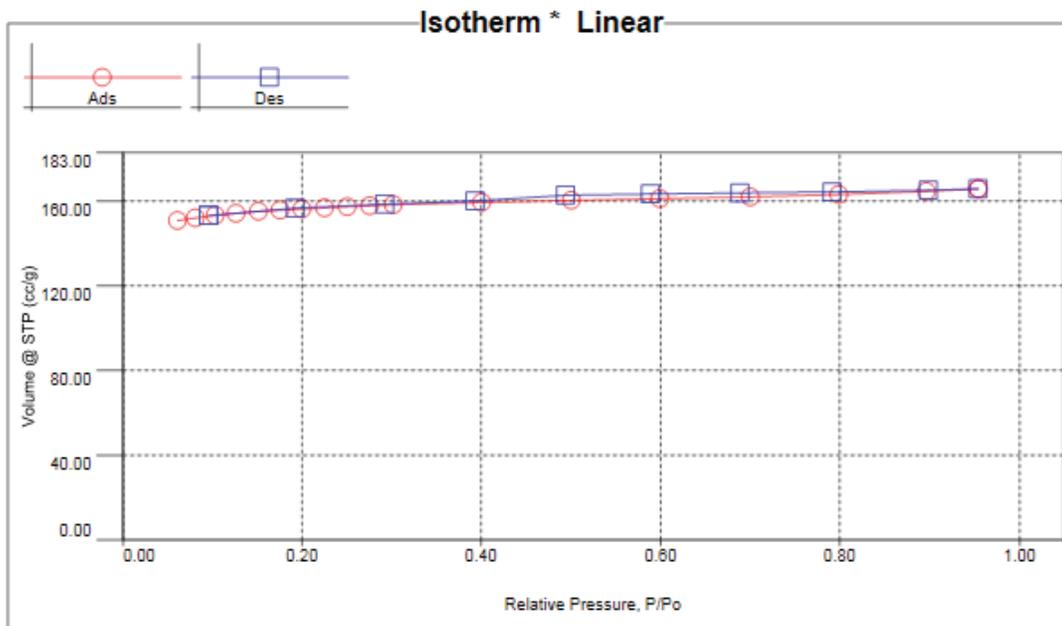


Figura IX.11. Isothermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte

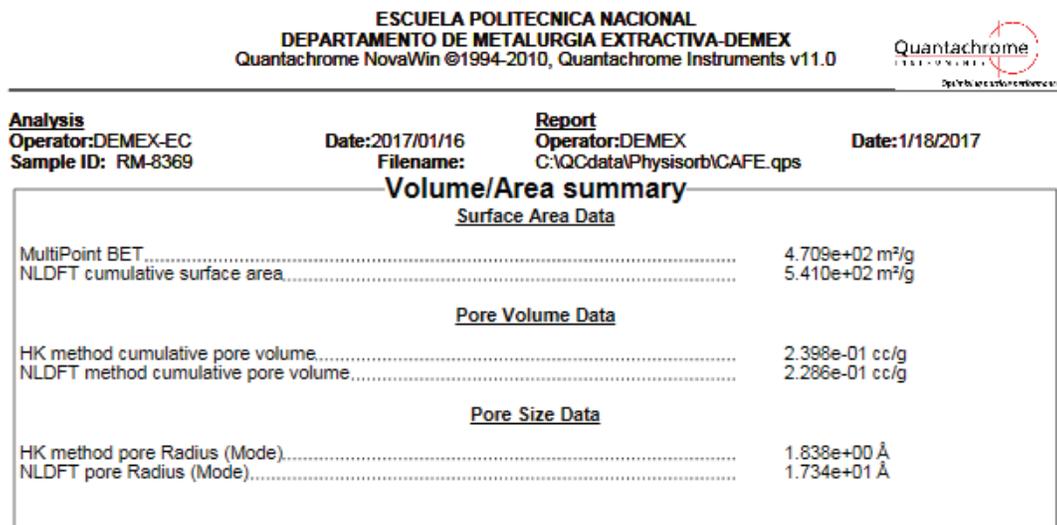


Figura IX.12. Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-vidrio fritas de esmalte

Ficha técnica # IX.5

Tipo de muestra: Compósito carbón activado-polisilano

Tipo de ensayo: Análisis BET

Objetivo: Determinar el área superficial, volumen de poro y la isoterma de adsorción del compósito carbón activado-polisilano

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0		 <small>Quantachrome Instruments</small>
--	--	--

Analysis	Report	
Operator: DEMEX-EC	Operator: DEMEX	Date: 1/18/2017
Sample ID: RM-8369	Filename: C:\QCdata\Physisorb\CASIL.qps	
Sample Desc: CA polisilano	Comment: SAMPLE CELL 13	
Sample weight: 0.1134 g	Sample Volume: 0 cc	
Outgas Time: 3.0 hrs	OutgasTemp: 150.0 C	
Analysis gas: Nitrogen	Bath Temp: 77.3 K	
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)	Equil time: 90/90 sec (ads/des)	Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)
Analysis Time: 152.2 min	End of run: 2017/01/13 18:38:43	Instrument: Nova Station A
Cell ID: 13		F/W version: 0.00

Analysis Data

Administrative information

Analysis performed on:.....2017/01/13
 Analysis performed by:.....DEMEX-EC
 Comments:.....SAMPLE CELL 13
 Instrument:.....NOVA Station: A
 Instrument version:.....0.00
 Software version:.....11.0

Sample information

Id:.....RM-8369
 Description:.....CA polisilano
 Weight:.....0.1134 g
 Volume:.....0 cc

Sample preparation information

Outgas time:.....3.0 hrs
 Outgas temperature:.....150.0 C

Analysis information

Ambient temperature:.....296 C
 Thermal delay:.....1918981987 sec
 Pressure tolerance:.....0.100/0.100 (ads/des)
 Equilibration time:.....90/90 sec (ads/des)
 Equilibration timeout:.....240/240 sec (ads/des)

Figura IX.13. Condiciones de operación del ensayo BET para el compósito carbón activado-polisilano

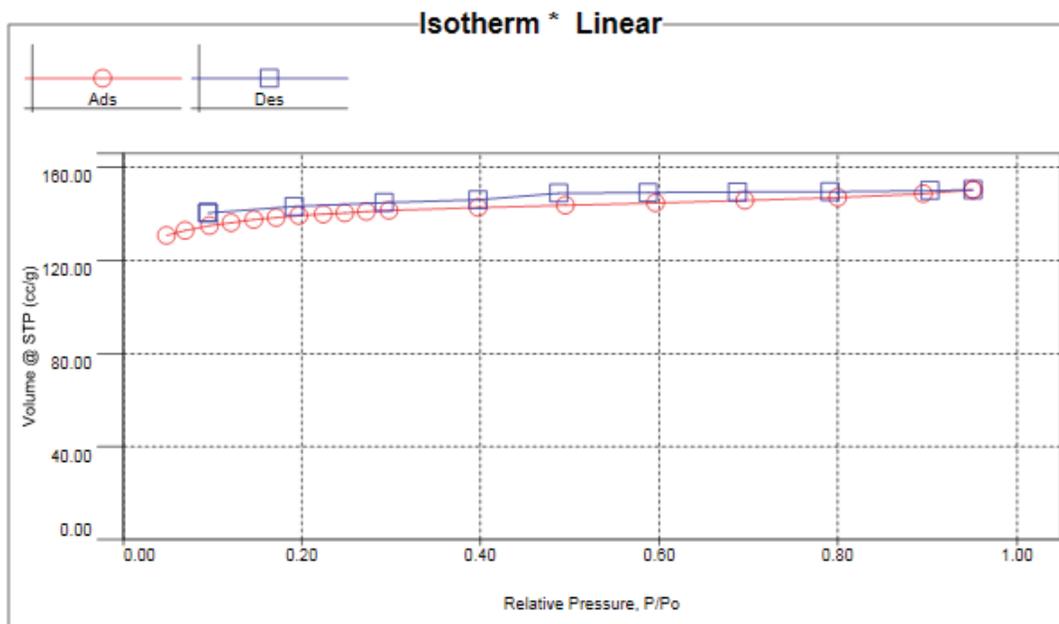


Figura IX.14. Isothermas de adsorción-desorción del compuesto carbón activado-polisilano

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA-DEMEX
 Quantachrome NovaWin ©1994-2010, Quantachrome Instruments v11.0

Quantachrome
INSTRUMENTS

Analysis	Report	
Operator: DEMEX-EC	Date: 2017/01/13	Operator: DEMEX
Sample ID: RM-8369	Filename:	C:\QCdata\Physisorb\CASIL.qps
		Date: 1/18/2017

Volume/Area summary	
<u>Surface Area Data</u>	
MultiPoint BET	4.281e+02 m ² /g
NLDFT cumulative surface area	4.383e+02 m ² /g
<u>Pore Volume Data</u>	
NLDFT method cumulative pore volume	2.079e-01 cc/g
<u>Pore Size Data</u>	
NLDFT pore Radius (Mode)	9.234e+00 Å

Figura IX.15. Datos de área superficial, volumen y tamaño de poro del compuesto carbón activado-polisilano